

最大ひずみ記憶センサーを用いた橋梁の診断技術

川鉄エンジニアリング(株)	正員	下見成明
(株)計測リサーチコンサルタント	正員	松井義昌
コーデンテクノインフォ(株)		新川秀一
川鉄エンジニアリング(株)		中泉義政

1. はじめに

米国 Strain Monitor Systems 社 (以下、SMS 社と言う) が開発した最大ひずみ記憶センサー (以下、SMS センサーと言う) は、ステンレス系の特殊合金がひずみを受けるに從い非磁性から強磁性状態へと非可逆的に変態する性質を応用した、新しい概念のセンサーである。

この技術は、サンフランシスコのロマプリエタ地震後の1990年に、ビルや橋梁の構造的安全性を簡便・短期間に検査するために、Bruce WestermoとLarry Thompsonの両教授によって考案され開発されたものである¹⁻⁶。このような新技術を開発する努力に対して、ASCEの外郭団体である土木技術財団からの Charls Pankow Innovative Concept賞 (1997) と第10回建設革新のための年次国際ショーケースで NOVA賞 (1998) の2賞を受賞した。

しかし、SMS センサー技術にはまだ未成熟な部分があり、現在、筆者らがさらに使いやすいセンサーとするために改良中である。

本報告では、SMS センサーの概要と、米国ジョージア州交通局 (以下、GDOT とする) の実施例等について述べる。

2. SMS センサーの概要

2.1 SMS センサーの原理

一般に、ステンレス合金の結晶組織はある温度 (遷移温度) を境として高温状態ではオーステナイト、低温状態ではマルテンサイトであり、高温から低温に変化すれば結晶組織も同様に变化する。これを変態という。

オーステナイトは面心立方格子構造であり、マルテンサイトは体心立方格子構造である。また、オーステナイトは非磁性材であり、マルテンサイトは強磁性材である。図-1 に変態の概念図を示す。

一般に、金属に弾性領域を越える荷重を加えると塑性領域に移行する。この過程で、オーステナイトに焼鈍されたステンレス合金は常温中でマルテンサイトに変態し、図-2 に示すように、マルテンサイトの割合は塑性量に比例する。また、いったんマルテンサイトに变化した結晶は除荷した後も、オーステナイトに戻ることはない (非可逆性)。

ステンレス合金中のマルテンサイトはその割合に応じて磁性の強さが変化し、磁性の強さは電圧に変換して取り出すことができる (図-3 参照)。

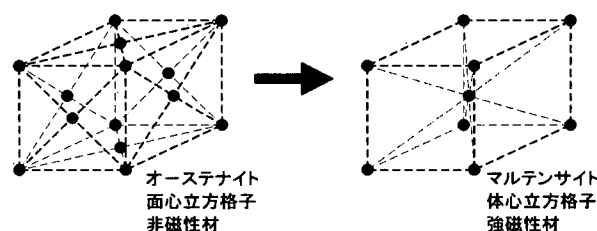


図-1 オーステナイトからマルテンサイトへの変態概念図

キーワード : TRIP鋼 最大記憶型変位計 現場計測 損傷監視 地震時挙動

住 所 : 東京都文京区後楽1-1-5

TEL : 03-3817-0133 FAX : 03-3817-0178

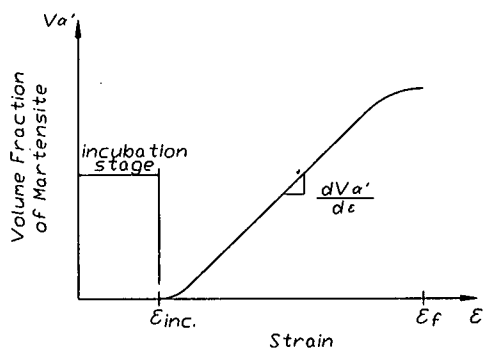


図-2 ひずみ量とマルテンサイト量の関係

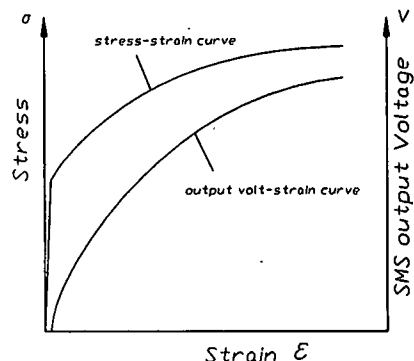


図-3 ひずみ量と応力度、出力電圧の関係

以上の原理を計測機器に応用したものがSMSセンサーである。

2.2 SMSセンサーの特徴

SMSセンサーはステンレス合金の非可逆性を利用したものであり、ある外力を受けて生じたひずみ量に相当する出力電圧が生じ、除荷後もその出力電圧は変化しない。(最大ひずみ記憶性)

このことは、SMSセンサーを取り付けて以後の、構造物に生じた最大ひずみを任意の時点で取り出せることを示している。

図-4に、変動応力を受ける構造物に取り付けたSMSセンサーと従来型センサーの出力の差をしめす。

SMSセンサーの情報は、測定時刻 t_0 の極値が時刻 t_1 に取り出せることを示している。電源は情報を取り出すとき、すなわち時刻 t_1 に供給するだけでよいことから、パッシブ型ひずみピークセンサーである。

最大値記憶型変位計を除いて、従来型ひずみセンサーは、出力したときの構造物の情報しか取り出せないのは周知のことである。ただし、従来型センサーを使用した

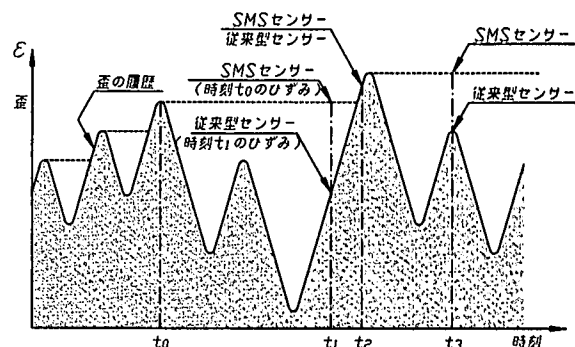


図-4 SMSセンサーと従来型センサーの比較

最大値を抽出する方法として、①センサーに連続して電源を供給し、②連続して情報を記録するシステムを用い、③さらに最大値を抽出するためのシステムが実用化されている。こうしたことから、従来型センサーは常時電源を供給する必要があるため、アクティブセンサーとすることができる。

SMSセンサーは、最大値が記憶できることが最大の利点であるが、同時にこれしかできないことが最大の欠点でもある。従って、SMSセンサーと従来型センサーを併用して相互の欠点を補うことが測定技術の飛躍的な発展につながることを考えると考えられる。

以上述べてきたSMSセンサーの特徴を、従来型センサーと対比して表-1に示す。

表-1 SMSセンサーと従来センサーの比較

	SMSセンサー	従来のセンサー
計測できるもの	現在までの最大値	現在の状態
最大値の抽出・記憶	まさにこれのみが可能 データが必要な時に抽出	常時電源を供給し、測定・記録が必要
計測可能な最大ひずみ	大きい	SMSセンサーに比べて小さい
塑性域の測定	可能	困難
ひずみの変化に対する追従性	増大方向には計測可能 減少する場合は不可	増大・減少両方向に追従可能
電源供給	記憶したデータを読みとる時のみ電源を供給 (パッシブセンサー)	測定したい期間には常に電源の供給が必要 (アクティブセンサー)
データの量	1つ/回・個	非常に多い

2.3 SMSセンサーの構造

ここに紹介するステンレス系の特殊合金はTRIP (Transformation induced plasticity) 鋼とよばれるもので、いわゆる知能材料 (Intelligent/Smart Material) のひとつである。すなわち、従来のセンサーが構造材料の表面付近に装着した電気抵抗変換器などを利用するものであったのに対して、SMSセンサーは、発生した最大ひずみに比例してTRIP鋼の磁気特性が非可逆的に変化する性質を利用するもので、これはむしろTRIP鋼を構造材そのものに使用した場合に、よりユニークな計測が可能となるものと思われる。すでに航空機用のボルトをTRIP鋼で製作したり、極細繊維状にしてカーボンファイバー材料に組み込むなどして、これらの応力履歴中の最大値を検出しようとする研究も進められている。鉄骨・鉄筋などの建築材料や橋梁・鉄塔などの構造物の一部をTRIP鋼に置き換えることで、地震時の最大ひずみとその分布を詳細に記憶できる可能性もある。この場合、変化した磁気特性をどのようにして検出するかが課題である。

ここでは、TRIP鋼の様々な利用形態を想定しつつその初期段階として、まず従来のひずみセンサーと同様に構造材の表面に装着して、任意時点で既往の最大ひずみを計測するセンサーを開発した。

図-5はセンサーエレメントの形状である。この形状は、TRIP鋼の応力～ひずみ特性を考慮して構造母材の測長間のひずみがセンサー検知部の塑性ひずみに集中し、かつその破断ひずみが所定のひずみ測定容量を満足し、引張力を極力小さく押さえつつ十分な電気的出力を確保できる大きさにした。

図-6はこのセンサーエレメントを装着するセンサーハウジングである。ハウジングには、センサーエレメントを固定し、常時弾性限界程度の引張力を保持するバネと、磁気特性の変化を検出する電気回路を内蔵する。(a)はSMS社によって開発された当初の形状であるが、実験の結果、電気回路・バネおよび防水などの耐久性に課題があることが判明し、あらたに(b)のように設計し直した。

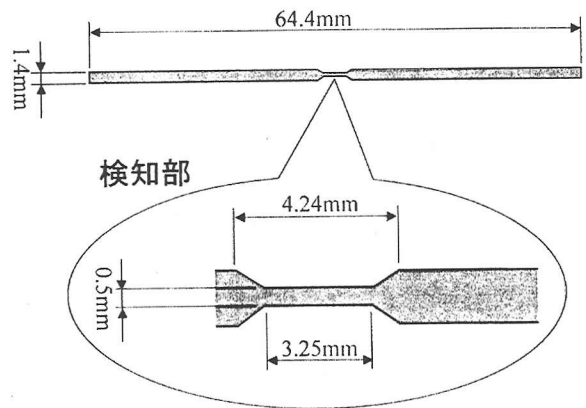
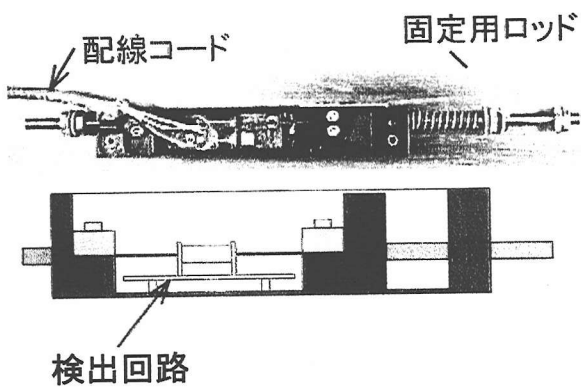
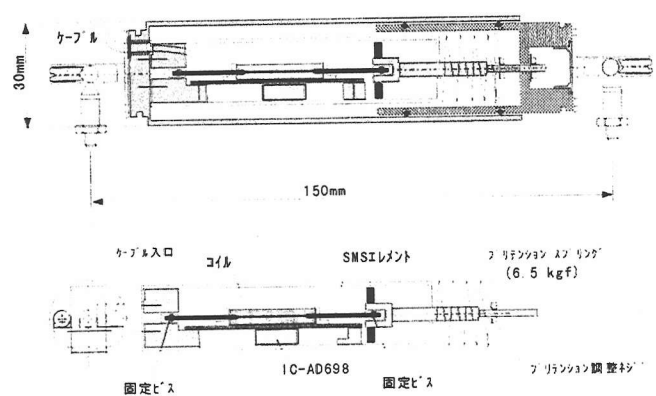


図-5 センサーエレメントの構造



(a) SMS社型



(b) 改良型

図-6 SMSセンサーの構造 SMS社 (a) と改良型 (b)

3. SMSセンサーの基本性能試験

SMSセンサーは現在改良開発中であり、出荷段階での性能はいまだ確定していない。ここでは、1998年6月に筆者らが実施した基本性能試験の結果を紹介する。

3.1 基本出力特性

JIS-Z2201 1号B試験片にSMSセンサーを装着し、引張試験に供した(写真-1)。試験結果を図-7に示す。荷重の増加に従って、SMSセンサーの出力も増加し、荷重の減少過程ではそれまでの最大荷重に相当する出力を保持している。

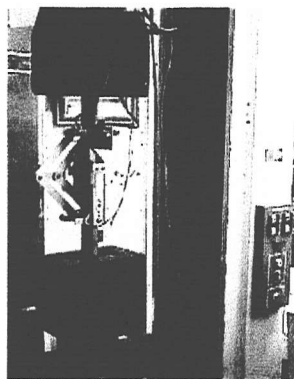


写真-1 引張試験・試験片

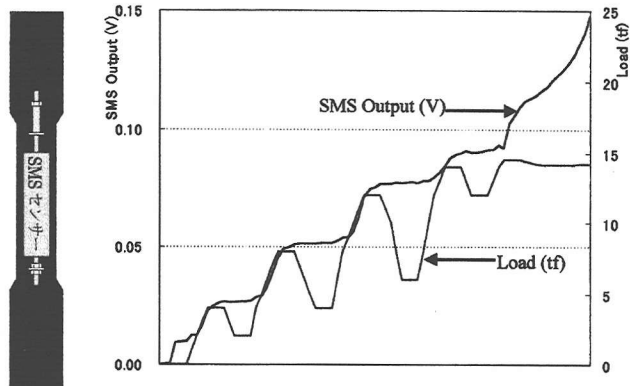


図-7 ひずみ記憶性の確認

荷重が140KNをこえたとき出力が上昇しつづけているのは、試験片が降伏応力に達して塑性ひずみ領域に入ったためである。このときの最大変位量は約2.5mmで、これはエレメントの検知部の長さの約77%に相当する。

3.2 温度特性

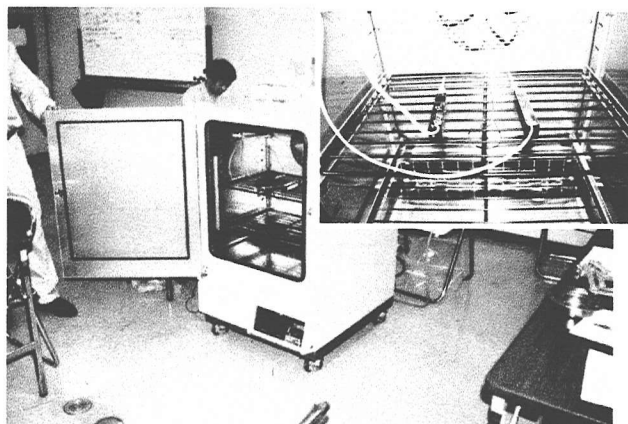


写真-2 温度特性試験

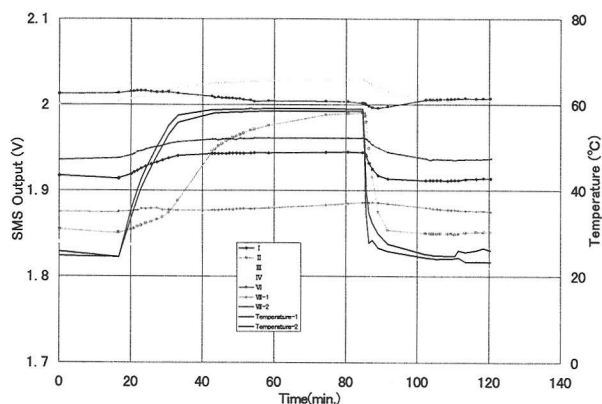


図-8 温度特性試験の結果

センサーの温度特性を調べるため、写真-2のようにセンサーを恒温槽に入れ、室温(約25°C)から約60°C付近まで温度変化を与えて、出力の変化を観察した(図-8)。出力は温度変化にシャープに反応して変化するが、7個の供試体にはかなりの差があり、温度上昇に伴って出力が減少するものもあった。このような特性はTRIP鋼のそれとは異なることから、組み込まれた電気回路に起因する変化と考えられた。その後の調査でこのことが確認されたので、現在回路設計を見直し、安定した出力を得られるよう改良をすすめている。また、-20°C付近までの温度変化に対して実用に耐えるよう、検討中である。

3.3 交番応力特性

SMSセンサーの実用性を検討するため、実物大模型のBox Column交番載荷試験に際して、既存の変位計とあわせてSMSセンサーを取り付けた(写真-3, 4)。

試験は、柱軸方向に上載荷重に相当する荷重を載荷した状態で、柱頭に水平方向の強制変位を与えるもので、静的に、脚部縁応力が許容応力の1・2・3・4倍となる変位を交番荷重として与え、破壊性状を観察した。試験結果を図-9に示す。図にみられるように、2σ程度までの変位にはSMSセンサーはよく追従しているが、それ以上の大変位には追従しきれていない。これはセンサーが測定

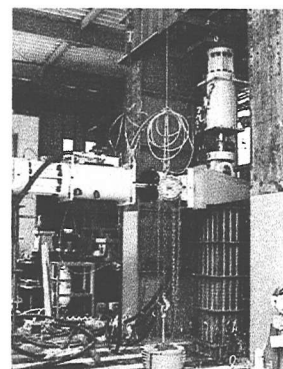
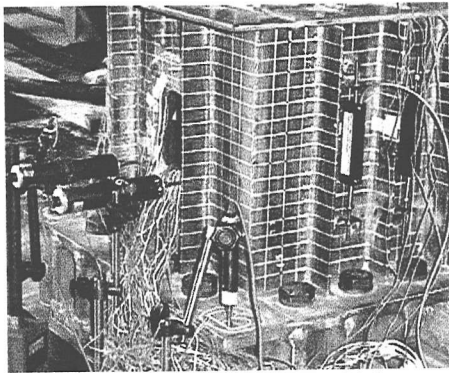


写真-3 Box Column 模型試験

母材に剛結される構造のため、大きい曲げ変形に追従できなかったためと推定される。地震時の大変形に対してどこまで追従可能なものとするかは精度との関係で検討すべき課題である。仮に10%程度のひずみに耐えるものとするためには、本実験のような曲げひずみも考慮しなければならない。図-6 (b)に示したセンサーハウジングの取り付け部をユニバーサルジョイントとしたのはこのことを考慮した結果である。



写-4 センサー取付部

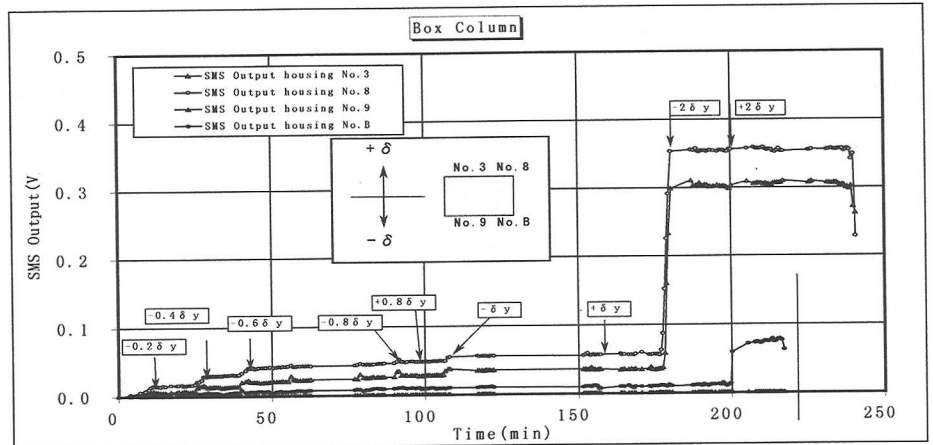


図-9 交番応力試験結果

3.4 考察

SMSセンサーについて、センサーエレメント・電気回路・センサーハウジングなどの基礎的特性について試験し、改良すべき点について設計の見直しをして現在新しいタイプのセンサーを製作中である。しかしここに紹介するセンサーは、非通電状態でも履歴中の最大ひずみを記憶する構造ではあるが、形状その他は従来の表面ひずみ計と同様のもので、TRIP鋼の磁気特性の変化というユニークな性質を最大限に活用したものとはいえない。このタイプの計測器とするのであれば、たとえばケーブルを無くして無線電送システムとするなど、測定システム全体としての特徴をもたせるべきである。またTRIP鋼の特性をより大きく引き出すためには、センサーエレメントと検出回路を分離したり、構造母材そのものをTRIP鋼でつくるなどの工夫が必要である。これらについても、現在様々な検討を試みている。

4. 米国におけるSMSセンサーの使用例

前章までに、SMSセンサーの概要を報告し、筆者らが実施した基本性能試験結果を紹介した。

SMSセンサーは日本に導入されてまだ日が浅いことから、これから実構造物の計測に応用されることが期待されているが、米国ではすでにパイロット事業として、橋梁の計測他に利用されている。

ここでは、それらのうち、SMS社がGDOT管理下の“ALLATOONA bridge”、“SR-13 bridge”、“I-285 bridge”、“ALTAMAHA bridge”で実施した4例と地震時の計測を目的としたセンサー取り付け例を報告する。

4橋のうち3橋は供用中であり、車両の大型化と交通量の増大によりキレツやひび割れが生じており、SMSセンサーは疲労損傷の追跡監視に利用されている。残りの1橋は新設橋であり、設計応力度と実応力度の比較に用いられている。

なお、ここで紹介した実施例は現在計測中であることから、計測データの紹介は割愛する。

4.1 使用機器

4橋の計測に用いられたシステムはすべて共通である。

写真-5に示すSMSセンサーは、橋梁毎に、ひずみを監視する部位に必要な数取り付けられる。

SMSセンサーは、アナログデータをデジタルデータに変換するdigital junction(写真-6参照)に接続される。計測データは、リモートシステムモニター(写真-7参照)によって、あらかじめ設定されたインターバルで取り込まれ、データやデータの増分が危険レベルに達した場合、GDOT管理事務所に警告がFAXで送られるように設定されている。また、インターバル毎の計測データは、電

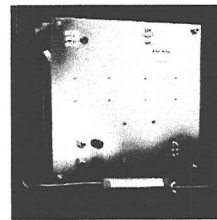
話回線を通じてSMS社に自動的に送信され分析されるとともに、ホームページに公開されている。
システムに用いられる電源は、橋梁毎に取り付けられたソーラーパネル（写真－8参照）から供給される。



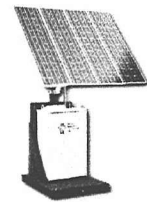
写真－5 Peak Passive Displacement Sensor



写真－6 digital junction



写真－7 Remote System Monitor



写真－8 Solar Power Supply

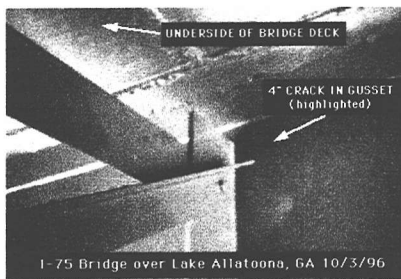
4.2 ALLATOONA bridge

本橋は18年前にルートI-75のBartow郡のAllatoona湖に架設された多径間連続鋼I桁橋（写真－9参照）であり、重荷重の通行により、橋梁全長にわたってRC床版が損傷し大きなたわみが生じている。（写真－10参照）

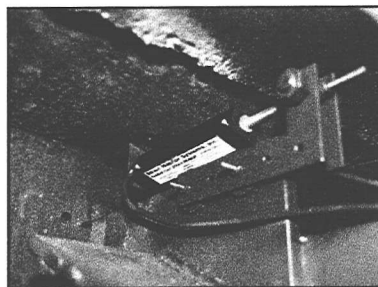
SMSセンサーは、写真－11に示す横桁位置の主桁上フランジとガセット溶接部の亀裂と、写真－12に示すRC床版と主桁上フランジのずれを監視するために取り付けられている。



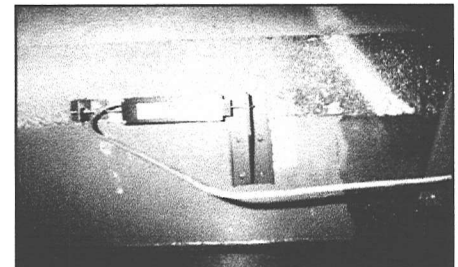
写真－9 View of I-75 southbound over Lake Allatoona



写真－10 Cracking at gusset/web interface



写真－11 SMG020 attached to gusset



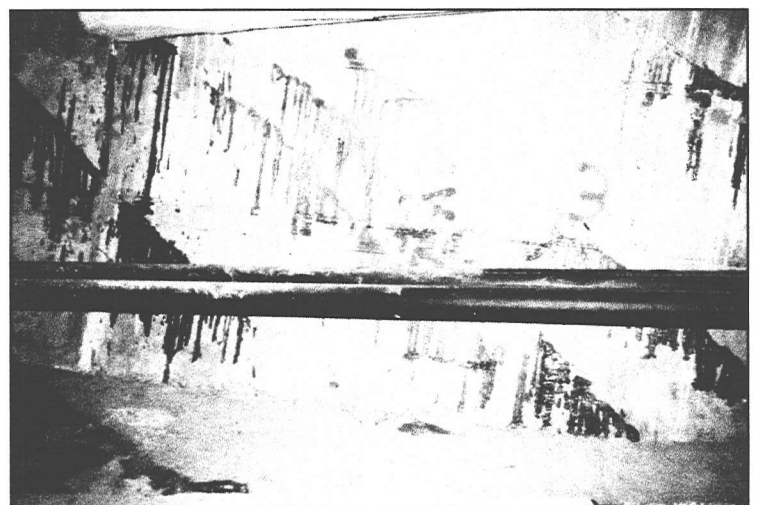
写真－12 SMG032 shear sensor

4.3 SR-13 bridge

本橋はFulton郡に位置し、ルートI-85とSR236とSR13が分岐するI-85のランプ橋である。また、本橋は架設後11年経過したコンクリート箱桁橋であり、主桁支点部にひび割れが生じており、最近、PC鋼棒で補強され、ひび割れは補修されている。（写真－13参照）

PC鋼棒は支点部近傍の下フランジに定着されており、この部分に橋軸直角方向のひび割れが走っている。

SMSセンサーは、写真－14に示すように補修後のひび割れの進展を監視するために配



写真－13 Shear cracks inside the SR-13 box beam

置されている。

本橋では一部従来型のセンサーが併用された。その一つは、計測の初期にSMSセンサーの性能検証を目的として、振動弦式センサーが取り付けられた（写真-15参照）。他のセンサーは、ゴム支承の移動量を計測するためのLVDT（作動トランス型変位計）である（写真-16参照）。

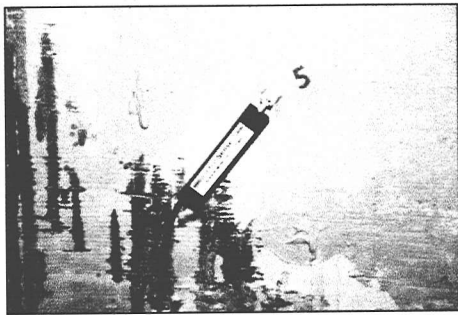


写真-14 SMG032 on sidewall, SR-13 site

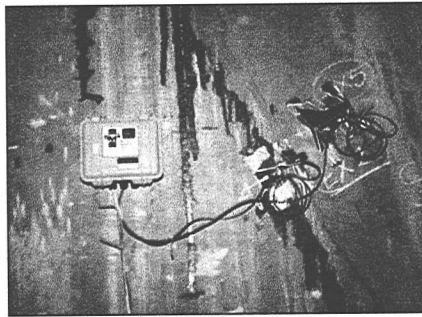


写真-15 Vibrating wires sensors during installation

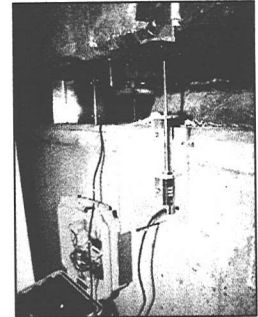


写真-16 LVDT sensors measuring bearing pad

4.4 I-285 bridge

本橋はCobb郡に位置するルートI-75からI-285に分岐するI-285のランプ橋である。本橋の形式は長支間の多径間単純ポストテンション方式箱桁橋であり、橋脚近傍にひび割れが集中している。

SMSセンサーの配置を図-10に示す。SMSセンサーは、特に主桁のひび割れが激しい橋脚番号7, 8, 9, 10近傍の主桁を監視する目的で、写真-17に示すように、ひび割れを跨ぐように取り付けられている。

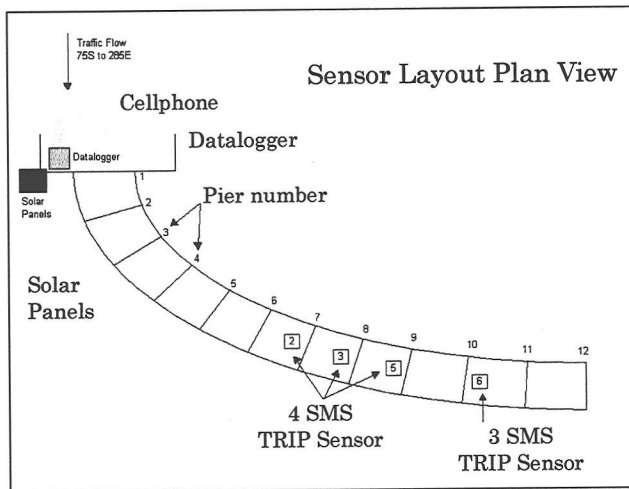


図-10 Sensor layout - I-285 - overall view

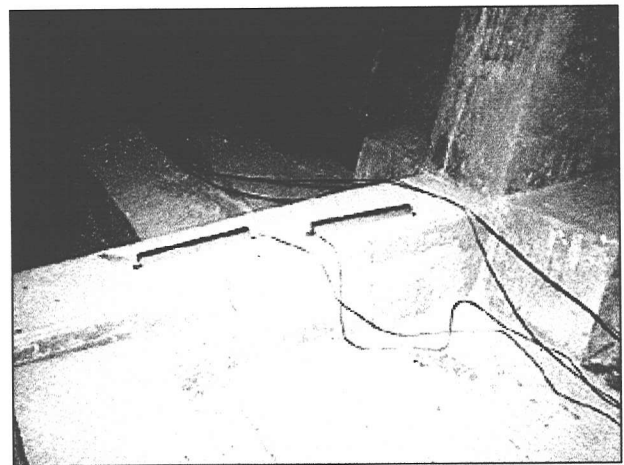


写真-17 SMG020 sensors on transverse beam, with covers

4.5 ALTAMAHA bridge

本橋は、ルートI-95上のGlyn n/McIntosh郡のAltamaha川に新設された、コンクリートT桁5主桁橋である（写真-18参照）。

GDOTはT桁橋の実応力度と設計値の関係を調査する目的で、最北側の1連の支間中央の主桁下面にSMSセンサーを取り付けた。架設現場は河口に近いことから腐食環境が悪

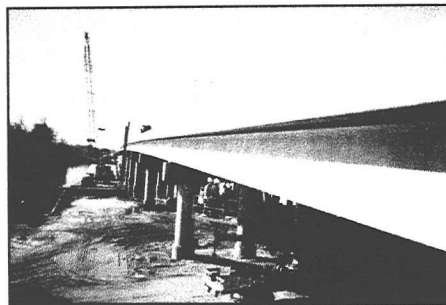


写真-18 I-95 over the Altamaha River, looking south.

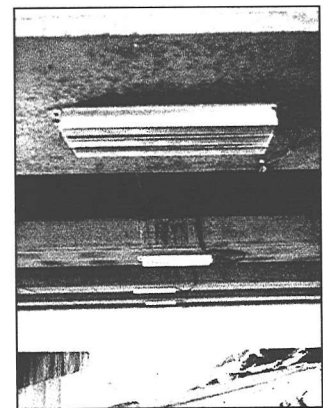


写真-19 Sensors at midspan on the underside of the bulb-T girders

く、長期間の計測を念頭にセンサーをアルミ函で保護している（写真-19参照）。

4.6 橋脚への取り付け例

写真-20に示すSMSセンサーは、地震時の上部工と下部工の相対最大回転角を計測する目的で取り付けられている。

これまでに示した実施例では、常時計測を目的として常時電源を供給し、Digital Junctionを介してRemote System Monitorにより、定期的に計測データを送信している。

一方、地震は何時発生するか予測不可能であるから、このようなシステムの採用は不経済であり、地震発生後の任意の時間に計測できるように持運び用のリードアウトボックスを用いることとしている。

このような経済的な方法は、技術者や点検員に多くのデータを供給する事が可能であり、解析値と実測値の比較により、地震によって損傷を受けた部位を特定することにつながると考えられる。

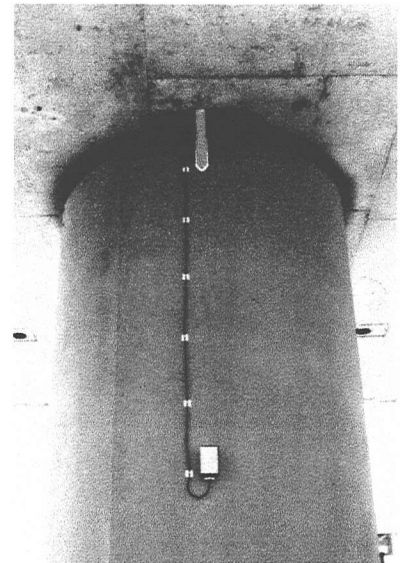


写真-20 橋脚に取り付けた例

5. 終わりに

本報告では、TRIP鋼の特性を利用した最大ひずみ記憶センサーの概要と、米国ジョージア州交通局での実施例他を報告した。

「3. SMSセンサーの基本性能試験」で示したように、回路の温度特性やセンサーハウジングの被測定物への取り付け治具に問題があることが判明したことから、ハウジングの形状を含めて筆者らが現在改良中であり、まもなく供給が可能になる予定である。

GDOTでの実施例は、損傷を受けた橋梁の追跡調査を主な目的としていることから、本シンポジウムの主旨にそぐわない面がある。しかし、地震時の構造物の挙動を対象とした場合、「橋脚への取り付け例」で示した「常時通電する必要がない」SMSセンサーを用いた計測方法は、有力な手段の一つとなると確信する。

SMSセンサーは、最大ひずみを記憶できることが最大の利点であり、同時に、それしかできないことが最大の欠点でもある。従って、計測の初期には、既存のセンサーを併用して構造物の挙動の傾向を把握し、以後は、SMSセンサーのみの計測とすることが経済的な方法であると考えられる。

参考文献

1. Thompson, L. and B. Westermo, "The Utilization of Metastable Peak-Strain-Indicating (PSI) Materials in Critical Lifeline Engineering Applications," *1992 ASME Pressure Vessel and Piping Conference*, Eds. A. C. Singhal, L. R. L. Wang and T. Ariman, PVP-Vol.27, pp.97-106, American Society of Mechanical Engineers, New Orleans, 1992.
2. Westermo, B and L. Thompson, "A New Testing and Evaluation Technology for Damage Assessment and Residual Life Estimation in Aircraft Structures," *Proceedings of the Fourteenth Aerospace Testing Seminar*, pp.5-10, Inst. of Environmental Sciences and the Aerospace Corporation, Manhattan Beach, CA, 1993.
3. Thompson, Larry and Bruce Westermo, "A New Strain Measurement Technology for Material Damage Assessment," *Proceedings 1994 N. American Smart Materials and Structures Conference*, Orlando, FL, *Smart Sensing, Proceeding, and Instrumentation Control*, Ed. by J. S. Sirkis, SPIE V.2191, pp.380-391, Feb. 1994.
4. Thompson, L. and B. Westermo, "Passive Monitoring Systems for Structural Damage Assessment," *Proceedings 1995 N. American Conf. on Smart Structures and Materials*, San Diego, CA, Mar. 1995.
5. Thompson, Larry, Bruce Westermo and Ray Waldbusser, "Smart-Materials-Based Structural Health Monitoring Systems Development for Aerospace Applications," *Proceedings 42th International Instrumentation Symposium*, Aerospace Industries and Test Measurement Division, Instrument Society of America, San Diego, CA, May 1996.
6. L. Thompson, B. Westermo, W. Law, and R. Trombi, "Development of passive, smart structural attachment fixtures," *SPIE: Smart Structures and Materials Conference*, San Diego, CA March 1997.