

インテリジェントマテリアルを利用した 基礎構造物の損傷検知手法の提案

A New Method to Detect Damage to Foundation Utilizing Intelligent Material

西岡英俊 (にしおか ひてとし)

鉄道総合技術研究所 研究員

渡辺健治 (わたなべ けんし)

鉄道総合技術研究所 研究員

齋藤正人 (さいとう まさと)

埼玉大学助手 工学部

村田修 (むらた おさむ)

鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部長

川上英二 (かわかみ ひてし)

埼玉大学教授 地圏科学研究センター

1. はじめに

変状を自己検知するとともに、さらに自ら補修を行う機能を有する材料をインテリジェントマテリアル^{1)~3)}と呼ぶが、そのような材料の開発は難しく、損傷を自己検知する機能を有する構造体をインテリジェントマテリアルとして広義にとらえることもある。

基礎構造物の維持管理において、基礎部材、特に杭体自体の損傷の有無やその状態を把握することは、それ自身が地中に存在するため、橋脚く体や桁のような気中に存在する部材と比べて格段に困難であるといえる。このような基礎部材を調査するAE法⁴⁾など各種の非破壊検査手法が、研究および開発されているが、コスト面を含めて実用化には至っていないのが実状である。特に鉄道等の線状構造物の維持管理には、全区間での検査が不可欠であり、1箇所あたりの検査コストと手間をいかに低減し、全維持管理コストを低減させるかが重要である。このような維持管理コストの低減に向けては、地中に存在する基礎構造物自体に損傷検知機能を付与させ、検査コストを低減させることが有効と考えられる。このような例として炭素繊維を用いた損傷評価手法が研究されている⁵⁾が、ここでは特に簡便な損傷評価手法として、圧電材料を利用した圧電デバイス、透水性多孔質材料を用いその透水特性の変化に着目する透水デバイスおよび損傷時に内封管が割れて電氣的に短絡する通電カプセルについて基礎的研究を行っている事例を紹介する。

2. 圧電デバイス

圧電材料とは、物体に変形を与えると電気分極を生じひずみに比例した電圧が発生する性質と、逆に物体に電圧を与えると電気分極を生じ電圧に比例した変形が発生する性質を有する材料の総称である。

本研究では基礎部材にこの圧電材料を埋め込み、部材の損傷に伴い材料自らが発生する電圧によって、その損傷程度を評価する損傷自己検知型デバイスの開発を行っている。以下に、これまでに開発したデバイスの特徴を

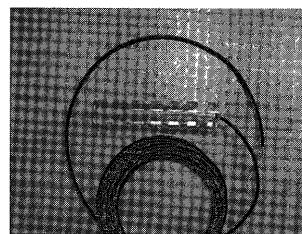


写真1 圧電材料を用いた損傷検知型デバイス

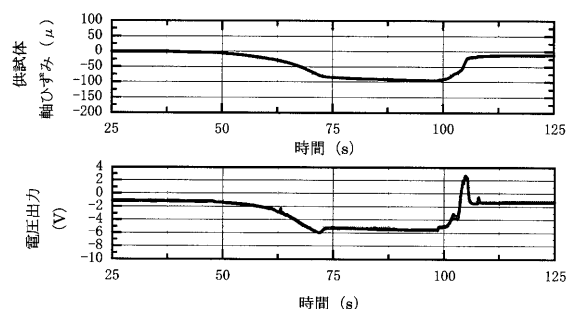


図1 コンクリート供試体の軸ひずみと発生電圧の関係

概説する。圧電材料には施工性の高い高分子圧電材料を使用した。この圧電材料は通常フィルム状に加工されている。これを幅5(mm)×長さ90(mm)×厚さ40(μm)に成形し、その両極に導電性ケーブルを取り付けた後、ポリメチルメタクリレート (PMMA) でカプセル化した (写真1)。カプセル化した理由は、コンクリート材料の強アルカリに対する圧電材料への保護効果に加えて、圧電材料の変形モードを固定し、微小クラック等の局所的な変形に伴う電圧の過剰応答を抑制させることにより、発生電圧と損傷程度に良好な相関性を持たせるためである。本研究では、部材の損傷と本デバイスの発生電圧値との相関性を確認するため、デバイスをコンクリート供試体 (φ100×200 mm) に埋め込み、一軸圧縮試験を実施した。ここで導電性ケーブルの他端は、供試体外部に設置した電圧計に接続した。

図1に、本実験から得られたコンクリート供試体の軸ひずみと本デバイスの発生電圧の関係を示す。コンク

論 文

リート供試体の軸ひすみの増加に伴い、テハイスからの発生電圧も同様に増加する。また、100秒以降、供試体の軸ひすみは減少するが、テハイスからの発生電圧も同様に減少することがわかる。したがって本実験により、コンクリートの損傷程度と圧電材料からの発生電圧には、良好な相関性があることが確認できた。

現在、圧電テハイスによる定量的な損傷レベルの把握を目標に、上述した実験成果を踏まえて、発生電圧と構造部材の損傷程度に関する詳細な検討を実施している。特に、曲げ破壊やせん断破壊が生じる場合のテハイスと構造部材の相互作用については、未解明な点も幾多もあり、有限要素法等の解析的なアプローチを含めて検討を進めている。また、経済的、効率的な観測体制を構築するため、発生電圧のピークホルト装置の開発や、中央集約型システムの将来構想についても検討中である。

3. 透水デバイス

提案する透水デバイスを利用した損傷検知システムの概略を図-2に示す。図中の杭体内部には、透水デバイスが埋設されており、導水管を通じて地上部に設置された点検用ボックスに連結されている。点検用ボックスには、複数の導水管端部が並んでおり、それぞれに目盛り付きのタンクが接続され、コックで開閉できるようになっている。点検作業方法は、検査員の巡回時に各導水管端部のタンクに所定量の検査用液体(最も簡単な例は河川水)を満し、コックを開き、一定時間(数分~数時間)後の液体の減少量、すなわち透水デバイスから杭体外部への透水量を記録する。杭体が損傷を受けた際に透水デバイス周辺のコンクリートにクラックが生じて周辺の透水性が変化するため、計測される透水量の変動から透水デバイス周辺の損傷を推測できるというのが、本損傷検知システムの原理である。なお、上記は最も簡易的な検査システムの例を述べたものであり、例えば常時液量をモニタリングすることで損傷の常時モニタリングや、複数の透水デバイスを埋設することで、損傷位置や損傷程度の推定を行うことも可能である。

本システムの原理は、透水量と杭体の損傷程度に相関があることを利用している。ここでは、その相関関係を実証するため実施した梁供試体の載荷実験結果を示す。供試体は100×100×400 mmの鋼製型枠中に、D13鉄筋一本と直径10 mm、長さ100 mmの円柱型透水デバイス(ポーラスストーン)と導水管(シリコンチューブ、外径10 mm)を配置し、コンクリートを打設して作製した。載荷は、三点曲げ載荷の多段階載荷とし、各載荷サイクルが終了することに、透水量を計測した。透水量は、導水管に接続した目盛り付きパイプに供試体底面から高さ990 mmの位置まで水を入れておき、5分間のパイプ内の水の減少量とした。図-3に載荷荷重と変位の関係、および各載荷サイクル後の透水量と各サイクルの最大変位の関係を示す。降伏荷重以前では透水量はほぼ0であるのに対して、降伏荷重以降に透水量が増大し、一定値に収束している挙動が確認できる。すなわち、透水量

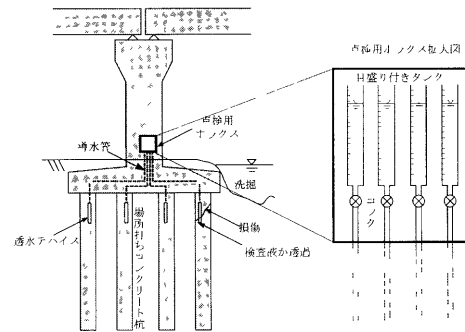


図-2 透水デバイスによる損傷検知システムの概要

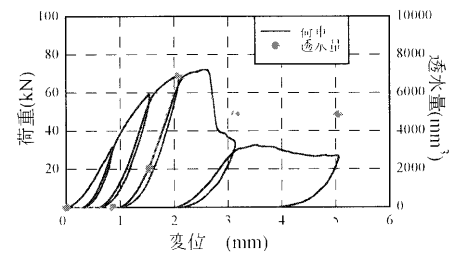


図-3 荷重および透水量と変位の関係

と損傷程度の間に関係性があり、本システムによる損傷検知の可能性が確認できた。

本システムのメリットとしては、①従来の巡回レベルの検査では検査出来なかった基礎部材自体の損傷を検査できる、②電気的な計測装置が不要のため、悪天候時や電源が確保できない状況での検査が可能、③透水デバイス自体を含め、計測システムの構築や毎回の検査コストが低減できる、等が挙げられる。透水量は、載荷条件、杭の損傷形態、地下水位などの影響を受けるため、透水量から杭の損傷程度を定量的に評価することは難しいものの、上記実験から定性的な評価は可能であることが確認できた。本システムは上記の①~③で述べたように、詳細調査と言うよりは簡易的な一次判定として用いるのであれば、十分な効果が期待できる検査手法であると言える。

4. 通電カプセル

図-4に通電カプセルの概要図を示す。カプセルは二重管構造となっており、内管はガラス管、外管はABS樹脂で作製されている。内管内には、電解質溶液が充填されており、内管と外管の間には電極(銅線)が二本、交わることなく、らせん状に巻きつけてある。このカプセルは通常の状態であれば通電性を示さないが、外管に圧縮応力や曲げ応力が加わることにより変形すると、それに伴い内管が破損し、電解質溶液が外管内に充填されることによって、二本の電極間が短絡する。図-5に示したように、この通電カプセルをあらかじめ基礎部材中に埋設しておけば、例えば大地震が作用した後に外部電源(乾電池でも可)とテスターを用いてカプセルの通電性の有無をチェックすれば、地上から地中の基礎部材の損傷状態を検知できる。

このカプセルの有効性を確認するために、通電カプセ

ルを埋設した梁供試体 (100×100×400 mm) を载荷する実験を行った。载荷は三点曲げ载荷の単調载荷とし、カプセル内の電解質溶液としては NaCl 溶液を用いた。また、载荷時には乾電池によりカプセルに常時 1.5 V の直流電圧を与え、電圧計により回路内の電圧を測定した。図-6 に载荷荷重、载荷点変位、供試体下面に貼り付けた P1 ゲージ出力、計測電圧の変動量の時刻歴データを示す。図-6 より、供試体下面にクラックが発生した瞬間 (250 s 付近) に電圧計の出力値が上昇することから、通電カプセルがコンクリート供試体の破壊に伴い変形し、通電性を示した (電気抵抗が低下した) ことが分かる。その後、電圧は増減するが、供試体が終局状態に至った時点 (900 s 以降) でカプセルはほぼ完全に通電する。载荷途中でいったん増加した電圧が減少したのは、カプセル内の銅線の一部が破断したためであると推測される。本実験より通電カプセルの通電性の有無によって、コンクリート部材の損傷の有無を検知できることがわかった。

通電カプセルは、構造上、損傷の有無のみ検知可能で損傷レベルを定量的には検知できない。しかしながらカプセルの構造が簡便であり、かつ乾電池とテスターのみで損傷検知が可能であるなど、その簡便性が大きな利点として挙げられる。さらにカプセルを構成している材料は、外管としては靱性および耐アルカリ性のあるプラスチック、内管としては変形により容易に破損しやすいガラス管などを用いているため、非常に安価であり、十分な長期耐久性を有している。今後はより大型の供試体を用いた破壊実験を行い、カプセルの最適な構造 (寸法) や設置位置などを検討する予定である。

5. おわりに

本研究では、インテリジェントマテリアルの基礎構造物への適用に向けて、三種類の手法を提案し、基礎的な検討を行った結果について紹介した。各手法とも従来は大がかりな検査が必要であった基礎構造物の健全性を大まかながらも簡便に評価できる手法であり、特に被災直後の被害構造物の抽出や供用再開判断の迅速化に非常に有用であると考えている。今後は、実用化に向けた実証試験を行っていく予定である。また提案した三手法は新設時を想定した手法であり、既設構造物への適用には、設置方法、評価基準などが課題であり、今後検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 柳田博明 インテリジェントマテリアルの現状—ケンマテリアル=コンクリート系構造物への適用を中心として—, コンクリート工学, Vol 35, No 6, pp 3~7, 1997
- 2) 三橋博三 金子佳生 西脇智哉 大塚浩司 強度の自己修復機能を有するインテリジェントコンクリートの開発に関する基礎的研究, コンクリート工学論文集, Vol 11, No 2, pp 21~28, 2000
- 3) Dry, C M Building materials that self repair, *Architectural Science Review*, Vol 40, pp 49~52, 1997
- 4) 羅 休 羽矢 伴 稲葉智明 中西康博 塩谷智基 AE 法による鉄道橋梁下部工の損傷調査法に関する実験的検証, 鉄道総研報告, Vol 7, No 3, pp 29~34, 2000
- 5) 石井 清 稲田 裕 杉村義広 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), 日本建築学会構造系論文集, No 557, pp 129~136, 2002

(原稿受理 2003 5 26)

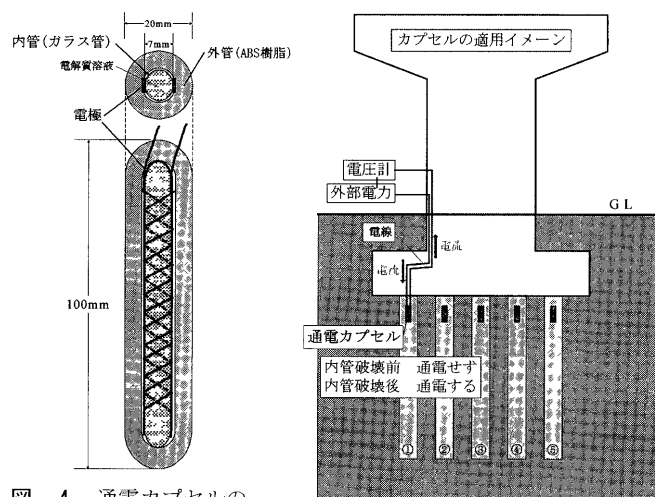


図-4 通電カプセルの概要図

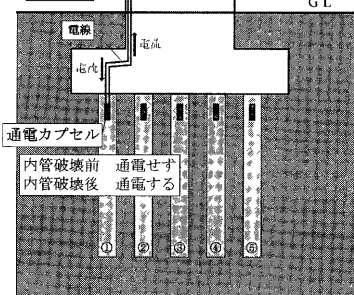


図-5 通電カプセルの適用イメージ図

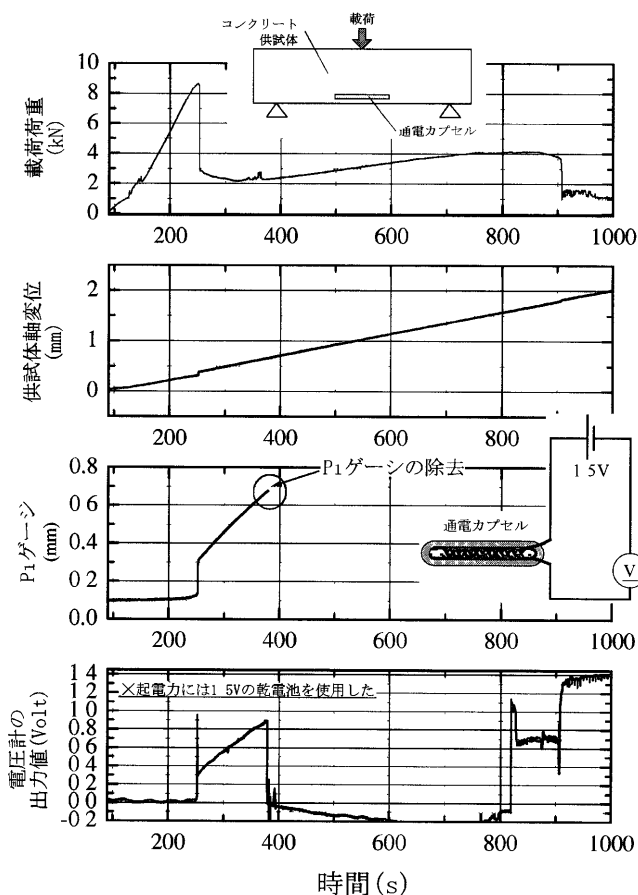


図-6 各測定データの時刻歴