

地中埋設パイプラインの他工事損傷防止システムの開発

白石 理人 岡田 敬一 柴 慶治 渡辺 弘之
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所)

Damage Prevention System of Underground Pipeline from Third Party Constructor

by Michihito Shiraishi, Keiichi Okada, Keiji Shiba and Hiroyuki Watanabe

Abstract

A monitoring system that is recently drawing attention was applied to the field of construction and engineering. This is a concept that unifies individual technology such as sensing, data transmission, data processing and judgment into a total system. Based on this concept, the authors have developed a third party damage prevention system. The purpose of this system is to prevent pipeline damage by the third party construction activities that are sometimes carried out without prior consultation with the pipeline administrator. The system detects the vibrations generated by the approaching construction excavators, determines their locations and transmits an alarm. A prototype system was installed in an actual pipeline. Through a series of verification tests, the effectiveness of the system was confirmed.

概要

センシング、データ伝送、データ処理・評価・判断の各要素技術をシステムとして統合したモニタリングシステムの建設・エンジニアリング分野への展開が近年急速に進められている。筆者らは、このコンセプトに基づいたパイプライン他工事損傷防止システムを開発した。これは管理者への事前照会なしに行われる掘削工事によるパイプライン損傷を未然に防止することを目的に、パイプラインに隣接して線上に埋設したセンサ群で地盤振動を常時計測・監視し、建設機械による振動を自動的に検知して接近状況を把握、管理者に通報するシステムである。試作システムを実際のパイプラインに設置して、約1年間にわたる実証試験を実施した結果、その有効性が確認された。

§ 1. はじめに

光ファイバセンサに代表される次世代センサが実用段階に入りつつあり、情報技術の発展により膨大なデータの伝送・処理が可能になった現在、大量のセンサをネットワークにつなぐことで新たなサービス・価値を創出する試みが各分野で盛んに行われている。建設・エンジニアリング分野におけるモニタリングもそのうちのひとつで、センシング、データ伝送、データ処理・評価・判断の各要素技術をシステムとして統合し各種構造物に組み込むことにより高機能化を図るものである。

筆者らは、このコンセプトに基づいたパイプライン他工事損傷防止システムの開発を進め、試作システムによる実験等を通じてその実現可能性を確認してきた。本稿ではまず他工事損傷防止システムの概要を述べ、次に開発した試作システムで得られた建設機械振動と常時振動の特性の評価結果について述べる。さらに、その結果をベースとして開発した他工事建設機械接近

検知のためのデータ処理手法について詳細に述べ、最後に動作検証試験とシミュレーションにより実証した本システムの有効性を示す。

§ 2. パイプライン他工事損傷防止システム

日本の都市部とその周辺部では日常的に各種建設機械が掘削工事を行っている。パイプライン等の地中埋設物はこのような機械の接近・接触による影響を受けることが懸念されており、なかでも下水管などの敷設に用いられる小口径推進機による工事は小規模かつ件数が多いため、パイプライン管理者に照会することなしに施工される例が多数存在し、特に懸念されている。とりわけ輸送パイプラインが建設工事により損傷を受けた場合には、広範囲に及んで供給に支障をきたす可能性が高い。このため、未照会工事によるパイプライン損傷を未然に防止するため、一般にパイプライン管理者はパトロール等により未照会工事の発見に努めて

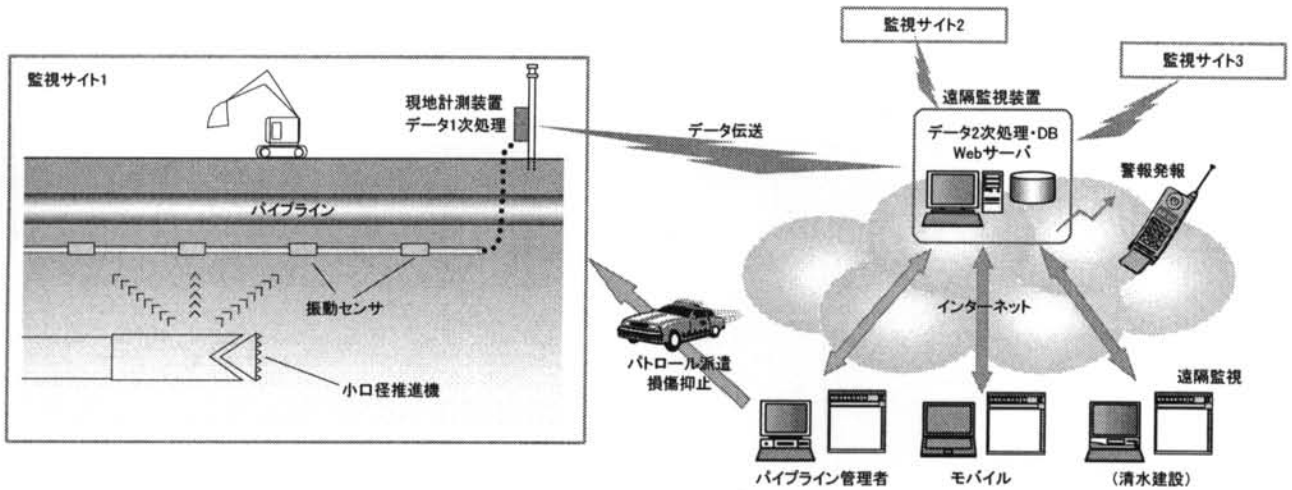


図-1 パイプライン他工事損傷防止システムの概念

いるが、輸送パイプライン延長の長距離化に伴い自動化による省力化・高度化が求められている。

そこで、筆者らは建設機械が掘削時に発生する振動を検出することにより他工事建設機械の接近を事前に検知し、管理者に通報するパイプライン他工事損傷防止システムを開発し、その実用化に向けた検討を行ってきた。このシステムは、パイプラインに隣接して線上に埋設したセンサ群で地盤振動を常時計測・監視し、他工事による振動を検知、建設機械のパイプラインへの接近状況を把握し、危険と判断された場合にパイプライン管理者に自動通報するものである。システムの概念を図-1に示す。システムは多数の振動センサと計測装置からなる複数の現地計測装置と、データ処理・警報発報を行うネットワーク上の遠隔監視装置から構成されており、他工事接近時には直ちにパイプライン管理者に対し警報発報を行うとともに、接近状況表示をリアルタイムで行うことにより状況判断材料を提供するものである。

§ 3. 試作システムの設置と試験工事

本システムの実現可能性を確認するため試作システムを設置し、実際の建設機械を使用した試験工事を実施した。試作システムと試験工事の概要を図-2に示す。試作システムでは建設機械振動と共に交通振動等の常時振動も計測し、その特性を評価した。

3.1 試作システムの構成

本システムの基礎検討として、比較的静穏な実験フィールドで振動試験を実施してシステムの実現可能性を確認し、データ処理手法を検討してきた¹⁾。またセンサシステム、データ伝送システム等の各要素技術も

開発してきた。そこで、それらを統合した試作システムを構築し、実際の設置状況と同様の環境下に設置して各種試験を実施した。システムは交通量が比較的多い片側1車線の幹線道路に面した敷地内と道路下に埋設されたパイプラインに沿って設置した。

システムに用いたセンサはDC~250Hzで平坦な周波数特性を有する感度方向が上下方向のサーボ型加速度計であり、計測した信号はカットオフ周波数100Hzのローパスフィルタを通過後、サンプリング周波数200HzでA/D変換しPCのハードディスクに記録した。センサはパイプラインの付帯施設として埋設される径50mmのPE(ポリエチレン)管内に5m間隔で挿入・固定し、道路に隣接した敷地内の地表面下1.9mに3点、約10mにわたって設置した(Array A)。さらに、交通振動を計測する目的で道路下1.4mにも11点、約50mにわたって設置した(Array B)。

計測したデータは現地計測装置で1次処理した後、電話回線経由でインターネット上の遠隔監視装置に伝送し、遠隔監視装置における2次処理の結果、他工事接近と評価された場合は携帯電話へのE-mailによる警報発報と、接近状況のWeb表示を行う。これら一連の機能を自動化し試作システムに実装した。

3.2 試験工事の概要

試作システムに対する建設機械接近を模擬した試験工事を実施した。使用した建設機械はパイプラインへの影響が懸念されている小口径推進機(SH推進機、径400mm)であり、平成11年度までの国内施工実績が延べ15,710mと数多く採用されている代表的な推進工法である。この工法は鋼製鞘管(二重ケーシング)・ボーリング方式の推進工法で、非回転の推進管内部にケーシングロッドを組み込み、そのロッドを回転させつつ推進する方式である。機構上、掘削中の回転による周

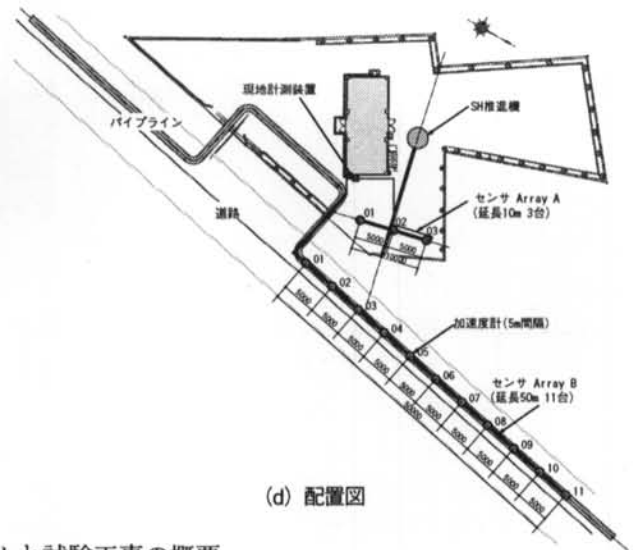
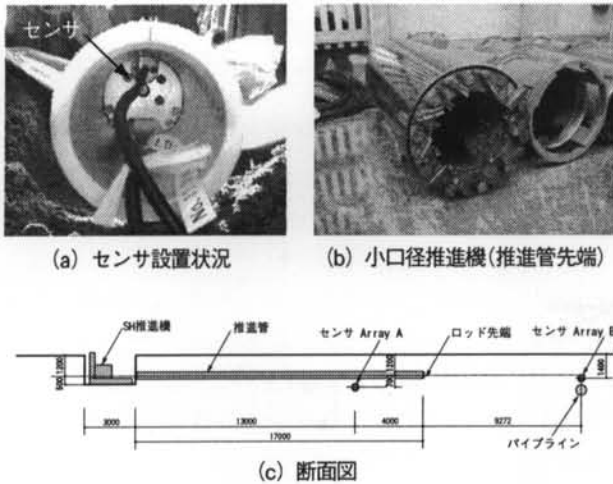


図-2 試作システムと試験工事の概要

辺地盤との接触はロッド先端のみであるため発生する振動は小さく、比較的振動を検出するのが困難な工法である。推進機本体はセンサ Array Aの手前13mに設置し、地表面下1.2mを水平方向に17m推進した。したがって、途中でセンサ Array A-02に1m以内まで接近することになる。なお、推進管1本の長さは1mであり、推進に10分程度を要した。ただし、管の接続作業に1時間程度を要するため平均して掘削速度は毎時1m程度である。またケーシングロッドの回転数は毎分10~20回程度であった。

3.3 建設機械振動と常時振動の特性

1) 計測波形

試験工事時の建設機械振動に加え、交通振動等の外部環境の影響を検討するため約1年間にわたり定期的な常時振動データの取得を行った。データは1日4回1分間の定時振動波形と、1日72回20分ごとの振動レベル統計値を取得した。センサ Array B-01における常時振動と、センサ Array A-02における建設機械稼働時の波形を図-3に示す。図-3のうち(a)の波形は交通量が少ない深夜0時の常時振動波形データであり、(b)は車両通過により大きな振幅変化が見られる昼の12時のデータである。(c)は建設機械(推進管先端)5m接近時のデータであるが、波形から建設機械の接近を判別することは困難である。それに対し(d)は建設機械1.5m接近時のデータであり稼働開始が明確に判別可能である。

2) 周波数特性の分析

建設機械と交通振動等の雑音の周波数特性を把握するため、得られたデータのパワースペクトルを比較した。スペクトルは60秒間の波形に対し、2048個のデータを3/4オーバーラップさせて取り出しFFTで得られた

スペクトルを算術平均して求めた。センサ Array B-01における常時振動とセンサ Array A-02における建設機械稼働時振動のパワースペクトルを図-4に示す。この図より交通振動が多い常時振動と建設機械稼働時振動(交通振動成分も含む)のスペクトルは20Hz付近が卓越しており、交通振動はこの周波数に主成分を持つと考えられる。一方、建設機械稼働時振動のスペクトル

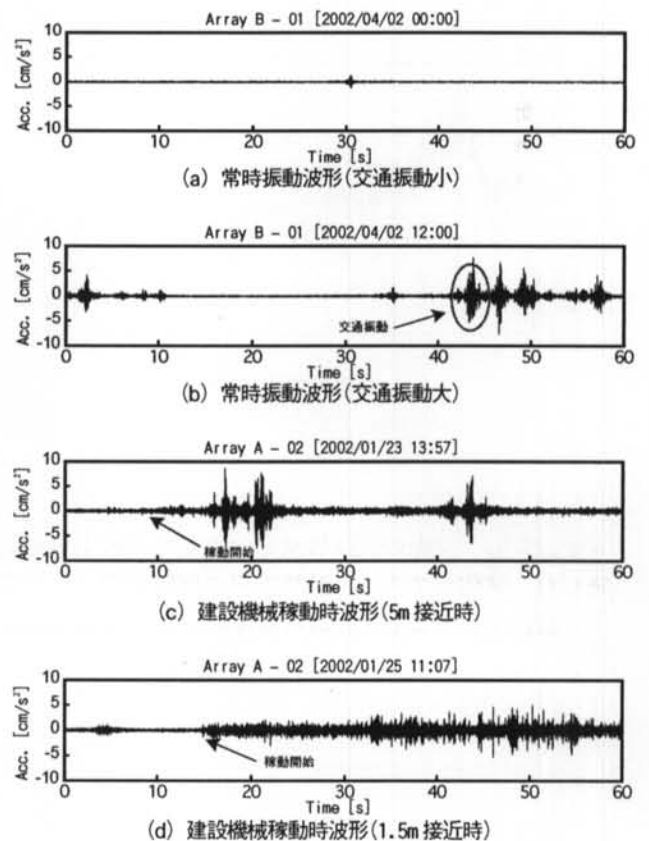


図-3 計測波形の例

ルは常時振動がパワーを持たない 100Hz 付近まで平坦な特性を持ち、その成分は建設機械が接近するほど増大していることから、建設機械稼動時振動はこの周波数成分を持つと考えられる。他の型式の建設機械による試験でも同様の傾向が見られることから¹⁾、この成分を利用した建設機械振動の検出が有効であると考えられる。

3) 振動のレベル分析

交通振動等の雑音下において建設機械振動を分離評価するために、機械の接近に伴う振動のレベルの変化と交通振動の関係を分析した。交通振動の影響を低減するためパワースペクトルの 70~100Hz の面積の平方根を振動のレベルを示す指標 lv として評価した。図-5 に建設機械稼動時の敷地内センサ Array A-02 における lv と、道路下センサ Array B-01~11 において定期的に計測された常時振動 587 データに対して計算した lv を計測時刻ごとに平均したものを示す。このグラフから常時振動のレベルは時刻によって変化するものの、建設機械が 8m 程度まで接近した場合の lv は、常時振動の lv を上回ることが確認された。また、建設機械稼動時の lv は、地盤を伝播する振動が無限媒体を伝播する実体波の理論的減衰と同じく振動源距離に反比例して減衰すると仮定した場合の回帰曲線に良くフィットすることが確認された。

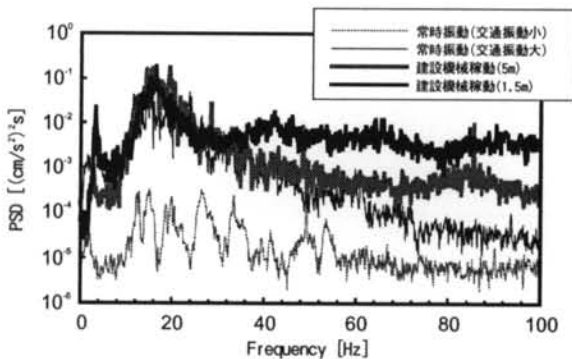


図-4 計測波形のパワースペクトル

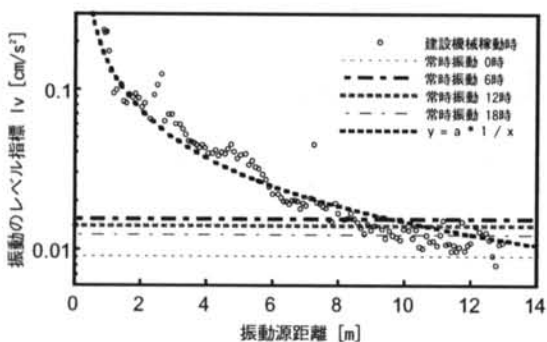


図-5 計測波形のレベル lv (70~100Hz)

§ 4. データ処理手法

試作システムで得られた建設機械振動と交通振動等の常時振動データ、そしてそれらの特性の評価結果を用いて、他工事建設機械接近検知のための信頼性の高いデータ処理手法の検討を行った。

4.1 データ処理の考え方

日本においてパイプラインは道路下に埋設されることが多い。そのため、本システムのデータ処理部には日常的に観測される車両通行等による振動の中から、非常に低い確率で起こる未照会工事による建設機械振動を、高い信頼性を持って検出することが求められる。本システムでは、建設機械接近が検知できればパトロール要員が現場に急行し、損傷抑止を図ることが前提であるため、他工事有無の判定結果が 1 次的な情報となり、他工事の位置、種類、移動速度等の推定結果は付随的な情報である。

他工事有無判定時のエラーとしては、以下の 2 種類が考えられる。

1. 他工事が存在しないのに存在すると判断し、警報を発報するエラー (False-Positive)
2. 他工事が存在するのに存在しないと判断し、警報を発報しないエラー (False-Negative)

一般に 1 のエラー (False-Positive) は検知感度が高いシステムに起こりやすく、2 のエラー (False-Negative) は検知感度が低いシステムに起こりやすい。これらは相反する関係にあり、この 2 つのエラーの発生確率が共に低いシステムが信頼性の高いシステムとなる。このようなシステムを実現するためには、システムの学習や多段の検知システムの採用が有効である。本システムでは信頼性の向上を図るため、常時振動データを定期的に取得しシステムのトリガレベルの設定に利用するものとした。また監視サイトとネットワーク上の 2 段階でデータ処理・警報発報の判断を行うものとした。

4.2 データ処理の流れ

4.1 節に示した考え方を採り入れた他工事建設機械接近検知のためのデータ処理手法を開発した。データ処理の流れを図-6 に示す。現地計測装置は振動データの 1 次処理を行う。現地計測装置は通常、常時監視モードで作動しセンサ信号を処理して得られる振動のレベル変動を監視する。また、常時データの収録も定期的に行い、結果は定時データ伝送される。振動のレベルが予め設定されたトリガレベルを超過すると (1 次検知)、緊急計測モードに切り替わり、振動データを一定時間計測して遠隔監視装置に伝送する。

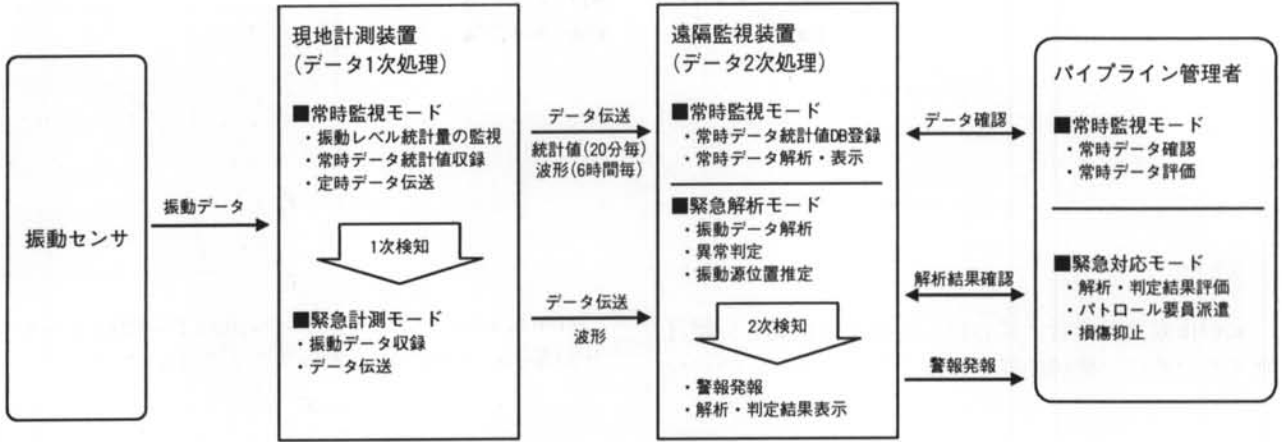


図-6 データ処理の流れ

遠隔監視装置は、送られてきたデータを2次処理し警報発報、解析結果表示を行う機能を持つ。遠隔監視装置も通常は、常時監視モードで作動し、定時伝送されたデータは装置内のデータベースに登録され、任意に検索・参照することが可能である。現地計測装置が緊急計測モードに入りデータが伝送されてきた場合、遠隔監視装置も緊急解析モードに切り替わり、送られてきた振動データを即時解析し他工事接近の有無の判定を行う。また、同時に振動源位置の推定も行う。他工事接近と判定された場合(2次検知)、警報をパイプライン管理者に送信し、解析結果を表示する。なお、管理者は通常、常時データを確認することによりシステム周辺状況の把握が可能である。

中の“min 15”は過去15個(15秒間)の“1秒RMS値”の最小値である。また、比較のために単純に過去15秒間のRMS値(70~100Hzバンドパスフィルタ処理後)を“mean 15”として示した。(a)では波形からは建設機械の稼動開始が判別できないのにも関わらず、“mean 15”、“min 15”では稼動開始後の変動が明確に現れており、バンドパスフィルタ処理の有効性が示された。(b)では車両が2秒間隔程度で連続的に通過しており、その影響で“mean 15”には大きく変動が現れているが、“min 15”の場合はほとんど影響が見られない。この結果から“min 15”の変動を監視することによって、交通振動等の影響を受けずに建設機械振動を高い信頼性を持って検出できることがわかる。

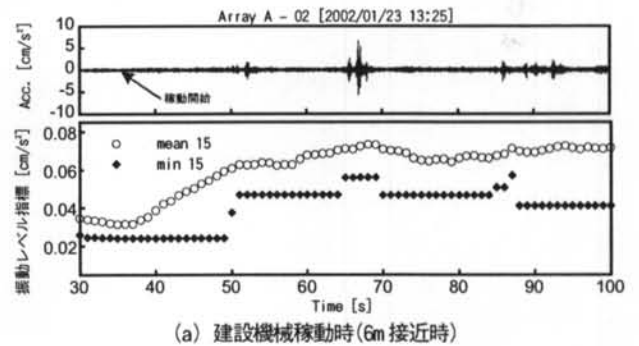
4.3 1次処理

1) 振動のレベル評価による建設機械の接近検知

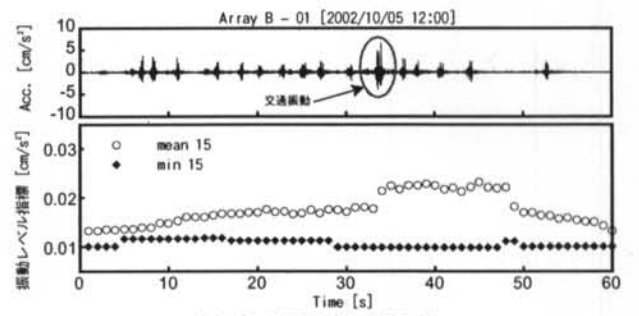
現地計測装置におけるデータ1次処理として振動のレベルの変動を監視することによる建設機械の接近検知を行った。3.3節で述べたように、常時振動は低振動数に卓越成分を持つものに対し、建設機械振動は比較的高振動数までパワーを持つ。さらに、車両通行による振幅の増大は1秒程度で収束するのに対し、対象とする建設機械によるものは数十秒以上継続する。この2つの特性を利用して、交通振動等の雑音下でも精度の高い建設機械振動の検出が可能で、以下の処理を行うこととした。まず計測波形に対し通過帯域70~100Hzのバンドパスフィルタ処理をした後、1秒ごとにRMS値を求め、過去n個を保持しておく。そして、そのn個の“1秒間RMS値”の最小値を評価し、その値の変動から他工事接近の1次検知を行うものとした。

2) 適用結果

上記の手法の建設機械稼動振動(センサ Array A-02、建設機械6m接近時)と常時振動(センサ Array B-01、車両通行が多い例)に対する適用例を図-7に示す。図



(a) 建設機械稼動時(6m接近時)



(b) 常時振動(車両通行時)

図-7 データ1次処理手法の適用例

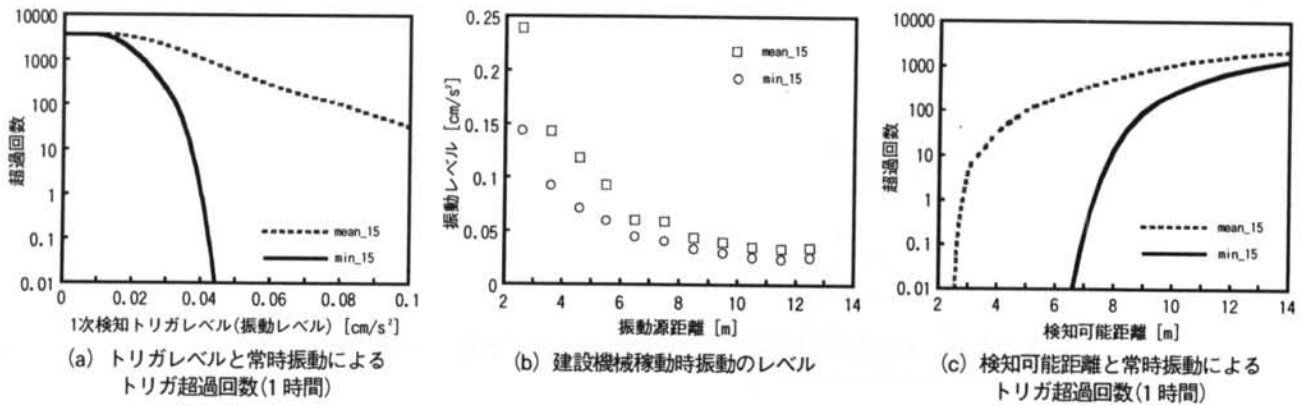


図-8 他工事検知可能距離と常時振動による誤作動確率

次に、振動のレベルの変動に及ぼす交通振動等の影響を評価し、システム設置環境下における最適な1次検知トリガレベルを求めた。まず、道路下センサ Array B-01~11で定時観測された60秒間の常時振動587データに対して“mean 15”および“min 15”を計算し、その確率密度関数を推定した上で1次検知トリガレベルに対するこれらの値の1時間あたり超過回数期待値を推定した。この関係を図-8のうち(a)に示す。“min 15”の場合トリガレベルを約0.04cm/s²以上に設定することによって超過回数期待値が急速に減少し、1時間あたり1回を下回ることがわかる。1時間に数回程度の常時振動によるトリガ超過は、続く2次処理で十分に対応可能であるため、試作システム設置環境下では“min 15”に対し0.04cm/s²程度が適切なトリガレベルと判断される。

次にこのトリガレベルで建設機械接近が検知可能なことを確認するため、試験工事時のデータを用いて同様に“mean 15”および“min 15”を計算した。結果を(b)に示す。建設機械が6~8m程度まで接近すると“min 15”の値は0.04cm/s²を超え検知可能となることがわかる。さらに(a)のトリガレベルと(b)の振動のレベルを媒介変数として消去し、検知可能距離と常時振動による1時間あたりトリガ超過回数の関係にまとめたものを(c)に示す。この結果から“min 15”は単純に過去15秒間のRMS値を求めた“mean 15”に比較して、常時振動によるトリガ超過回数が少なく、信頼性の高い他工事検知が可能となることがわかる。

4.4 2次処理

1) 振動源位置推定と建設機械の接近検知

遠隔監視装置におけるデータ2次処理として複数のセンサ情報を用いた振動源位置の推定と、それを利用した建設機械の接近検知を行った。図-9のように振動源Eで発生した振動が、センサA、Bでそれぞれ振幅 lv_a 、 lv_b で観測されたとする。EB間の距離を1とするとEA間の距離 r は次式のように表される。

$$r = \frac{\sqrt{(x-a_x)^2 + (y-a_y)^2}}{\sqrt{(x-b_x)^2 + (y-b_y)^2}}$$

この式を x 、 y について整理すると、次の円方程式が導かれる。

$$\left(x - \frac{a_x - r^2 b_x}{1 - r^2}\right)^2 + \left(y - \frac{a_y - r^2 b_y}{1 - r^2}\right)^2 = \left(\frac{r}{1 - r^2} \sqrt{(a_x - b_x)^2 + (a_y - b_y)^2}\right)^2$$

地盤を伝播する振動が無限媒体を伝播する実体波の理論的減衰と同じく振動源距離に反比例して減衰すると仮定した場合 $r = lv_b / lv_a$ であるため、この関係を上の円方程式に代入すると、振動源はセンサA、Bの座標と観測された振幅 lv_a 、 lv_b を使って表現される円E上に位置することになる。同様にセンサB、Cの組み合わせからも振動源が位置する円を求めることができるため、これら2円の交点座標が振動源の推定位置となる。ただし、2円が交点を持たない場合など推定不可能な場合も存在する。実際の処理は60秒間の波形を3/4オーバーラップさせながら2048個のデータからなるフレームに分割し、フレームごとに3.3節に示した手法で算出した振動のレベル指標 lv を振幅と見なし、振動源位置の推定をした上で、推定が可能であったフレームの推定座標の平均を推定振動源座標としている。

フレームごとに推定される振動源座標のばらつきは一定の位置に振動源が存在した場合(建設機械接近時)に小さく、移動する振動源の場合(交通振動等)に大きくなることが予想される。そこで60秒間の波形に対し

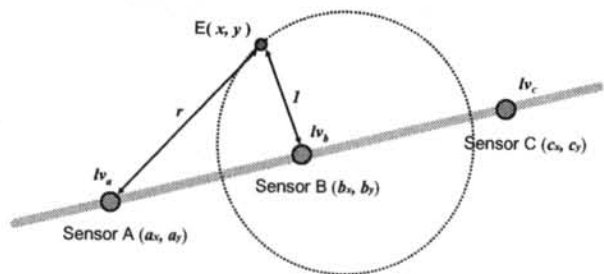


図-9 振幅情報を用いた振動源位置推定手法

フレームごとに推定される座標の標準偏差を求めて他工事接近の2次検知の指標とし、その値が閾値より小さい場合に他工事接近の2次検知を行うものとした。

2) 適用結果

建設機械稼働時の敷地内センサ Array A-01~03 に対しこの手法を適用した。センサ Array A と建設機械(推進管先端)の実距離に対する推定距離、推定誤差の関係を図-10 に示す。図から建設機械が8m程度まで接近すると位置推定が可能となり、それ以降は安定した推定が可能であること、その場合の推定誤差は2~3m程度であり、4m以内に接近した場合は1m前後に収まることわかる。さらに推定座標の標準偏差を図-11 に示す。(a)は建設機械接近時であり、(b)はセンサ Array B-01~11 で定時観測された60秒間の常時振動587データに対して同じ処理を行ったものである。この結果から、常時振動時には推定位置がばらつくため標準偏差が2mを下回る例はわずかであるのに対し、建設機械8m以内接近時にはほぼ確実に2mを下回っており、推定座標のばらつきを建設機械の接近検知の指標とする有効性が確認された。

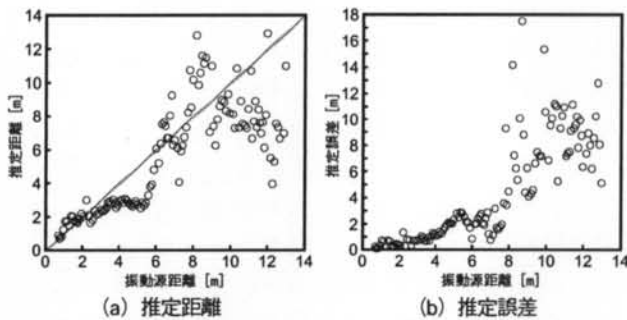


図-10 振動源距離に対する推定距離・推定誤差

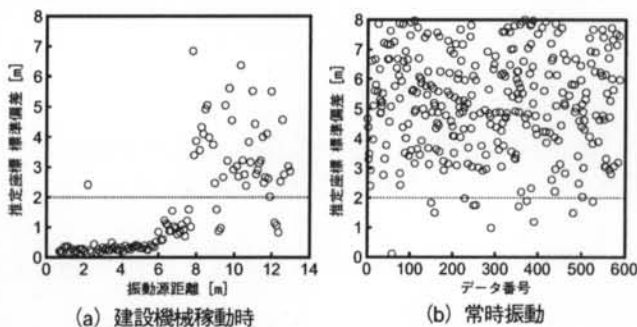


図-11 推定座標のばらつき(2次検知指標)

§ 5. 動作検証と性能評価

開発したデータ処理手法をシステムに実装し、動作検証試験とシミュレーションにより本システムの有効性を実証した。

5.1 常時振動下でのシステム動作検証

開発したデータ処理手法を試作システムに実装し、常時振動下での動作検証を道路下センサ Array B-01~11 を用いて実施した。データ1次処理におけるバンドパスフィルタは70~100Hzを通過帯域とし1秒RMS値が15回連続して0.035cm/s²を上回ったときに1次検知する設定とした。1次検知した場合データ2次処理を行い、60秒間のデータを用いて約2.5秒ごとに算出した位置推定座標の標準偏差が2mを下回ったときに2次検知する設定とした。約1カ月間にわたり連続して実施した動作検証の結果、1次検知した回数は61回であり、平均的に2回/日程度の常時振動による誤検知であった。しかし、その大部分は2次処理の結果、他工事の接近なしと判断され、2次検知されたのはわずか1回のみであった。この結果から、誤作動確率は1回/月程度であり、交通振動等の雑音に対する信頼性は十分に高いことが確認された。図-12(a)に1カ月間の動作検証状況を示し、図-12(b)、(c)に常時振動による1次検知の頻度分布を示す。1次検知される回数は交通量の減少する日曜日には少なく、通勤等によって交通量が増加する朝の時間帯には多いこと等がわかる。また、図-13に1次検知された振動波形の例を示す。連続して車両が通過した場合に1次検知される可能性が高いことがわかる。

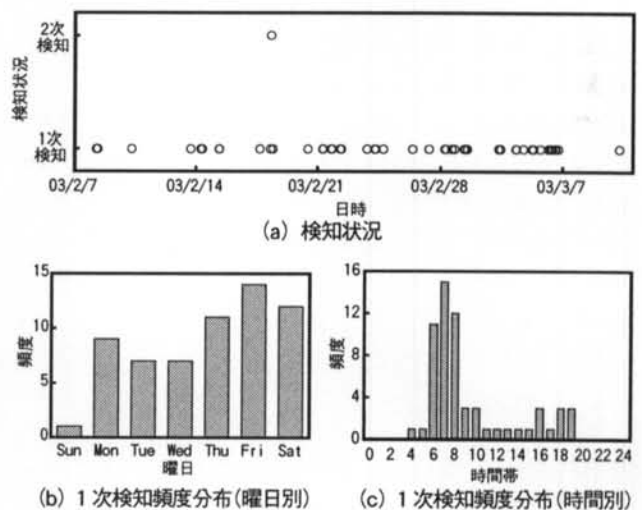


図-12 常時振動下のシステム動作検証結果

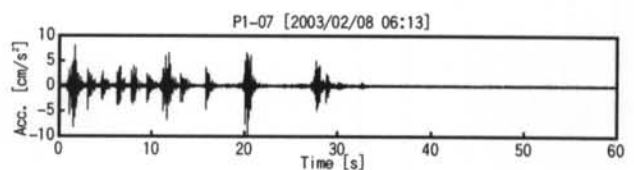


図-13 常時振動によって1次検知された波形例

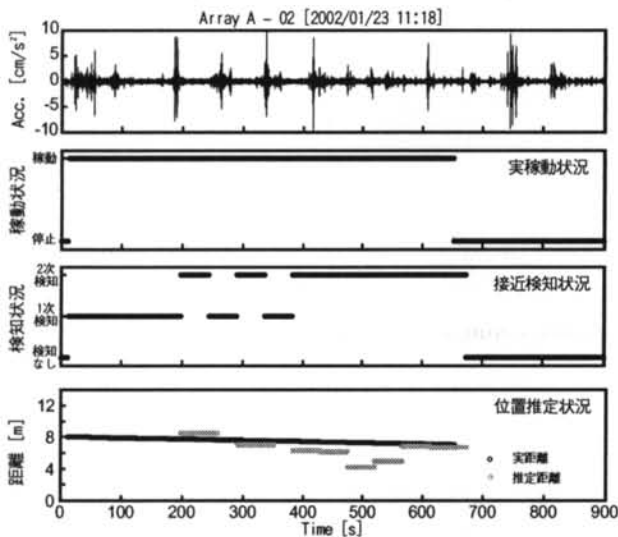


図-14 建設機械接近時の動作検知例

表-1 建設機械接近時の動作検知結果

データ種類	振動源 平均距離 [m]	稼働時間 [s]	2次検知時間 [s]	検知率	位置推定 平均誤差 [m]
推進管 1本目	12.5	590	0	0.00	-
推進管 2本目	11.5	737	0	0.00	-
推進管 3本目	10.5	565	0	0.00	-
推進管 4本目	9.5	541	0	0.00	-
推進管 5本目	8.5	594	0	0.00	-
推進管 6本目	7.5	641	363	0.57	1.2
推進管 7本目	6.5	711	368	0.52	0.7
推進管 8本目	5.5	570	552	0.97	1.9
推進管 9本目	4.6	627	599	0.96	1.7
推進管 10本目	3.6	682	682	1.00	0.8
推進管 11本目	2.6	514	468	0.91	0.6
推進管 12本目	1.7	563	548	0.97	0.2
推進管 13本目	1.0	463	422	0.91	0.2
推進管 14本目	1.0	380	380	1.00	0.4
推進管 15本目	1.7	573	548	0.96	0.7
推進管 16本目	2.6	567	567	1.00	1.5
推進管 17本目	3.6	520	461	0.89	2.6

5.2 建設機械接近時のシステム動作検知

試作システムと同じ構成のシステムを実験室内に構築し、試験工事時に計測された敷地内センサ Array A-01-03 の建設機械振動データを入力するシミュレーションによって、建設機械接近時のシステム動作を検知した。トリガレベル等のパラメータ設定は、常時振動下での動作検知時と全く同じ設定である。図-14 に動作検知結果の一例を、表-1 に結果をまとめたものを示す。表中の“検知率”は実際の建設機械稼働時間に対するシステムが2次検知していた時間の割合である。この結果、建設機械が7.5m程度接近した時点でシステムはほぼ確実に2次検知状態となり、その場合の位置推定誤差は1~2m程度であることが確認された。本システムが対象としている小口径推進工法では、管の接続等に要する時間も含め、掘削速度は1時間あたり1m程度であることから、本システムは損傷抑止に十分な検知性能を有することがわかる。

§ 6. おわりに

本稿では、パイプライン他工事損傷防止システムの概要を述べるとともに、開発した試作システムで得られた建設機械振動と常時振動の特性の評価結果について

述べた。さらに、その結果をベースとした信頼性の高い他工事建設機械接近検知のためのデータ処理手法について述べ、最後に動作検知試験とシミュレーションによって本システムの有効性を示した。

これらの結果から、実際のパイプライン設置環境と同じく車両通行等の外部条件が厳しい場所においても、建設機械が発生する振動を利用したパイプライン他工事損傷防止システムが高い信頼性をもって実現可能であることが示された。

モニタリングシステムにおけるセンシング、データ伝送、データ処理・評価・判断の各要素技術の革新は近年目覚ましいものがあり、これらをシステムとして統合したモニタリングシステムは、今後ますます広い分野への応用が期待される技術である。本システムも次世代型のセンサといわれている光ファイバセンサ等の適用により、より汎用的なシステムとしての展開が可能であると考えられる。

謝辞

本報告は、東京ガス株式会社との共同研究成果の一部である。関係各位のご協力・ご理解に深く感謝申し上げます。

また試験工事は土木事業本部の協力を得て実施した。ここに厚く御礼を申し上げます。

<参考文献>

- 1) 白石理人, 宮本幸展, 渡辺弘之, 柴慶治, 岡田敬一, 坪田恵介: “建設機械によって励起される地盤振動の伝播特性(その1~その2)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.D-1, pp.261~264, 2002.
- 2) 柴慶治, 井関孝弥, 白石理人, 岡田敬一, 渡辺弘之: “建設機械によって励起される地盤振動の伝播特性(その3~その4)”, 日本建築学会大会学術講演梗概集, Vol.B-2, pp.259~262, 2003.
- 3) K.Shiba, M.Shiraishi, H.Watanabe and Y.Miyamoto: “Third Party Damage Prevention System”, Proceedings of first Annual Conference of Natural Gas Technologies, GTI, 2002.9, Orlando, Florida
- 4) M.Shiraishi, K.Shiba, K.Okada and Y.Miyamoto: “Data Processing Method for Third Party Damage Prevention System”, Proceedings of first Annual Conference of Natural Gas Technologies, GTI, 2002.9, Orlando, Florida