

構造ヘルスマニタリングと非破壊試験による 構造物の長寿命化

株式会社ジャスト 技術部

1. はじめに

構造物の長寿命化を目的に、当社では、構造ヘルスマニタリング技術の開発と非破壊試験による、構造物の健全性の確認を行っている。

10数年前から、既存建築物を対象とした、耐震診断のための調査や、劣化調査が増え始めた。その中には、全く損傷のない状態で調査を行ったり、損傷や劣化が補修されずに長い間放置されているなど、調査時期の適正でない事例も少なくなかった。そこで、構造物を常時モニタリングし、健全性を常に把握することが出来れば、適切な時期に調査や診断をすることができ、構造物を長く安全に使い続けることが出来ると考えている。

当社では、構造ヘルスマニタリング用にスマートAEセンサ(以下SAEセンサ)とスマートVAセンサ(以下SVAセンサ)を開発した。この2種類のセンサを構造物に配置し、構造物の状態をモニタリングすることで、健全性を常に把握することが可能となる。更に、大地震直後の構造物の損傷検知も可能となり、人命の安全確保と減災にかかる労力や時間の削減が期待できると考えている。

この構造ヘルスマニタリングや目視検査などによって、RC構造物の劣化・損傷が確認された場合には、コンクリートの内部の健全性を確認する目的で、コンクリート表面から超音波試験又はX線透過試験を行っている。

また、鋼構造建築物・橋梁・鉄塔等のボルトの損傷が目視等によって確認された場合や、火災の被害を受けた構造物(ボルト接続部)が、継続して使用できるか否かを確認するため、ボルトに導入されている軸力の確認を、当社で開発した超音波ボルト軸力計により行っている。

以下に、構造ヘルスマニタリング用センサ(SVAセン

サとSAEセンサ)の概要と、コンクリート内部の超音波試験の概要、ボルト軸力計の原理と特徴について示す。

2. 構造ヘルスマニタリング

2-1 構造ヘルスマニタリングの現状

構造ヘルスマニタリングとは、構造物に配したセンサから得られる情報に基づき、構造物の損傷を検知したり、その構造安全性を監視したりする技術をいう。ヘルスマニタリング自体は、もともと航空・宇宙・機械産業などで用いられてきた技術であり、建築・土木分野での関心が高まったのは、1990年代半ばにおこったノースリッジ地震と兵庫県南部地震の後である。その後十数年間に、構造ヘルスマニタリングに関する様々な方法が提案されてきた。しかし、実用的なものはあまり見られない。

2-2 SAE・SVAセンサ

従来の構造ヘルスマニタリングシステムが実用にならない理由として、2つ考えられる。一つは損傷指標を明確にしている例が少ないということである。損傷指標を明確に提示することが出来れば、構造ヘルスマニタリングの有用性をエンドユーザーに対し示すことができ、広く普及させることが出来ると考えられる。もう一つは、システムが複雑になり、装置が高価になりすぎるということである。

そこで当社では、損傷指標を明確にし、さらにシステムの簡略化を行い、安価な2種類のセンサ(SAE・SVA)を製作した。

SAEセンサは、コンクリートのひび割れの発生により、コンクリート中に伝播するAE波(超音波)を検知す

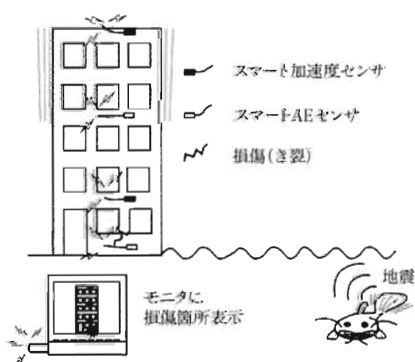


図1 ヘルスモニタリングシステムのイメージ

るものであり、基板上に超音波を検知する振動子（従来のセラミック振動子ではなく、コンポジット振動子使用）とCPUおよびデータ転送部を搭載したものである。SAEセンサを用いたモニタリングシステムは、SAEセンサ、データ転送部およびデータを記録、表示するPCから構成される。このシステムでは、システム全体を統括するPC上で膨大なAE波のデータを処理するのではなく、各センサユニット上で計測されたAE波を簡便な損傷指標に変換し、少ない情報量からなる指標データのみをモニタリングPCに転送することを特徴としている。SAEセンサにおける損傷指標は、単位時間当たりにAE波が閾値を超える回数(AE計数)とし、4段階の閾値を設定している。4段階の閾値により、AE信号の振幅の確認とノイズの弁別をはかっている。

SAEセンサの大きさは、約20×80mmである(写真1)。SAEセンサは、データ処理機能を有しているため、記録装置へのデータ通信の方法は選択が可能である。現状では、記録装置をパソコンとし通信媒体にUSBを用いるタイプ(写真1)と記録装置をメモリとし通信媒体にツ



写真1 SAEセンサ外観

イストペア線を用いるタイプ(写真1)を用いている。このほかの通信方法として、LAN(有線・無線)や電話線などを使用する方法が考えられる。

SVAセンサは、加速度の時刻歴データを基に、振動特性の変化を捉えるもので、構造物全体の損傷を検出するシステムである。このSVAセンサは、同一基板上に小型の加速度計、CPUおよび通信回路と、省電力無線ZigBeeによるデータ転送システムを搭載している。SVAセンサを用いたモニタリングシステムも、SVAセンサ、データ転送部およびデータの記録及び表示を行うPCから構成されている。

SVAセンサは、システムを統括するPCから起動信号が送られるか、もしくは自動トリガモードにより閾値を超える加速度が計測されるとサンプリングを開始し、あらかじめ設定された時間長(通常では120秒)で測定を行い、時刻歴データを損傷指標であるゼロクロス点数・加速度絶対値和・最大加速度に変換し、その損傷指標のみをシステムを統括するPCへ転送する。なお、今後CPUが高速化されればFFTなどの高度な処理も可能になると期待できる。

SVAセンサの外観(写真2)を以下に示す。センサの大きさは約20×60mmである。SVAセンサの主な仕様を以下に示す。

- ①測定軸：直交三軸
- ②測定範囲：±1.5G
- ③サンプリング周波数：100Hz
- ④非直線性：最大1.5%、標準0.5%以下
- ⑤温度特性：0.5mG/℃以下
- ⑥A/D 変換10bit

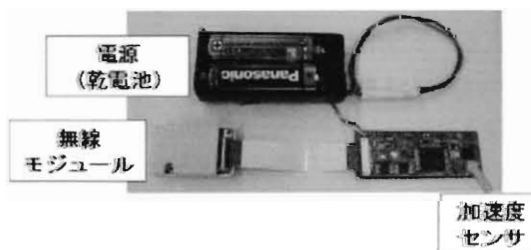


写真2 SVAセンサ外観

3. コンクリートの超音波試験

構造ヘルスマニタリングによる監視システムや、目視調査によりRC構造物の損傷が確認された場合には、コンクリート超音波試験による調査を行っている。RC構造は、建築・土木分野で広く用いられており、RC構造物の劣化はコンクリート内部の鋼材の腐食、凍害、アルカリ骨材反応、化学的侵食、疲労等によるものが殆どで、劣化の初期段階では外観上の変化を確認することは難しいとされている。また、損傷の評価や使用上の性能の低下、ひび割れなどの内部伸展状況、ジャンカの有無など確認することも難しいとされている。そのため、当社では、超音波によるコンクリート構造物内部の試験を行い、コンクリート内部の健全性の確認を行っている。

3-1 コンクリート超音波試験の原理

コンクリート超音波試験は、コンクリート表面に接触媒質を介して接触させた探触子からコンクリート内部に超音波を伝播させ、それを探触子で受信することによりコンクリート内を伝播した超音波の特性(伝播時間・振幅の大きさ等)を基にコンクリート内部の状況を推定するものである。このとき、超音波の送受信を1つの探触子で行うことを1探触子法、送信と受信を別の探触子で行う方法を2探触子法という。

コンクリート構造への超音波試験の適用例を以下に示す。

3-2 コンクリートの厚さ測定

コンクリートの厚さ測定で重要なことは、予め鉄筋位置をレーダー等で確認して測定を行うことと、骨材の径に比べて大きな径の振動子を有する探触子を用いることである。壁・床のような薄い部材には、1探触子法で厚さを測定し、1探触子法で測定困難な比較的厚い部材には、2探触子法を用いる。コンクリートの厚さ測定は、図2のようにコンクリート中に超音波を伝播させ、発信と受信の時間を計測し、超音波の音速により、厚さを求めている。



写真3 測定状況（1探触子法）

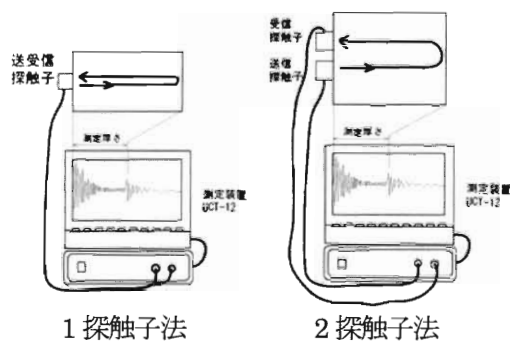


図2 コンクリート厚さ測定原理

3-3 コンクリートひび割れ深さ測定

超音波の伝播時間の変化により深さを測定する方法であり、図3に示すようにひび割れを挟んで2探触子法を適用する。コンクリート中を伝播する超音波は、ひび割れの先端を迂回するため、ひび割れ深さに応じて、伝播時間が変化する。伝播時間から伝播距離を求め、ひび割れ深さを推定する。



写真4 計測状況

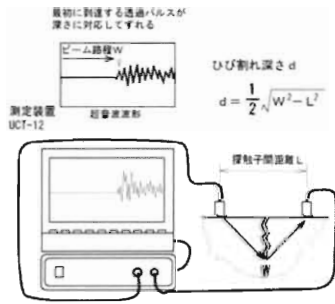


図3 ひび割れ深さ測定原理

3-4 ひび割れ・打継部の補修確認

ひび割れや打継部を補修の前と後に、図4に示すように2探触子法による測定を行い、充填の確認をする。測定は、部材の同一面又は対面に探触子を設置して行う。ひび割れ、打継ぎ部の補修は、エポキシ樹脂やモルタルの注入によって充填補修を行われるが、十分に充填されていると、超音波透過量が増え、図4(a)のような波形が確認できる。充填が十分でない場合には、充填前と同様に、超音波が透過せず、図4(b)のような波形となる。



写真5 測定状況

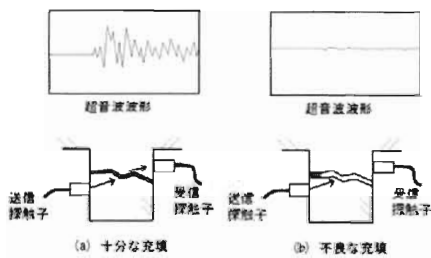


図4 打継ぎ部補修確認の原理

3-5 ジャンカの有無の確認と位置の検出

ジャンカの検出は壁・スラブでは1探触子法を用い、柱・梁では2探触子法を用いる。2探触子法で計測を行う場合には、図5のようにジャンカ部分で超音波が伝播しないことや、迂回することから、受信した超音波の振幅が小さくなり、伝播時間が長くなることにより、ジャンカの有無や位置を検出している。1探触子法を用いる場合には、反対面で反射してコンクリート中を伝播する超音波が受信されないことによって、ジャンカの有無を確認している。



写真6 計測状況(2探触子法)

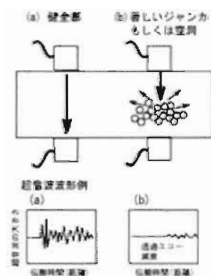


図5 ジャンカ検出の原理

4. ボルト軸力計

建築・橋梁・鉄塔等の高力ボルト軸力測定に、当社で開発した超音波ボルト軸力計を用いている。高力ボルトのピンテールの未破断や、マーキングが確認されていない等の施工上の問題がある場合、及び火災による熱で高力ボルトに導入されている軸力が低下しているか否かの確認などにボルト軸力計を利用している。

4-1 ボルト軸力測定の実状

施工済の高力ボルトの軸力を測定する方法は、今までなかった。予め軸力を測定することを前提に、施工されたボルトについては、軸方向に超音波を伝播させ、その伝播時間を精密に測定することにより、軸力の変化を捉えることができる。しかし、その方法では、ボルトの端面を精密に仕上げ、初期値を測定する必要があり、容易な測定ではない。また、目視によりボルトの異常を確認したり、テストハンマーで異常を確認したりすることが行われてきたが、その場合、実際に検出されるのは、ボルト軸力が殆ど0 tの場合とそれ以外の軸力程度の判定しか出来ず、現場での測定は困難とされてきた。

4-2 ボルト軸力計の原理と特徴

当社で開発したボルト軸力計は、ナットの側面から対面する面まで伝播する超音波の透過量を測定することによってボルト軸力を推定するものである(写真7, 8)。測定の実理は図6に示すように、ボルト軸力が増加すると、超音波の透過量は増加する。そこで、この超音波の透過量を測定し、予め設定した軸力と超音波の透過量との関係から、軸力を測定している。測定に際し、ボルト側面と超音波探触子を密着させるために、接触媒質として霧状の少量の水を使用するため、ボルトの接触媒質の汚れ・腐食等を防止できる。ボルト軸力計の特徴を以下に示す。

- ①コンパクトで携帯性がよい
- ②ボルトの両端仕上げ・初期値測定不要
- ③1箇所の測定が短時間(20秒程度)
- ④多少錆びたボルトでも測定できる
- ⑤計算式を内蔵し、軸力を直読できる
- ⑥測定データをパソコンやプリンタに出力できる



写真7 ボルト軸力計



写真8 計測状況

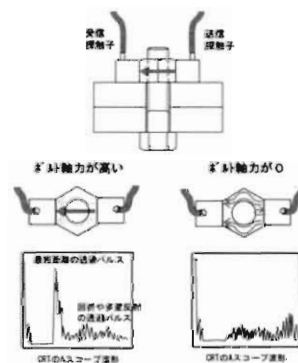


図6 ボルト軸力計原理

※特許取得

※「高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工維持管理指針(案)」掲載(土木学会)

5. おわりに

災害発生後の対応や事前の備えとして、センサ技術の開発・現状の課題の解決が重要である。また、多様化するニーズに応えられるように、更なる技術開発をすすめ、調査・検査法を確立し、対応していくことが構造物の長寿命化につながると考えている。

【参考文献】

- 1) コンクリート技術シリーズNo.76 コンクリート構造物のヘルスマonitoring技術/平19.4/社団法人土木学会
- 2) 構造ヘルスマonitoringがつくる安全・安心な建築空間/平20.9/日本建築学会構造委員会振動運営委員会
- 3) スマートAEセンサを使用した構造物の実用的ヘルスマonitoring/平20.6/日本建築学会技術報告集第14巻第27号149 - 152
- 4) 構造物のヘルスマonitoringを目指したスマート加速度センサの開発/平20.6/日本建築学会技術報告集第14巻第27号153 - 158
- 5) コンクリート構造物の劣化診断に関する研究委員会報告書/平19.3/東京大学生産技術研究所助産産産技術研究奨励会