

地震後におけるパイプラインの大変形挙動の非破壊診断評価

Non-destructive diagnosis and estimation for pipeline system after an earthquake

小川 安雄, 清水 謙司, 藤田 裕介, 目堅 智久

Yasuo Ogawa, Kenji Shimizu, Yusuke Fujita, Tomohisa Mekata

大阪ガス株式会社 技術部 土木建築技術チーム (〒541-0046 大阪市中央区平野町4-1-2)

It is essential for gas pipeline system to check the integrity after a large earthquake in order to keep gas supply and prevent secondary disasters. This paper describes the method to check the integrity of gas pipeline system after a large earthquake. This method has two features, non-destructive diagnosis and FEM analysis. Non-destructive diagnosis for pipelines is based on the magnetostrictive stress measurement technique, which can measure the bending stresses occurring in pipelines owing to an earthquake. FEM analysis enables us to estimate the stresses or strains in pipelines, which deformed largely owing to an earthquake, with high accuracy. This method is effective and useful to check the integrity of pipeline system affected by the Hyogoken Nambu Earthquake.

Key Words : earthquake, pipeline system, non-destructive diagnosis, FEM analysis

キーワード: 地震, パイプラインシステム, 非破壊診断, FEM解析

1. はじめに

阪神・淡路大震災では、生活を支える交通、通信、電気、都市ガスなどのライフラインシステムが各地で分断され、都市機能の低下をもたらした。この震災を契機として、都市ガスパイプラインシステムも、地震対策の重要性があらためて認識された。

震災後、通産省資源エネルギー庁において「ガス地震対策検討会」が組織され、兵庫県南部地震の被災状況を踏まえつつ、ガス事業における地震対策全般について具体的かつ詳細な検討を行ない、都市ガスの安定供給と安全性の確保、および地震で供給を停止した場合の早期供給再開が可能な都市ガスパイプラインシステムを構築していくための答申が出された。この答申を受けて、都市ガス事業者はパイプラインシステムの耐震性の向上のための施策を実施した。⁹⁾

また、レベル2地震動に対応すべく「高圧ガス導管耐震設計指針」の改訂の取組みを進めると同時に、平成8年度からは国家プロジェクトとして「ガス導管液状化対策調査研究事業」が立上がり、液状化に対するガス導管の耐震設計指針の策定に向けて調査研究が進められている。

このように、都市ガスパイプラインシステムの地震対策は、設備の耐震性の向上や耐震設計指針の策定など、事前の耐震化対策は相当充実したものとなった。一方、地震発生後の対応としては、被害(ガスの漏洩)が発生している箇所を緊急に修繕することは言うまでもないが、さらにパイプライン施設、特に重要な施設の健全性を的確に診断・評価することも重要

である。しかし、診断・評価に係る技術手法は必ずしも十分ではない。

本論文は、大地震発生後のパイプラインの健全性の診断・評価手法に関するものである。この健全性の診断・評価手法の特長は、非破壊応力診断技術とFEM解析技術を組み合わせて、それぞれの技術の利点を活かし、相互に補完することによって、実際にパイプラインに発生している応力やひずみを精度よく評価するものである。パイプラインの非破壊応力診断技術は、鋼管などの磁性体に応力が作用すると透磁率が応力に比例して変化する特性を利用した「磁歪 応力測定技術」に基づいている。FEM解析技術は、大地震による地盤変位等によるパイプラインの変形挙動を、非線形領域まで精度よく解析し、発生する応力やひずみを評価するものである。

本論文が提案する診断・評価手法は、兵庫県南部地震後に、被災地区のパイプライン、特に橋梁架管の健全性の診断・評価に用いられ、その実用性・有効性を確認している。

2. パイプラインの非破壊応力診断技術

2.1 非破壊応力測定技術

都市ガスパイプライン、特に主要なラインを構成している溶接接合鋼管のパイプラインは、地震発生後の安全性の確保の観点から、健全性の診断・評価が重要な課題である。

地震発生時に溶接接合鋼管のパイプラインに大きな影響を及ぼすのは、建物貫通部付近あるいは橋梁配管系などパイプラインのある箇所が不動支持されておりその周辺の埋設部で

地震による地盤の大変位が発生する場合が考えられる。¹⁾

このような箇所では、パイプラインが管軸直角方向のたわみ変形を起こす。従って、パイプラインの受けている影響を定量的に評価するには、発生している管軸方向の曲げ応力を測定する必要がある。また、実際の応力測定という点から言うと、様々な現場で簡単にしかも大変形状態(塑性域)でも精度よく応力測定ができることが要求される。

非破壊でパイプラインの応力を測定する技術¹⁾³⁾は、原理からみると次のものがある。

- ①磁歪応力測定技術 (磁歪異方性を利用)
- ②X線応力測定技術 (X線回折を利用)
- ③音弾性応力測定技術 (音弾性効果を利用)
- ④ひずみゲージ

ひずみゲージを用いてパイプラインの応力診断をすれば、地震発生前の時点でひずみゲージを貼り付けておけばならず、またゲージの寿命、ゲージのメンテナンスからみても現実的ではない。

表-1に①, ②, ③の各測定法の技術的特長の比較を示す。現場での作業性、測定に要する時間、装置の大きさ・重量などの観点から、溶接接合鋼管のパイプラインに発生している曲げ応力を、現場で非破壊で簡易に精度よく測定できる技術として磁歪応力測定法が有効であることがわかる。

2.2 磁歪応力測定技術⁴⁾

鉄鋼材料などの強磁性体に応力が作用すると、磁歪効果により透磁率が変化し、引張応力方向の透磁率 μ_x は増大し、それに対して圧縮方向の透磁率 μ_y は減少する。このように磁氣的に異方性を呈することを磁気異方性という。この磁気異方性を、磁気異方性センサーで電氣的に検出し、応力に換算する手法が磁気異方性を用いた磁歪応力測定技術である。

磁気異方性センサーは、図-1に示すように励磁コア E_1, E_2 と検出コア D_1, D_2 が直交するように配置されており、各々のコアの脚部には磁束を発生させる励磁コイル W_e と磁束を検出する検出コイル W_d が設置されている。

励磁コイル W_e に交流電流を流すと、励磁コア間 $E_1 \sim E_2$ に交流磁界が発生し、被測定物である磁性体に応力が発生し磁気異方性が存在すると、図-2に示すように検出コア間 $D_1 \sim D_2$ に磁束が流れ、検出コイル W_d に、誘起電圧 V が発生する。この誘起電圧 V は

$$V = M_1 \cdot (\mu_x - \mu_y) \cdot \cos 2\theta \quad (1)$$

と表すことができる。ここに、 M_1 は励磁条件、材料の磁氣的特性などにより定まる定数である。透磁率の異方性 $\mu_x - \mu_y$ は被測定物に発生している主応力差 $\sigma_x - \sigma_y$ に比例するため、式(1)は結果として、

$$V = M \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\theta \quad (2)$$

と表せる。ここに、 M は励磁条件、材料の磁氣的特性などにより定まる定数で、主応力差 $\sigma_x - \sigma_y$ と誘起電圧 V の比例定数で磁歪感度という。

表-1 非破壊応力測定技術の比較⁴⁾

	原理・内容	特長	
		長所	短所
磁歪応力測定技術	強磁性体に応力が負荷されると、その磁氣的特性が変化することを利用し、通常0.1~1.0mm程度の深さの平均応力を求める。求められるのは主応力差。	<ul style="list-style-type: none"> ○測定器、センサーとも小型 ○非接触測定が可能 ○測定時間1分/点以下と最も短い。 	<ul style="list-style-type: none"> ○非磁性体への適用不可 ○脱磁処理が必要 ○磁歪感度が材料により異なり、予め校正を要す
X線応力測定技術	X線の回折角の大きさが、結晶面間隔により異なることを利用し、表層から10 μ m程度の平均応力を求める。	<ul style="list-style-type: none"> ○鉄鋼材料の場合、材料別の校正が必要 ○測定精度が最も高い ○非磁性体への適用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ○装置が大型 ○電解研磨による表面処理が必要 ○測定時間1時間/点
音弾性応力測定技術	応力による超音波の横波の復屈折効果により、横波の音速が変化することを利用し、板厚全体の平均応力を求める。求められるのは主応力差。	<ul style="list-style-type: none"> ○測定器、センサーとも小型 ○測定時間10分/点と短い。 ○非磁性体への適用可能 	<ul style="list-style-type: none"> ○測定精度に対する接触状態の影響大 ○音弾性係数が材料により異なり、予め校正を要す ○接触媒体を要す

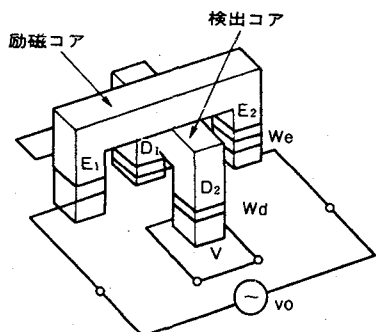


図-1 磁気異方センサーの構造

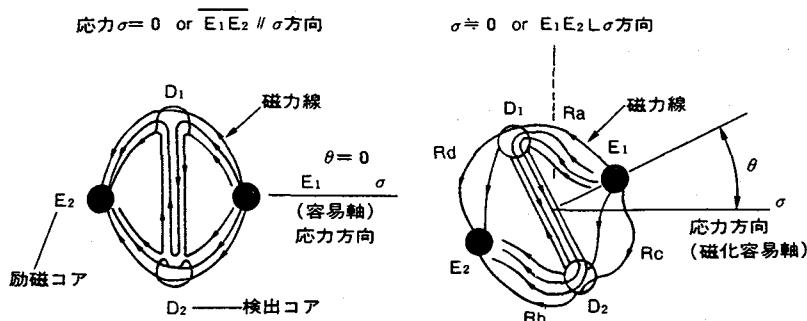


図-2 磁気異方性の検出原理(磁力線の流れ)

2.3 磁歪応力測定技術を用いたパイプの応力測定方法⁴⁾⁶⁾⁷⁾

(1) 弾性域での応力測定方法

磁歪応力測定技術を用いた溶接接合鋼管のパイプラインの管軸方向曲げ応力測定にあたっては以下の課題があった。

- ① 管軸方向応力と管周方向応力の分離
- ② パイプ製造時の初期残留応力による測定精度への影響
- ③ 磁歪感度Mの再現性とばらつき度合

管軸方向の曲げ変形による管軸方向応力の管周に沿った分布は、材料の弾性範囲内では図-3に示すように周期 2π のサインカーブ形状となり、曲げ応力の値は、サインカーブの中立軸の位置には関係せず、サインカーブの振幅値のみから求められる。

パイプラインの曲げ変形時の管軸方向応力と管周方向応力については、都市ガスパイプラインとして用いられる鋼管の曲げ変形実験および図-4に示すFEM解析により、パイプの曲げ変形時の管周に沿った管周方向応力の分布を評価すると、パイプラインの曲げ変形による管周方向応力は全周にわたってほぼゼロであり、管軸方向応力に比べて極めて小さい値をとることがわかった。すなわち、

$$\sigma_l - \sigma_s \approx \sigma_1 \quad (3)$$

σ_1 : パイプの曲げ変形時の管軸方向応力

σ_s : パイプの曲げ変形時の管周方向応力

磁歪応力測定技術では、磁歪出力電圧は互いに直交する2軸の応力の差に比例するが、溶接接合鋼管のパイプラインの曲げ変形時の応力測定において、互いに直交する2軸として、パイプラインの管軸方向と管周方向をとれば、管周方向応力がほぼゼロであるので、磁歪出力電圧と管軸方向の曲げ応力が比例することになる。すなわち、

$$V = M \cdot \sigma_1 \quad (4)$$

V : 磁歪出力電圧

M : 磁歪感度

σ_1 : パイプの曲げ変形時の管軸方向応力

また、無負荷の状態ではパイプラインの管周に沿って磁歪応力測定を実施した結果の一例を図-5に示す。磁歪出力電圧値の管周分布は、ばらつきを持ちながら全体的にはプラスの電圧を示している。これはパイプ製造時の初期残留応力の影響であると考えられる。

実際に曲げ負荷を作用していない状態での磁歪出力電圧分布をサインカーブフィッティングした結果が図-5である。フィッティングカーブは直線状になっておりsin振幅値はほぼゼロである。

管径、製造年、製造方法の異なる数多くの溶接接合鋼管の掘上管を用いた磁歪応力測定の結果、残留応力による管周に沿った磁歪出力電圧の分布はサインカーブでフィッティングすると直線で近似されることがわかった。

前述の無負荷時の応力測定を行った鋼管に曲げ変形を与えた状態で磁歪応力測定を行った結果を図-6に示す。

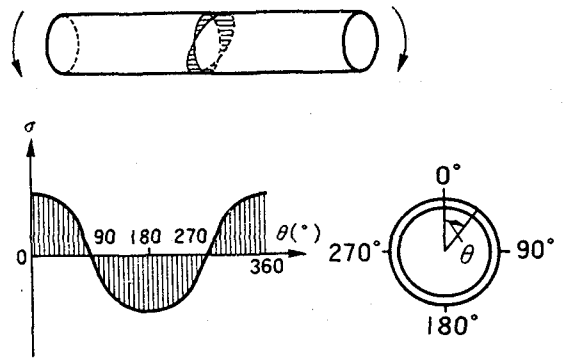


図-3 曲げ変形時の管軸方向応力の分布

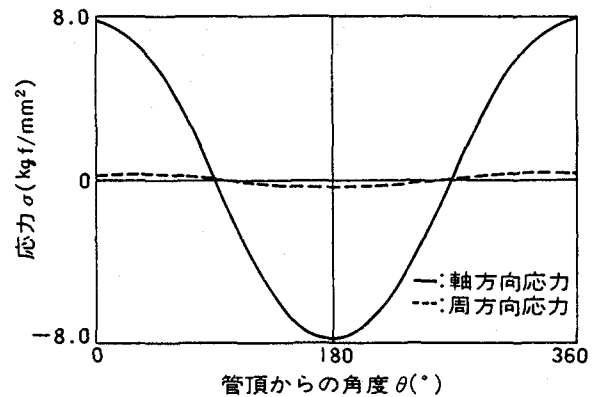


図-4 曲げ変形時の管軸、管周方向の応力分布

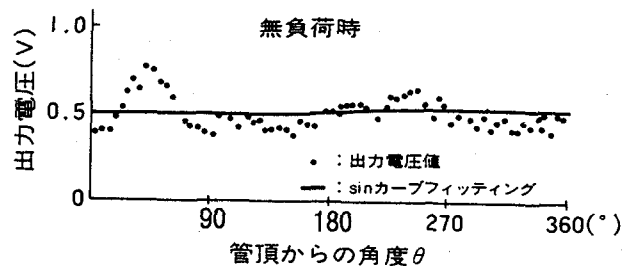


図-5 無負荷時の磁歪出力電圧

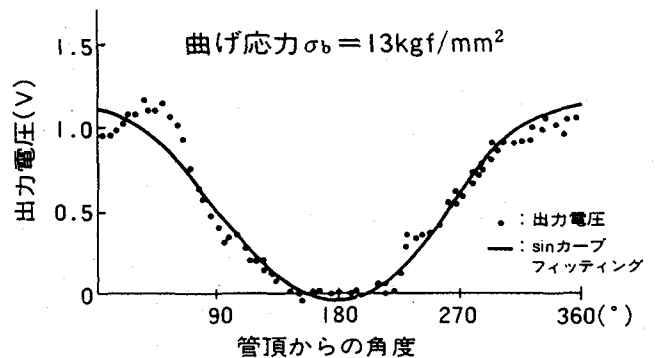


図-6 曲げ変形時の磁歪出力電圧

磁歪出力電圧値の管周分布は、残留応力と曲げ応力(サインカーブ)とが合成されたものと考えられる。すなわち、曲げ変形を受けている鋼管の磁歪出力電圧値の管周分布はサイン

カーブのまわりにばらついて、各点の電圧値が出力される。従って、曲げ変形時の管軸方向応力の測定では管周に沿って連続的に多点測定を行い、得られた磁歪出力電圧分布をサインカーブでフィッティングすれば、残留応力の影響を小さくすることができると考えられる。

磁歪感度Mについては既に埋設されている鋼管の掘上げ管および新管を用いて管径、埋設年、製造方法別に実管曲げ試験を行い、ひずみゲージから得られた曲げ応力値と磁歪出力電圧分布のサインカーブフィッティングの振幅値との関係を整理して求めた。磁歪感度Mは管径、埋設年には関係なく、¹⁰パイプの製造方法による影響、具体的には電気抵抗溶接管、シームレス管の違いがある。実際は応力測定対象管の年代等により製造法を特定し、その製法の磁歪感度を適用する。また比例関係は図-7に示すように±20kgf/mm²の範囲で、ほぼ弾性範囲内である。これが磁歪応力測定技術によるパイプラインの応力測定法の原理上の測定範囲限界である。

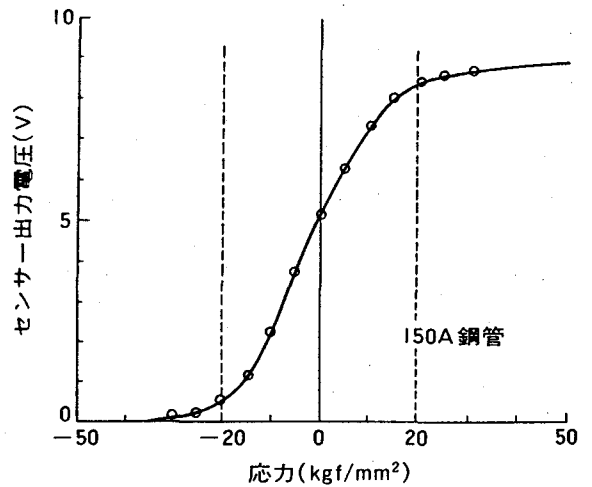


図-7 曲げ応力と磁歪出力電圧の関係

(2) 塑性域での応力測定方法

地震時の地盤変位などにより影響を受ける溶接接合鋼管のパイプラインの診断・評価上、問題となるのはパイプが塑性域に達するような大きな曲げ変形を生じる場合である。

しかし磁歪応力測定技術を用いたパイプラインの応力測定法では、原理的に測定可能な範囲は18~20kgf/mm²の弾性範囲までである。これは、図-7に示す通り、応力が20kgf/mm²を越えてさらに増加しても出力電圧は応力に比例せず、横ばい状態になるためである。そこで塑性域においても発生ひずみの大きさを評価するため、磁歪応力測定技術の測定原理とは異なる新たな測定手法を開発した。

図-8に示すように、管の曲げ変形が進行していくと、最大応力が発生している点(この場合は管頂)から管周方向に塑性域が広がっていく。このとき磁歪応力測定技術によって磁歪出力電圧を測定すると、図-9に示す通りサインカーブの形からのずれが大きくなっていく。すなわち、出力電圧の管周分布は、サインカーブの山、谷部をカットした形状を示す。この出力電圧の分布形状の変化の程度とパイプの大曲げ変形時の応力との間に、正の相関が経験的に得られる。

分布形状の変化度合いの定量化は、出力電圧分布をサインカーブでフィッティングし、出力電圧値とフィッティングカーブ値との差として表す。

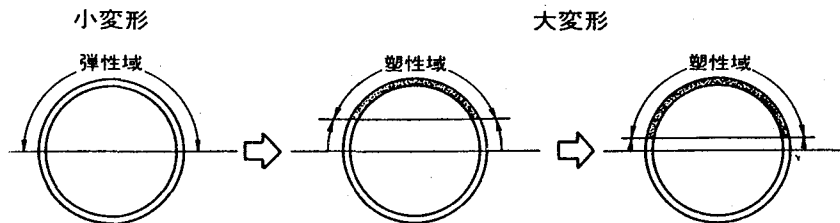


図-8 曲げ変形の進行過程における塑性域の拡大状況

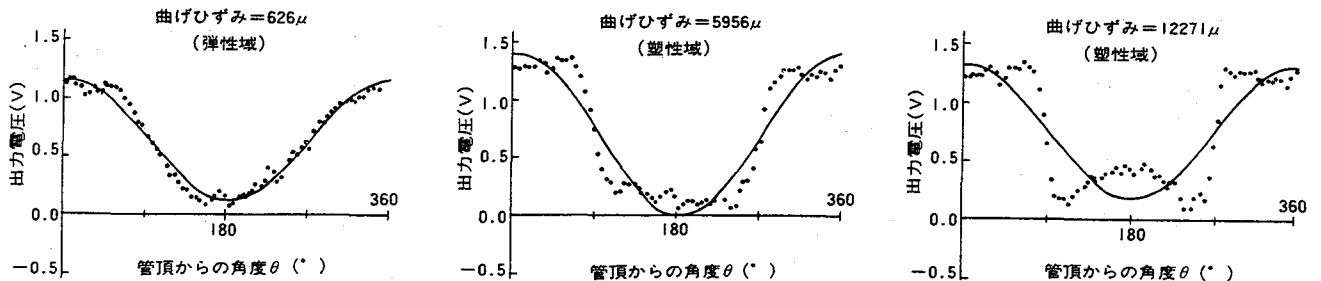


図-9 塑性域での曲げ変形の進行過程と磁歪出力電圧分布

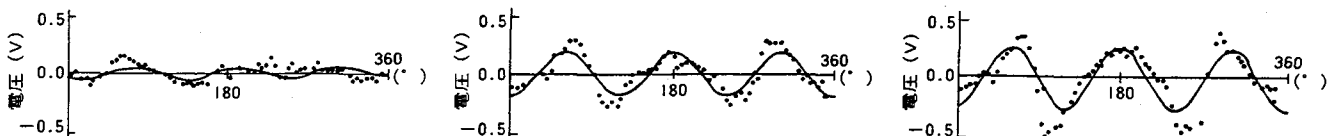


図-10 磁歪出力電圧とsinカーブの差のsin3θカーブフィッティング

この差の値の管周に沿った分布を $\sin 3\theta$ カーブでフィッティングしたのが図-10であり、塑性域の拡大に伴い、 $\sin 3\theta$ カーブの振幅値が増加していく。そこで $\sin 3\theta$ の振幅値を発生ひずみの定量化指標とした。

図-11 に大変形曲げ実験における $\sin 3\theta$ 振幅値と塑性曲げひずみとの関係を示す。多少のばらつきはあるものの $\sin 3\theta$ 振幅値から 1(%)程度まではほぼ正比例の関係にあり、塑性曲げひずみの測定が可能である。1%をこえると電圧値の変化に対し歪の変化が大きくなる。

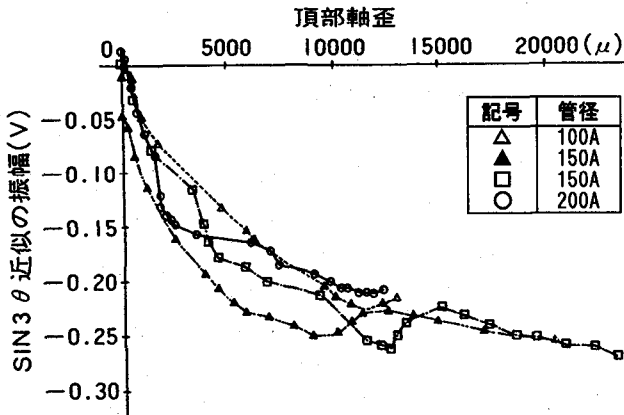


図-11 塑性ひずみと $\sin 3\theta$ カーブ振幅値の関係

2.4 磁歪応力測定システムの特長

開発した磁歪応力測定システムの全体構成を図-12に示す。システムは軽量かつコンパクトであり、システム一式は小型車1台で容易に現場まで運ぶことができる。

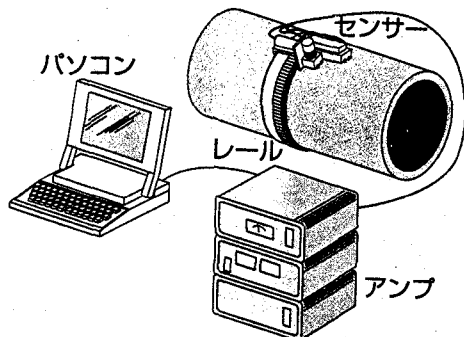


図-12 磁歪応力測定システムの全体構成

測定に際しては、面倒な前処理は必要なく、溶接接合鋼管のパイプラインのポリエチレンライニング塗覆装から測定でき、さらに測定前の脱磁処理も自動化しているため、1箇所あたりの測定時間も5分程度と短時間である。また、磁歪センサーの小型化により、測定時に必要となるスペースは、磁歪センサーがパイプのまわりを1周するスペース、つまりパイプ表面から10cm程度が確保できれば十分である。

全ての測定操作は、パソコンによる対話形式で処理できるため誰でも容易に行うことができる。パソコン操作により、センサーの位置決め、センサー走行範囲、測定ピッチ等は自由

に設定できる。従って、磁歪センサーが管まわりを完全に1周するスペースが確保できない場合でも、センサーを半周程度回転させて、必要なデータを得ることも可能である。

収集した測定データは、測定に用いたソフトによって即時に解析ができる。パソコン画面上でサインカーブ・フィッティング状況が出力され、測定現場において即時に測定結果の曲げ応力を知ることができる。

3. パイプラインの地震後の応力評価手法

3.1 磁歪応力測定技術とFEM解析の組合せ

地震時にパイプラインに発生している応力やひずみを推定する手法として、FEM解析がある。これは、パイプラインをはり要素またはシェル要素で、地盤をばね要素でモデル化して、コンピュータ解析するものである。

地震後、変形を受けたガス導管については速やかにその健全性を評価する必要がある。特に地盤変位を受けた箇所については、ガス導管が変形していることが明確であり、評価する必要性が高い。

しかし、地震時のパイプラインの変形等の原因である地盤変位を入力条件としたFEM解析では、地盤変位に関するデータが不十分な場合が多く、地盤変位量を推定した解析となり、解析結果が必ずしも実際に発生している曲げ応力を精度よく表しているとはいえない問題がある。

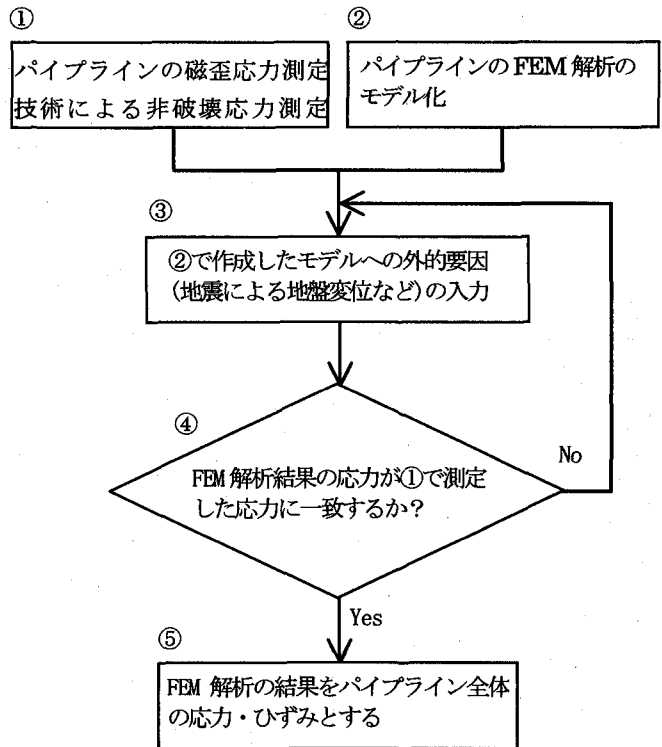


図-13 パイプラインの健全性の診断・評価手法の手順

本論文で提案する手法は、磁歪応力測定技術を用いたパイプラインの応力測定結果とコンピュータを用いたFEM解析とを組み合わせたものであり、地盤沈下、側方流動を対象にガス導管への影響を評価するものである。図-13に本論文で提案するパイプラインの健全性の診断・評価手法の手順を示す。

架空部での磁歪応力測定結果をもとに、この磁歪応力位置での応力値を発生させる地盤変位量をコンピュータによるFEM解析で逆算する方法である。

パイプラインの橋梁配管部を例にとりて本論文で提案する手法の具体例を示す。図-14に橋梁配管の概要を示す。

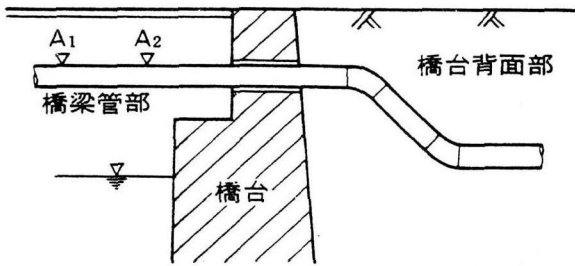


図-14 橋梁配管の概要

具体的な手順としては、まずA₁、A₂で磁歪応力測定を行い、応力を求める。次に地震による道路面の亀裂等により、沈下範囲を特定し、一様な地盤沈下が生じると仮定する。地盤変位量をパラメータとして、パイプライン全体系のFEM解析を実施する。地盤変位量が既知の場合は、その値を用いてFEM解析を実施する。A₁、A₂でのFEM解析の結果と磁歪応力測定技術を用いた応力測定の結果の応力値とが一致するときの地盤変位量を、パイプライン全体系に作用した地盤変位量とし、磁歪応力測定していない部分での発生応力は、このときのFEM解析の結果から推定する。FEM解析では、パイプライン、地盤とも材料特性を非線形モデルとしている。

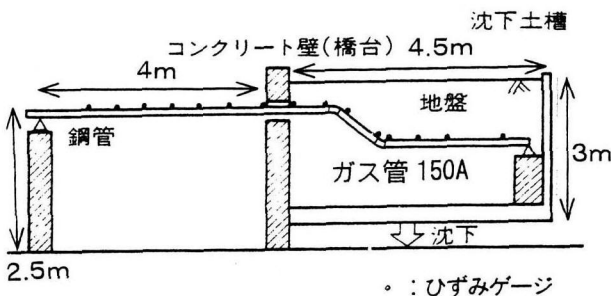


図-15 実規模沈下挙動実験

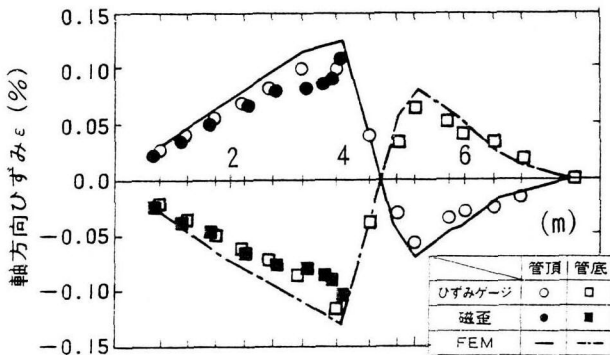


図-16 応力測定、FEM解析結果と実験結果の比較

3.2 応力評価手法の妥当性の確認

本提案手法の妥当性を確認するために、橋梁配管系をモデル化した実大の沈下挙動実験を実施した。²⁵⁾ 図-15に示すようにコンクリート製の沈下土槽に150A溶接接合鋼管のパイプラインを埋設し、一様な地盤沈下を与えた。図-15の黒丸はひずみゲージの貼付位置を示す。図-16に実験結果を示す。

磁歪応力測定技術によるパイプラインの応力測定結果、FEM解析による応力計算結果のいずれも、ひずみゲージによる応力値とよい一致を示しており、本手法がパイプラインの応力評価手法として有効であることが確認された。

4. 兵庫県南部地震での適用事例

大地震発生後のパイプラインシステムの健全性の診断・評価に関する手法として、非破壊応力診断技術とFEM解析技術を組み合わせた手法を提案したが、本手法を用いて実際の兵庫県南部地震後に、被災地区のパイプライン、特に橋梁架管の健全性の診断⁸⁾・評価を実施した。

表-2に兵庫県南部地震の際に磁歪応力測定技術を用いて都市ガスパイプラインの応力測定を実施した現場一覧を示す。測定現場はいずれも橋梁架管部である。

表-2 兵庫県南部地震の際の磁歪応力測定現場

場所	口径	測定箇所数
神戸市 須磨区 大黒町	300A	9断面
須磨区 西落合	300A	10断面
兵庫区 上町	150A	6断面
兵庫区 東山	150A	12断面
	200A	12断面
垂水区 多聞台	200A	3断面
西区 櫛谷町	400A	6断面
宝塚市 逆瀬台町	150A	13断面
西宮市 仁川北	150A	6断面
尼崎市 大浜町	200A	7断面

兵庫県南部地震の際に磁歪応力測定技術を用いて都市ガスパイプラインの応力測定を実施した現場の中から応力測定の実例を紹介する。対象は神戸市須磨区大黒町の口径300Aの橋梁架管部のパイプラインである。

写真-1に橋梁架管部のパイプラインの全景を、写真-2に右岸側の測定風景を、写真-3に左岸側の被災状況を示す。

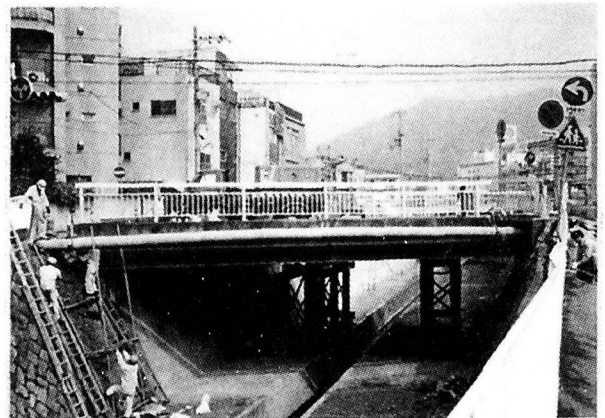


写真-1 応力測定現場の全景 (神戸市須磨区)

写真-2から右岸側背面のパイプラインの防護コンクリートの剥離が確認できる。これらの写真から、パイプラインだけではなく、護岸も被災していることがわかる。また、パイプラインの応力測定を実施した現場の平面図を図-17に示す。

護岸貫通部付近の応力測定結果を、図-18、図-19に示す。図-18は右岸側の護岸近傍のR4測点(護岸から65cmの地点)の測定結果であり、図-19は左岸側の護岸近傍のL9測点(護岸から110cmの地点)の測定結果である。図-18の測定

結果から、パイプラインの管頂付近で引張、管底で圧縮の管軸方向応力が発生しており、定性的に当該地点のパイプラインの変形状況と合致する結果がえられている。

両地点とも護岸貫通部近傍であるが、測定結果を評価すると、発生応力はいずれも弾性域で測定箇所R4では415kg/cm²、測定箇所L9では85kg/cm²であり、「本支管設計指針」(日本ガス協会)に示された許容応力1500kg/cm²に対し小さなレベルでしか、応力が発生していないと評価できる。



写真-2 右岸側の状況 (神戸市須磨区)



写真-3 左岸側の状況 (神戸市須磨区)

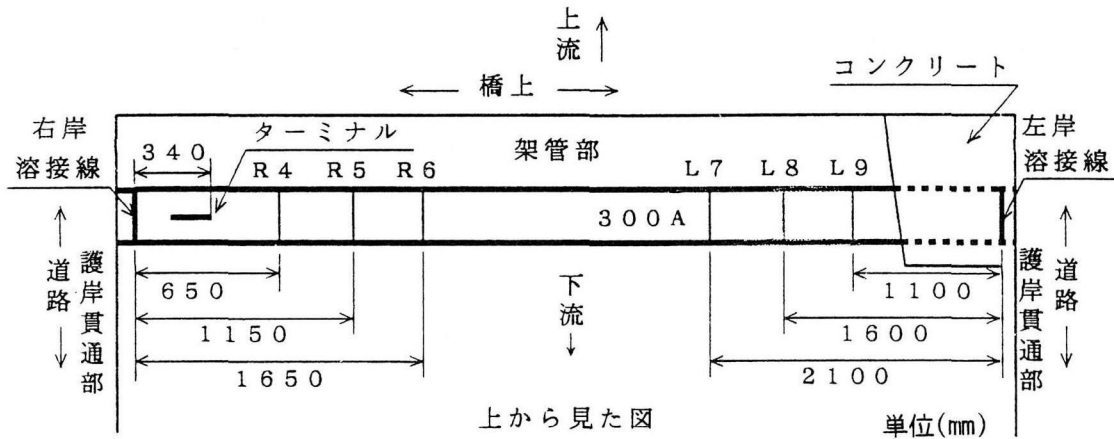


図-17 パイプラインの応力測定現場の平面図

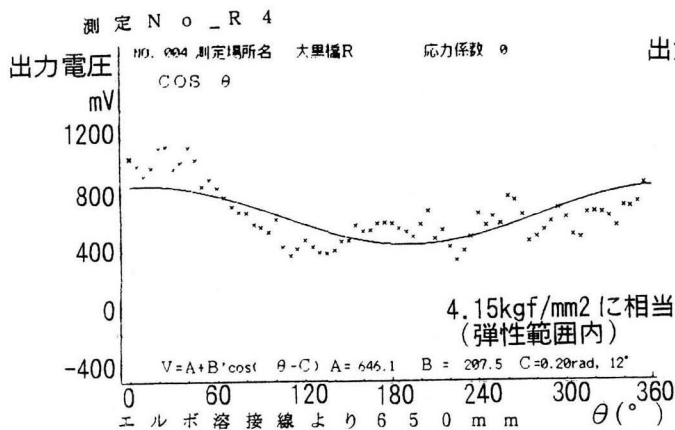


図-18 右岸側の応力測定結果 (護岸から65cm)

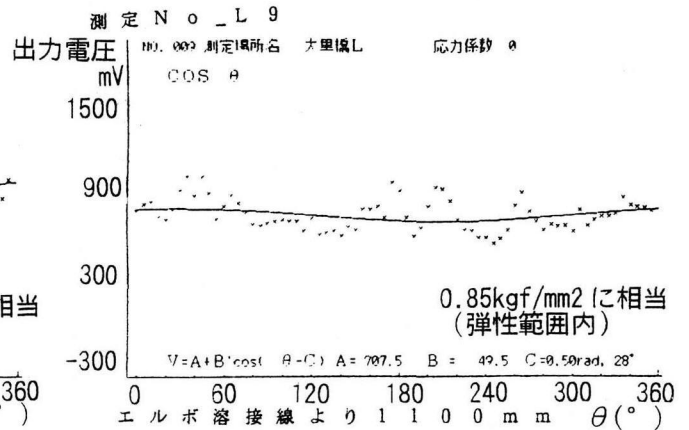


図-19 左岸側の応力測定結果 (護岸から110cm)

5. まとめ

大地震発生後のパイプラインシステムの健全性の診断・評価に関する手法として、非破壊応力診断技術とFEM解析技術を組み合わせ、それぞれの技術の利点を活かし、相互に補完することによって、実際にパイプラインに発生している応力やひずみを精度よく評価する手法を提案した。

パイプラインの非破壊応力診断技術は磁歪応力測定技術に基づいており、FEM解析技術は大地震による地盤変位等によるパイプラインの変形挙動を、非線型領域まで精度よく解析し、発生する応力やひずみを評価するものである。

本論文で提案した診断・評価手法は、兵庫県南部地震後に、被災地区のパイプライン、特に橋梁架管の健全性の診断・評価に用い、その実用性・有効性を確認した。

都市ガスパイプラインシステムの地震対策は、設備の耐震性の向上や耐震設計指針の策定など、事前の耐震化対策は相当充実したものとなっているが、今後は、本論文で提案した診断・評価手法のように、パイプライン施設の特重要な施設の健全性を的確に診断・評価する手法が、地震発生後の地震対策として重要となると考えられる。

<謝辞>

磁歪応力測定技術を用いたパイプラインの応力測定手法はNKKと大阪ガス㈱の共同開発である。開発に携わった全ての方々に深く謝意を表する次第である。

<参考文献>

- 1) 的場, 境, 河合, 鈴木: NKK 技報, Vol. 131, pp. 46-54, 1990
- 2) 小川, 岡, 鈴木, 谷村: 土木学会第 45 回年次学術講演会講演概要集, Vol. 6, pp. 292-293, 1990
- 3) 壇上: 1991 設備診断技術シンポジウム, 1991
- 4) 小川: 日本ガス協会誌, 技術講演論文特集号, pp. 70-75, 1991
- 5) Y. Ogawa and S. Oka: 4th International Conference on Ground Movement and Structure, 1991
- 6) 小川: 管路情報, Vol. 38, pp. 28-32, 1992
- 7) 小川, 清水, 境, 塩川: 磁気異方性を利用した鋼管自動応力測定システム, センサー技術, Vol. 12, No. 8, 1992. 7
- 8) 安藤, 小口, 小川, 清水: 阪神大震災での中圧ガス架管の事例分析, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, pp. 1361-1364, 1997. 7
- 9) 小川, 清水: 大阪ガスの輸送供給部門の地震対策, 日本機会学会関西支部, 第 72 期講演会, 1995. 3
- 10) NKK 応用技術研究所: PLP 管に対する磁歪応力測定実験報告書, 1992. 5

(1999 年 9 月 17 日 受付)