炭素繊維束センサの開発と性能評価

杭の健全性モニタリング手法の開発 (その1)

DEVELOPMENT OF SENSOR USING CARBON FIBER AND
EVALUATION OF PERFORMANCE

Development of techniques for monitoring integrity of piles (Part I)

石井 清*, 稲田 裕**, 杉村 義広***

Kiyoshi ISHII, Hiroshi INADA and Yoshihiro SUGIMURA

Various reports on damage to pile foundation of buildings due to 1995 Hyogoken-Nambu earthquake indicate the need to develop techniques for quick and accurate assessment of damage to piles following major earthquakes. In this paper, the monitoring sensor using the carbon fiber enclosed between glass fiber reinforced plastics is proposed. First, the performance requirements in monitoring the integrity of piles are discussed, and the applicability using the carbon fiber is confirmed comparing with other sensors. The proposed sensor has many advantages, for examples, a small section, a long-length, a good durability, an easy inspection using an electric resistance tester, etc. And also, the mechanical properties both of a carbon fiber and the sensor are investigated through the several type tension tests. As the result, the proposed sensor has the applicability in monitoring the integrity of structural elements, in which the discrimination is determined as the elongation percentage of the fiber, and the maximum strain is memorized referring to the residual electric resistance.

Keywords : *Health Monitoring, Sensor, Carbon Fiber, Concrete Pile, Earthquake, Structural Damage*
健全性モニタリング, センサ, 炭素繊維, コンクリート杭, 地震, 構造損傷

1. はじめに

兵庫県南部地震(1995)では, 上部構造のみでなく基礎構造についても多くの被害例が報告されている。特に, その後の詳細調査の結果, 杭基礎の広範な損傷が確認されている¹⁾。その中には, 上部構造には有意な損傷がないにも係らず, 杭基礎には重大な損傷を受けている例も見られた。また杭の損傷発生位置は, 杭頭部に限らず, 杭中間部における損傷が見出されたものもあった。杭中間部の損傷の多くは, 液状化層と非液状化層との間の境界において発生しており, 地盤の液状化に伴う側方流動による地盤の変位により生じたものと考えられる。この場合, 地中構造物の損傷の発生は, 周辺地盤の変位あるいは変状から推定することができ, 詳細調査が行われている。また上部構造に傾斜が生じたり, 基礎部に不同沈下が生じたりした場合も掘削調査が行われ, 杭の損傷が発見されている²⁾。

杭の損傷程度の評価手法としては, 掘削による目視確認が広く用いられているが, 深い位置の損傷調査には膨大な時間とコストを要するので, 必ずしも実現し得なかった例もあると言われている。こうした目視できない領域における杭の損傷評価には, インテグリティテストとボアホールカメラによる画像観測が併用されているが, 損傷程度の判断には困難を伴ったようである。さらに, 適切な杭の損傷度判定基準自体がなかったことから, 継続使用の判断が困難なものとなった

ことも指摘されている。このような基準の早急な整備とともに, 視覚に頼らないで損傷を検知し, 損傷程度を評価できる技術があれば, 地震後の復旧活動における迅速性, 経済性などのあらゆる点で格段の向上が望めることを強く示唆するものであった。

近年, 構造物に予めセンサを設置しておき, その信号を計測することにより外力や構造物の損傷の大きさを判定する健全性モニタリング技術に関する研究が注目されている³⁾。先端的な計測技術, 情報処理・通信技術の発達により, 土木建築構造物のような大型構造物への健全性モニタリング技術の適用が可能となってきた。健全性モニタリングは, 上記のような災害発生時の損傷評価とともに, 構造物の劣化評価や寿命予測に対しても有効な技術であり, 社会基盤構造物の劣化が社会問題となっている現状で, 様々な研究開発が精力的に進められている。しかし, 杭などの基礎構造の損傷検知に対して, 健全性モニタリング技術を適用し, 健全性評価手法の実用化が行われた例はこれまで見られない。

著者らの研究グループでは, 以上の状況を考慮して, 地震後の被害調査で, 杭の損傷の有無とその程度を簡単かつ即座に判定するためのモニタリング技術の共同研究を1996年から始めた⁴⁾。まず, 判定基準を整備すること自体が重要な課題となっていることを考慮し, 既製コンクリート杭の曲げ試験に基づいてひび割れに関する損傷度の特

* 清水建設株式会社 技術研究所 主席研究員・工博

** 清水建設株式会社 泉研究室 工修

*** 東北大学大学院工学研究科都市・建築工学専攻 教授・工博

Chief Research Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.
Izumi Research Institute, Shimizu Corporation, M. Eng.
Prof., Dept. of Architecture & Building Sci., Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Dr. Eng.

定を試み、モニタリングの可能性を検討した⁹⁾。またそれと並行して、杭の健全性評価への適用が可能と思われる複数の材料について、適用性の検討や小規模な予備試験を行い、センサ材料を特定した。その結果、本研究では損傷検知材料として炭素繊維束を用いることとし、センサの開発を進め、センサの特性やモニタリングの性能について検討を進めてきた。

本論文では、炭素繊維束を用いたモニタリング手法の開発に関して継続的に行ってきた一連の研究の成果から、(その1)として炭素繊維束の基本特性と炭素繊維束センサの性能を、引張試験などに基づいて実用化の観点から考察した結果を示す。以降、本研究の続報において、PHC杭を対象とした曲げ試験やせん断載荷試験によりモニタリングの性能評価を行った結果、さらに実構造物への適用によりセンサの有効性を検討した結果等を示していく予定である。

2. 炭素繊維束を用いたモニタリングセンサ

2.1 杭の健全性モニタリングに対する要求性能

本研究における杭の健全性モニタリング技術は、杭体内にあらかじめセンサを配置して、センサからの信号の計測によって構造物に生じた損傷を検知するという考え方に基づいている。したがってセンサの選定では、検知すべき損傷の形態や程度、さらにセンサの取付けや供用下の状態を、十分に考慮する必要がある。

ここで、杭の健全性評価のためのモニタリングセンサへの要求性能としては、特に以下のような点が重要となる。

- (a) 検知性能：検知すべき損傷の種類、程度を明確にして、適切なセンサを用いること。
- (b) 耐久性：劣化等を起こさず、長期に安定した機能を保ち、メンテナンスを必要としないこと。
- (c) 施工性：取り扱い、設置が簡単で、信号ケーブルの接続や養生が容易なこと。
- (d) 判定の容易さ：計測に特殊な計器を必要とせず、損傷程度の判定に複雑な解析が求められないこと。
- (e) コスト：製作および設置等にかかる費用が安いこと。

ここでは、被災後の杭の補修、補強の観点から、モニタリングの結果を杭の継続使用の可否判断に適用することを考える。その場合、(a)の検知性能については、曲げによるひび割れ発生レベルの比較的小さい損傷の検知がモニタリングの性能として求められる。

一方、基本的な要求特性としては、杭の製作時や建築基礎工事の工程に合わせて、センサの取付け、計測ケーブルの配線を行う必要があること、また地震被災直後に現地において迅速な計測・評価が求められることを考慮すると、上記の条件の中でも(c)の施工性や(d)の判定の容易さが重要となる。さらに供用期間中いつ遭遇するか分からない地震に備える耐久性を有するためには、材料・構造的にも単純なものが望まれる。

2.2 センサ材料の特定

ここでは、適用の候補となりうる幾つかのセンサに対して上記の要求性能をあてはめ、炭素繊維束を使用するに至った理由を説明する。始めに、一般的な歪計や変位計、加速度計なども、構造モニタリングのための重要なセンサとなる。しかし、これらは上記の耐久性やコストの点で課題があり、杭の健全性モニタリングには適さない。こ

こで、杭の曲げによる損傷を検知する方法として、線状のセンサを用いて曲げ引張歪みを検知するセンサが考えられる。杭軸方向にある程度の幅を持つ範囲で損傷発生が危惧されることを考慮しても、センサは点型ではなく、線状のものが適している。光ファイバセンサはこの条件を満たし、また健全性モニタリングセンサとして近年最も注目を集めている技術である。光ファイバセンサは計測原理の異なる幾つかの方式があり、計測対象としても歪み、温度、加速度等に対して開発が進められている¹⁰⁾。コンクリート構造物の歪み計測に対しては、ブルリアン散乱光に基づく信号処理システムが用いられる事が多く、実構造物にも適用された例もある¹¹⁾。しかし、経路上の分解能が現状では1メートル程度であり、精密な光計測機器と高度な信号処理システムを必要とすること、取付けや配線には工夫と注意が必要であることなどから、前節の要求性能を満足しない。

次に、同じ線状のセンサとして、炭素繊維束を用いたセンサの開発の可能性を検討した。炭素繊維束は、直径が数マイクロンという極細の長繊維(フィラメント)の束で、導電性を持つ。炭素繊維束に引張荷重が作用すると、繊維がその伸びによって徐々に破断し、除荷しても破断した繊維部分が完全には元の状態に戻らないため、電気抵抗値は初期値より大きな値を示す。したがって、部材の変形と電気抵抗の残留値との関係を調べておけば、部材の損傷程度を容易に推定することができる。炭素繊維束を用いたセンサは、原理、材料ともに非常にシンプルであり、センサ材料として耐久性を持つこと、取り扱いが容易であること、テスターによる抵抗計測のみで損傷を評価できること等、前節の要求性能の(b)から(e)までは概ね満足している。炭素繊維材料の構造物の損傷検知への適用については、武藤らによる一連の研究^{12,13)}があり、損傷検知の基本的な概念や有効性は示されている。ただしその研究は、主要構造材料として使用されている炭素繊維強化プラスチック(CFRP)材料が、導電特性を調べることにより破断等に対する損傷検知も容易にできることを示したものである。したがって、炭素繊維束のセンサとしての性能や実用上の適用可能性は、検討されていない。

炭素系材料を用いたセンサとしては、炭素繊維束以外でも、炭素の短繊維や微粉末をコンクリート中に混ぜ圧壊検知への適用を行ったもの^{10),11)}やガラス繊維を芯材としてビニールエステル樹脂等に炭素の微粉末を付着させ固化体としたもの¹²⁾が提案されている。前者については、曲げによる圧壊を検知するセンサとして本研究でも検討を行った結果、短繊維や微粉末をコンクリートに均等に混合することや炭素材料とコンクリートを電氣的に絶縁する加工が難しいことなどの課題があることが分かった。後者のセンサについては、コンクリート杭への適用性の実験的検討¹³⁾も報告されているが、安定した性能を持つ長いセンサの製造は容易でないこと、センサの導電性が低いため、極めて大きい電気抵抗値の中での微小な変化を計測する必要があること、センサの取り扱いや施工が難しいこと等の問題はなお残しており、実用化にはこれらの課題の克服が必要であると考えられる。

2.3 センサの実用化に向けた課題

前節において炭素繊維束はセンサの材料として、要求性能を概ね満たしていることを示したが、炭素繊維束センサの実用化に向けては、次のような技術課題が残る。

- (i) 感度の調整：要求性能の(a)で示したように、センサの検知性能の調

整は重要な課題である。炭素繊維束をセンサとして用いた場合に、電気抵抗特性や損傷検知の感度が何で決まるのかについて明らかにする必要がある。

(ii)性能の長期安定性：炭素繊維の材料特性は安定しており、耐久性を持つことが示されている。一方、電気抵抗特性の長期安定性、特に繰り返し荷重下での変動特性については、未だ研究された例はないため、検討が必要である。

(iii)センサの強度特性および電気抵抗特性：炭素繊維束は適切な加工を行って、センサとして用いる必要がある。製作したセンサとしての強度特性や電気抵抗値の特性を評価する必要がある。また感度や記憶特性が安定しており、ばらつきが小さいことが求められ、その特性評価を行うことが重要である。

そこで以下の章では、上記の課題に対して実験的な検討を行った。上記の課題の (i) と (ii) は炭素繊維束に係る技術課題、(iii) はセンサに係る技術課題であり、それぞれ章を分けて結果を示す。

なお、以上のセンサに対する要求性能や課題は、杭の損傷検知に対象を絞って説明を行った。しかし、センサ開発では杭のモニタリングに限らず、一般の構造健全性モニタリングに広く適用でき、かつ復旧作業の迅速化、効率化に役立つものとすることを念頭に置いた。その適用先としては、i) 安全上近づけない場所や部位；高所、危険物付近、立ち入り制限場所、ii) 目視が困難な場所や部位；建物の基礎、化粧版の内側、設備などで視界が遮断されている箇所等が考えられる。

3. 炭素繊維束に係わる技術課題の検討

3.1 炭素繊維束の引張特性評価

始めにセンサの検知材料となる炭素繊維束について引張試験を行い、強度特性と電気抵抗特性について考察する。実験では2種類の炭素繊維束を用い、その特性を比較した。一方の炭素繊維はパン系（東レトレカ T300-6K、以下 T300）であり、他方はピッチ系の繊維（三菱化学 DIALEAD-K13A10、以下 K13A）である。パン系は原料としてポリニトリルアクリル系の繊維状有機物を、ピッチ系は石油または石炭の蒸留残渣を用いている。1本の繊維束は、それぞれ6,000本と10,000本の繊維からなっている。また引張強度は、T300が3,500MPa、K13Aが2,600MPaで、T300のほうが大きく、特に破断伸びはT300が1.5%、K13Aが0.36%と差が大きい。

引張試験供試体の概要図を図1に示す。炭素繊維束は、ほつれを防ぎ扱いやすくするために樹脂を含浸させてある。さらに供試体の両端は、試験機の治具に固定できるようにグラスファイバー（GF）のマットではさみ、電気ケーブル接続用の端子を設けている。ここで、T300は繊維束を5本束ねてフィラメント数30,000本の供試体とし、K13Aは2本束ねてフィラメント数20,000本の供試体とした。フィラ

図1 炭素繊維束引張試験供試体の概要図

表1 炭素繊維束の破断応力・破断歪み

繊維種	本数	最大応力		最大歪み	
		平均値 (Mpa)	変動係数	平均値 (%)	変動係数
T300	10	3798.3	0.04	2.36	0.07
K13A	6	1579.1	0.27	0.20	0.28

メント数を増やした理由は、治具に固定する際に破損をさせないことや、荷重制御を容易にするために破断時の最大荷重を確保するためである。載荷方法は繰り返し載荷方式とし、最大荷重を漸次増大させていき、最終的に破断に至らせた。試験では、荷重、供試体の伸びとともに、交流計測計を用いて炭素繊維束の電気抵抗値を計測した。

どちらの炭素繊維についても、全ての供試体が弾性的な挙動を示し、応力—歪み関係は破断に至るまで比例関係にあった。試験を行った供試体の本数、破断時の最大応力と最大歪みについて平均値とその変動係数を求め、表1に示す。材料特性値と比較すると、T300は最大応力が引張強度よりも大きい、K13Aは最大応力、最大歪みとも引張強度、破断歪みと比べて6割程度の値である。また、変動係数も0.27、0.28と比較的大きい。この理由として、樹脂が炭素繊維束に十分に含浸せず、強度の低下を生じた可能性が考えられる。センサの製作では加工方法を検討し、樹脂材の含浸の程度を高めるとともに、強度のばらつきを減らす必要がある。

次に、電気特性を評価した結果を示す。載荷に伴う応力—電気抵抗値変化率との関係の例を図2に示す。ここで、電気抵抗変化率は初期抵抗値 R_0 に対する変化の割合 $(R - R_0)/R_0$ である。いずれの供試体でも、応力の増大にともない電気抵抗値が増大しており、ある荷重まで載荷して除荷すると、電気抵抗値の変化率は非常に小さい値に留ま

図2 炭素繊維束の応力と電気抵抗値の関係

図3 炭素繊維束の履歴歪みと残留抵抗変化率の関係

るが、その時点で経験した最大応力に応じた残留値を示す。この最大応力時の歪みを履歴歪み、除荷後の抵抗変化率の残留値を残留抵抗変化率として、図3にその関係を示す。これは供試体の受けた変形とセンサの記憶性能の関係を示している。両繊維種ともに変化率の変動には供試体間のばらつきがみられるが、履歴歪みにともない残留抵抗変化率は増大している。2種類の繊維種の結果を比較すると、K13Aが小さな歪みから残留抵抗値を生じ、センサとして敏感であることが分かる。また、残留抵抗値が生じる履歴歪みの値を比較すると、T300は約1.5%、K13Aは約0.35%であり、各炭素繊維束の破断伸びの値と一致している。この結果から、繊維の種類によりセンサの感度が調節できること、特に検知目標の歪みの大きさに一致する破断伸びの値を持つ炭素繊維束を選べば、目標とする感度が得られることが分かる。

3.2 繰り返し載荷試験による長期安定性評価

前述したように、センサには長期安定性が重要な性能として要求される。炭素繊維は、鋼材等と同様にSN曲線にのる材料であり、強度上の長期安定性を持つことは幾つかの研究^{14), 15)}により明らかにされている。しかし、電気抵抗特性の長期的な変動について検討された例は、これまで見られない。そこで、ここでは繰り返し載荷試験を行い、電気抵抗値の変動を評価した結果を示す。

供試体は、前節の試験に用いた2種類の繊維種の供試体から、強度面でより安定していたT300を選定した。実験は、温度が $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、湿度が $50 \pm 5\%$ に保たれた恒温室内において、DCモータを動力とする小形の載荷試験機を用いて行った。計測項目は、荷重・のびおよび電気抵抗値である。なお、電気抵抗値に関しては、荷重の増減に伴う微小な変化を計測する必要があるため、試験体に一定電圧の電流を流し発生する誘導電圧を計測することにより測定した。またデータの記録は、繰り返し載荷中15分ごとに10秒間、サンプリング間隔10msec

表2 繰り返し載荷試験における試験条件

荷重レベル	最大値 (Mpa)	破断応力に対する割合	最小値 (Mpa)	試験体数 (本)
1	3,300	0.87	480	2
2	3,380	0.89	520	2
3	3,560	0.94	520	2

で上記の測定項目のデータを計測し、PCに収録して行った。また荷重は引張側のみで振動数1Hzの正弦波で変動するように設定し、載荷荷重の最大値を変えた3ケースについて試験を行った。その試験条件を、表2に比較して示す。表中の破断応力に対する割合とは、前出の引張試験における最大応力に対する変動応力の比である。最も低い荷重レベルでも、最大値は破断応力に対して90%に近い値となっているが、これを下回る荷重では、繰り返し回数が100万回（11日以上）を超えても破断に至らず、また計測波形の変化も生じなかったため、考察の対象からはずした。またレベル3より大きな荷重では、載荷とともに破断が発生してしまう場合もあり、ばらつきが大きいため、やはり考察の対象からはずしている。

各供試体が破断したときの繰り返し数と応力の最大値との関係を図4に示す。今回行った実験では、供試体数および荷重条件の限界から、SN線図の定量的な評価は難しいが、応力の増大に伴う破断に達する

図4 破断したときの繰り返し数と応力の最大値の関係

図5 繰り返し試験における計測波形の一例

荷重繰り返し数の指数的な減少は明確に表れている。破断強度に非常に近い大きさで繰り返し荷重を与えていることを考慮すると、破断に達する繰り返し回数は、センサとしての実用上、十分多いと考えられる。したがって、この実験結果からも炭素繊維束が材料として、荷重繰り返しに対して十分な耐久性を持つことが確認された。

次に、計測した波形の例を図5に示す。これは、載荷した荷重レベルが3で、約8万回（約22時間）の荷重繰り返し数で破断に達した供試体について、15時間経過した時点における10秒間の荷重、伸び、電気抵抗値の時間変化を示している。この例からも分かるように、伸びと電気抵抗値の時間変化の波形は、破断寸前まで荷重条件、供試体に係らず乱れを生じず、荷重と同位相の正弦波を描いている。そこで、各計測回毎に10秒間の伸びと電気抵抗値の最大値と最小値を求め、伸びは供試体長さで割って歪みとし、電気抵抗値は初期抵抗値からの変化率で表した。図6は、その結果の一例として、図5と同じ供試体について、荷重の繰り返し数に対する歪みと電気抵抗変化率の最

図6 繰り返し数と歪みと抵抗変化率の最大値・最小値の関係

(a) 電気抵抗変化率の平均値

(b) 電気抵抗変化率の変動幅

図7 繰り返し数に対する電気抵抗変化率の経時変化

大値・最小値の経時的な変化を示す。歪みは治具の滑りによって初期の段階で大きくなった後は、ほぼ一定の繰り返しをしていることが分かる。電気抵抗値も初期段階で上昇した後は、破断する直前まで同じ変動を繰り返している。

さらに電気抵抗変化率の平均値と変動幅を求め、載荷レベルごとに1つの供試体の結果を比較して図7に示す。どの荷重レベルでも、電気抵抗変化率の平均値は破断に近づくまではほぼ一定値を保っている。また、その値は変動荷重の最大値が大きい荷重レベルほど大きい。変動幅も同様に、荷重レベルが大きいほど大きく、破断まではほぼ一定の値である。なお、荷重レベル1では、繰り返し数が90万回に達するまで平均値、変動幅ともに一定値を保ったため、図では破断まではその変動を示していない。

以上のように、荷重の繰り返しに伴う炭素繊維束の電気抵抗値の変動は、平均値・変動幅ともにほぼ一定に保たれ、破壊に達する寸前まで波形に大きな乱れは生じない。これらの結果から、中小の地震やその他の振動によって、繰り返し荷重がかかる疲労環境下に置かれた場合においても、炭素繊維束の電気抵抗特性は長期的に安定していることが確認された。

4. センサに係わる技術課題の検討

4.1 炭素繊維束センサの製作

炭素繊維束がコンクリート中に埋込まれてセンサとして働くためには、i) コンクリート自体が半導体であることから、炭素繊維とコンクリートが絶縁されていること、ii) センサとコンクリートの付着が十分確保されていることの2点が重要である。さらに、前述したように強度・抵抗特性のばらつきをできるだけ小さくすること、製作コストを押さえることが求められる。そこで、上記の要求を満たすようなセンサの仕様を検討するとともに、安定した性能のセンサを経済的に製作できるように、工場の生産ラインで加工できるような形状とすることとした。センサの試作を繰り返した結果、図8に示すような構造に決定した。炭素繊維束には前述したK13Aを採用し、炭素繊維束の絶縁と保護を兼ねた外覆には、無方向に配置したガラス繊維で補強されたビニルエステル樹脂 (FRP) を使用している。センサの断面寸法は幅2cm、厚さ2mmである。軸方向の長さは1.5mを標準としているが、数cmから数十mまで自由に調整することができる。またセンサの側面には、コンクリートとの付着確保のために、3cm間隔で深さ約3mmの刻み (凹部) を配置している。また炭素繊維束両端に端子を設け、電気ケーブルを接続している。

センサは杭の施工時に、鉄筋やPC鋼棒に沿うように取付けを行う。そしてコンクリートと一体となり、引張歪みに対して鉄筋やPC鋼棒と概ね同じように応答することとしている。またこのセンサは断面が小さいことから、取付けによるコンクリート躯体への強度上の影響も少ない。さらに、センサはある程度の柔軟性を持っているため、湾曲を持たせた取付けや太目のリールに巻きつけて運搬するこ

図8 炭素繊維束センサの概要図

図9 センサの引張試験に用いる供試体

とが可能である。

4.2 開発したセンサの性能評価

(1) センサ単体の引張試験について

始めにセンサ単体の引張試験を行い、センサの強度と電気抵抗特性を検討した結果を示す。供試体は図9(a)に示すように、センサ長を24cmとしたセンサの両端に、治具固定用のFRPのプレートを取付けたものである。ただし、応力集中等の影響を避けるため、センサの側面の刻みは付けていない。なお、図9(b)には後述の実験で用いるセンサを詰めるケーシングをあわせて示した。試験方法は3.2と同様であり、荷重、変位、センサ表面の歪み及びセンサの電気抵抗変化を計測した。試験は16本の供試体について行い、そのうち3体は破断まで連続的に荷重を上げる単純載荷、残りの13体は最大荷重を徐々に上げる繰り返し載荷とした。

センサは炭素繊維とガラス繊維を含む繊維相とマトリックス相からなる複合材料と考えることができるため、その強度は複合則に従って以下のように求めることができる¹⁵⁾。始めに、炭素繊維(cf)、ガラス繊維(gf)とマトリックス(m)について、体積含有率を $V_{cf}=0.05$ 、 $V_{gf}=0.20$ 、 $V_m=0.75$ 、引張強度を $\sigma_{cf}=2600\text{MPa}$ 、 $\sigma_{gf}=2450\text{MPa}$ 、 $\sigma_m=78.5\text{MPa}$ 、引張弾性率を $E_{cf}=790\text{GPa}$ 、 $E_{gf}=72.5\text{GPa}$ 、 $E_m=3.37\text{GPa}$ と設定する。ここで体積含有率は、センサ部材を燃焼させ繊維基材の質量を測定することで求めた。またガラス繊維はランダム配向であることから、経験則からその強度を一方向材の25%とした。このとき、センサの引張強度 σ_s と引張弾性率 E_s の理論値は、それぞれ次式に従って求められる。

$$\sigma_s = V_{cf} \sigma_{cf} + 0.25 V_{gf} \sigma_{gf} + V_m \sigma_m \quad (1)$$

$$E_s = V_{cf} E_{cf} + 0.25 V_{gf} E_{gf} + V_m E_m \quad (2)$$

ただし、上式は炭素繊維とガラス繊維が複合材として破断まで挙動し、同一の歪みで破断するとの仮定から得られるものである。また破断歪みの理論値は破断強度と弾性率から求めることとした。

表3 センサの強度特性値の比較

	引張強度 (Mpa)	弾性率 (Gpa)	破断歪み (%)
理論値	311.4	45.7	0.68
実験値	238.6	51.9	0.37

始めに、試験により得られた引張強度と破断ひずみの平均値を理論値と比較して表3に示す。ここで弾性率の実験値は、単純載荷した3つの供試体について、応力—歪み曲線の直線部分の傾きの平均値として求めた。引張強度の実験値は理論値の70%程度である。これは炭素繊維とガラス繊維の破断伸びが著しく異なるため、破断伸びの小さい炭素繊維が先に破断し、その結果センサ全体の破断が生じるためと考えられる。センサの破断歪みの平均値(実験値)は0.37%であり、炭素繊維の破断歪みにほぼ一致している。ここで、破断歪みの実験値の変動係数を求めると0.10であり、3.3節で示した炭素繊維束の引張強度と比較すると小さく、強度特性の供試体間のばらつきが小さくなっている。さらに試験前に計ったセンサの電気抵抗値は平均で 1.7Ω 、変動係数は0.03であり、センサの品質の安定化が計れたことが確認される。

引張載荷中の電気抵抗値の変動については、破断に至るまでに抵抗の変化が確認された供試体は16本中3本のみであり、ほとんどのセンサは破断するまで抵抗変化を示さなかった。したがって、センサの応答は破断時点から始まり、その載荷条件は炭素繊維束が破断のびに達した時点と考えることができる。この結果から、炭素繊維束の引張試験結果に基づいて示した、センサの損傷検知の感度が炭素繊維束の破断伸びの値によって決められるという考察が、製作されたセンサについても有効であることが確認された。

(2) センサの記憶性能評価のための引張試験について

ここでは、コンクリート躯体中に設置されたセンサの状態をケーシングに詰めることで模擬し、その供試体の引張試験によりセンサの抵抗特性、特に記憶性能を評価した結果を示す。前述のセンサ単体の引張試験では、引張力のすべてをセンサが負担する。しかし、センサがコンクリート躯体中に設置されている場合は、引張力を構造筋やコンクリートの断面全体に負担するため、センサの引張強度を超えても完全な破断状態にはならないことがある。また完全に破断していない状態で除荷すると、構造体が元の状態に戻ろうとするのに応じて、センサもある程度元の状態に戻り、抵抗値もある値に落ち着く。したがって、構造物の損傷状態を除荷時に検知するには、この残留抵抗特性の評価が重要となる。またコンクリートに埋込まれた状態では、センサは均一的な歪みに対する応答の他に、ひび割れ等の局所的な歪みに対しても応答する。したがって、コンクリート部材の平均的な歪みが炭素繊維束の破断のびに達する前の低い荷重レベルから、局所的には炭素繊維束が切れ、センサの電気抵抗値の変化が生じる。

以上の点を考慮して、センサをケーシングにつめ、エポキシ樹脂で充填した供試体を作製して引張試験を行うことにした。ケーシングは、図9(b)に示したように、長さ30cm、内径24mm、厚さ1mm、両端部の長さ7cmの部分は治具の掴み代として厚さを3mmとした。ケーシングの材質は熱処理ばね鋼(SUP)で、降伏点は0.6%以上もあるため、炭素繊維束の破断伸びはケーシングの弾性範囲内である。計測項目としては、荷重、変形、センサの電気抵抗値と中央における歪み、さらにケーシング計測部の上中下3点の歪みとした。試験を行った供試体数は2本である。

試験の結果の例として、引張応力に対するセンサとケーシングの歪みの変化を図10(a)に比較して示す。ケーシングの上中下3点の歪みはほとんど差がなく、一様の歪み状態となっていることが確認され

(a) 引張応力とセンサ・ケーシングの歪みの関係

(b) 引張応力とセンサの抵抗変化率

図10 引張応力に対するケーシングとセンサの応答

図11 ケーシングの履歴歪みと残留抵抗変化率の関係

ため、図では中央部の計測点の結果のみを示した。センサの歪みは、ケーシング歪みと比べて8割程度とやや小さいが、どちらも荷重の繰り返しに対して線形の応答を保っている。また歪みゲージが約 4500μ で破断したため、その後のセンサ歪みの計測はできていない。同じ供試体について、引張応力に対する抵抗変化率を図10(b)に示す。これによれば、引張応力がかなり小さい領域から抵抗変化が生じ、除荷したときも残留抵抗の増大を示していることが分かる。

次に、各载荷サイクルにおける最大荷重時にケーシングに生じた歪みの値(履歴歪み)に対して、除荷したときの残留抵抗変化率を求め、図11に示す。これはセンサを埋込んだ構造体に生じた損傷の大きさに対するセンサの記憶性能の関係を表している。それぞれ○と△で示した2つの供試体の結果は良く対応しており、この図を用いれば、载荷時に構造物に生じた歪みの大きさを、除荷後の抵抗計測により評価することができる。

ここで、センサの残留抵抗はケーシングの履歴歪みが約 $1,500\mu$ 程

度から観察されており、履歴歪みが $2,000\mu$ になると残留抵抗変化率は0.1を超え抵抗の増加は顕著となり、センサの記憶によりケーシングに生じた変形を検知することができる。炭素繊維束やセンサ単体の引張試験では、歪みが炭素繊維の破断伸びに達した時点からセンサの応答が始まるのに対して、上の残留抵抗が生じる歪みの値はかなり小さい。この理由としては、ケーシング内のセンサの収まりやエポキシ樹脂の充填具合により歪み分布にばらつきが生じ、その局所的な歪みに対してセンサが応答したことが挙げられる。また、炭素繊維束は本来、繊維方向に強度のわずかなばらつきがあり、弱い部分から破断するため、その強度のばらつきの影響も考えられる。したがって、センサの記憶性能の評価では、対象とする構造体での評価が不可欠であり、計測の対象とする部位や荷重状況、さらには損傷モードを考慮した実験が必要である。

5. 結論

以上に示すように、炭素繊維束を用いて、杭の健全性を評価するためのモニタリングセンサを開発し、その特性を検討した結果、結論は次のようにまとめられる。

- (1) 杭の損傷を検知するためのモニタリングセンサとして、炭素繊維束は要求性能を満たし、センサ材料として適切である。またセンサとしての感度は、繊維の破断伸びにより調整できる。
- (2) 炭素繊維束は長期間疲労環境におかれても、破壊に達するような荷重を受けない限りモニタリング性能の劣化は生じないものと考えられる。
- (3) 開発したセンサは性能が安定しており、薄く、柔軟で、運搬や屈曲した部位への取り付けも容易である。また、埋込まれた材料の強度への影響も小さい。
- (4) センサは、コンクリートの躯体中に埋め込まれた状況では、周囲の構造の歪みが $1,500\mu$ 程度から損傷の検知が可能である。また、センサの感度は、構造体の全体の歪みだけでなく、ひび割れ等の局所的な変形に対しても応答する。

【謝辞】

本研究は、東北大学と(株)大崎総合研究所の共同研究を切掛として、筆者らが足掛け6年間に渡り行ってきた研究成果の一部をとりまとめたものである。実験やデータの整理では、東北大学大学院工学研究科の関係者の方々をはじめ、清水建設(株)技術研究所ならびに和泉研究室の関係者の方々には、多大の協力と助言をいただいた。また、センサの試作や製造に関しては、旭硝子マテックス(株)C&A推進部の関係者の協力をいただいた。ここに改めて謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、日本建築学会近畿支部基礎構造部会：兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告書，400p，1996.7。
- 2) 例えば、日本建築学会構造委員会基礎構造運営委員会：杭基礎の耐震性に関する諸問題 第3編地震被害と復旧事例，pp.151-168，2000.4。
- 3) 例えば、山本鎮男：ヘルスマニタリング，255p，共立出版，1999.8。
- 4) 杉村義広ら：杭の健全性モニタリング技術に関する基礎的研究(その1)～(その4)，日本建築学会学術講演会梗概集(構造)，20364-20367，pp.723-731，1998.9。

- 5) 杉村義広, 井口春木, 磯田裕樹, 佐々木建一: 既製コンクリート杭の損傷度に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, 第10巻, 1号, pp.91-100, 1999.1.
- 6) 大塚孝敬編: 光ファイバセンサ, 259p, オーム社, 1986.
- 7) 倉嶋利雄, 佐藤昌志: 光ファイバを用いた構造物のひずみ分布計測, 土木学会誌, Vol.82, No.12, pp.18-20, 1997.12.
- 8) 武藤範雄, 荒井康裕, 柳田博明, 中辻照行, 杉田稔, 大塚靖: CFGFRP 複合材料とCFGFRP筋コンクリートの破壊自己診断, 日本セラミックス協会学術論文誌, Vol.100, No.12, pp.1429-1434, 1992.
- 9) Muto, N., Yanagida, H., Nakatsuji, T., Sugita, M. and Ohtsuka, Y.: Preventing Fatal Fractures in Carbon-Fiber-Glass-Fiber-Reinforced Plastic Composites by Monitoring Change in Electric Resistance, Journal of American Ceramic Society, Vol.76, No.4, pp. 875-879, 1993.
- 10) Chen, P.W. and Chung, D.D.L.: Carbon Fiber Reinforced Mortars for In-situ Health Monitoring by Electrical Resistance Measurement, Symposium on Non-destructive Evaluation and Material Properties II, Pittsburgh, Pa., pp.13-20, 1994.
- 11) Chen, P.W. and Chung, D.D.L.: Concrete as a New Strain / Stress Sensor, Composites; Part B, Vol.27-B, pp. 11-23, 1996.
- 12) 柳田博明, 松原秀彰: 自己診断材料の設計と適用, 日本機械学会誌, Vol.102, No.963, pp. 6-9, 1999.2.
- 13) Nishimura, H., Sugiyama, T., Okuhara, Y., Shin, S-G., Matsubara, H. and Yanagida, H.: Application of Self-Diagnosis FRP to Concrete Pile for Health Monitoring, Proc. of SPIE's 7th Annual International Symp. on Smart Structures and Materials, International Society for Optical Engineering, pp.335-342, 2000.3.
- 14) 宮野靖, 森杉荘司, 鈴木恵, 毛利三知宏: ビッチ系一方向CFRP積層板の曲げ疲労挙動の負荷速度および温度依存性, 材料, Vol. 42, No. 473, pp. 189-194, 1993.2.
- 15) 池田哲史: ビッチ径炭素繊維を用いた複合材料の疲労特性, 強化プラスチック, Vol. 45, No. 5, pp. 175-179, 1999.5.
- 16) 林毅: 複合材料工学, 第2章 複合の理論, pp. 25-58, 日科技連, 1971.9.

(2001年11月9日原稿受理, 2002年4月1日採用決定)