

農業用パイプラインの安全性能向上に関わる施設管理手法の考察

－ 管内水理挙動の監視と収集データの活用 －

株式会社アルファ技研 徳井 順
植屋 賢祐
阿部 匡弘

1. はじめに

わが国は、国土の立地条件や気候風土に起因して、古来より多くの自然災害に見舞われてきた。とくに、2003年から2004年にかけては各地で地震や台風などの大規模な自然災害が相継ぎ、農業水利施設も甚大な被害を受けたことは記憶に新しい。

自然災害による農業水利施設の被害は、とくに地震によるものが顕著で、ダムやため池など盛土構造物のほか、線構造の水路施設における被害の発生が多く報告されている。このうち、近年水利組織が大規模化した農業用パイプラインは、施設利用が制限される1次的な被害に加えて、高圧・大量の漏水による耕地への冠水や道路・建物等への被害拡大など2次的な影響も大きく、公共の安全確保の立場からも安全性能の向上が急務である。

しかし、線的な広がりを持つパイプラインの全てに、ダムなどと同レベルの安全性能をハード的に求めることはコスト面から限界がある。ハード的な弱点のカバーには、施設管理などソフト面からのアプローチが考えられるが、農業用パイプラインにあっては、管理要員確保の立場などから人的な対応には限界がある。このため、管理労務をサポートする技術開発の必要性が生じている。

本報告は、農業用パイプラインの安全管理に着目した管理の一例として、①携帯電話通信技術を活用した監視システムによるパイプラインの管理事例と、②観測によって得られた情報の分析による管理基準等の検討事例を紹介するとともに、③実管理に対応した監視システムを提案する。

2. 施設の安全性能向上に関わる管理項目

(1) 漏水量

パイプラインの機能維持にあたり、最も重要な管理項目の一つとして漏水管理が挙げられる。

漏水の有無や量的変化の把握は、水資源の確保・利用など利水管理上の必要性のほか、小規模なものでも経年変化や地震等の自然災害の影響で拡大し、管の離脱に至って大きな被害につながるなど、とくに安全管理上から重要である。

しかし、パイプラインは施設の多くが地中構造物のため異常箇所を目視確認が難しい。漏水事故防止のためには、常に漏水の有無や傾向を把握して異常の早期検知を可能にする監視体制の整備が重要である。

(2) 施設操作に伴う水理挙動

パイプラインの安全性に係る水理挙動として、流量の変化に起因して発生するサージングやウォーターハンマなどの非定常現象がある。このため、人為的な流量変更操作は、これらの挙動の影響が設計値の範囲となるように行うことが原則である。

しかし、水利組織の複雑化等により、設計時点から実管理に十分対応できるレベルの数値シミュレーションを行うことは難しく、数値計算と実際の施設で観測される挙動との整合性が低い場合が見られるのも事実である。

安全な施設操作のためには、実際の施設で観測されるデータに基づいた「施設操作基準」の整備が有効であり、これには、基礎データの収集に対応できる観測設備の整備が必要である。

(3) その他の水理挙動

パイプラインにおけるその他の水理挙動の一例として、人為的な流量変更操作による水理挙動から、漏水発生（拡大）時の管内流速の急変に伴うウォーターハンマの発生が予想される。

また、昨年の十勝沖地震では、畑地かんがい用パイプラインで地震動に起因した比較的大きな管内水圧の変動が確認された事例もあり、施設の立地・構造条件および水理条件によっては、このような水理挙動が管の離脱や付帯施設の損壊、すなわち漏水事故につながる可能性が懸念される。

このため、パイプラインにおける常時の水理挙動の観測が、緊急時の即応性の向上や被害の拡大防止に有効と考えられる。ただし、これらの挙動については不明確な部分が多く、データの蓄積による詳細分析が今後の課題であり、これにも、基礎データの収集に対応できる観測設備の整備が必要である。

3. 監視設備に求められる性能

前述の管理項目は、いずれも管内の圧力変化を監視することで把握できる。管理項目の特性から監視装置の具備すべき条件は、①測定精度が高いこと、②きめ細かい測定間隔の観測が可能なることに加えて、③情報収集の確実性が基本となる。さらに、実管理段階の導入を考慮すれば、④少労力・広範囲の観測への対応、⑤既存の水管理システムへの組み込み、⑥廉価な建設および維持管理コストなどが具備すべき条件として加味されることになろう。

これらの条件を制約するのは、主として通信回線と電源の確保に係るものであり、本報文中で紹介した監視システムは、現在、一般にも広く普及している携帯電話通信技術を活用した機器構成となっている。

監視システムの構成は図-1のとおりで、装置は、①空気弁の排気弁などに設置して管内

水圧を計測する圧力センサー、②データロガーや携帯電話を内蔵した現場側通信装置、③現場側の電源装置および④データ収集や観測水圧から水位換算等を行う観測者側のモバイル端末(パソコン)と処理ソフトで構成され、測定精度は0.00013MPa（水頭0.013m）、測定間隔は1秒～1時間まで任意に設定できる。

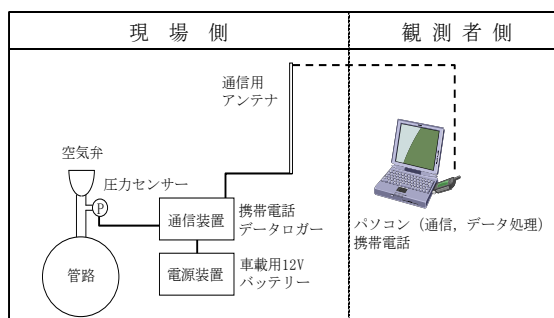


図-1 監視システムの構成

本システムを利用したパイプラインの管理事例は通水試験への適用である。通水試験における情報の利用目的は、①充水作業の安全性確保、②漏水の有無判定・早期検知と、③漏水がある場合の漏水箇所の特特定などが挙げられ、これらの点から本システムの性能を評価すると次のとおりである。

- ・測定精度：上記のとおり、漏水判定に十分対応できる測定精度を有している。
- ・測定間隔：上記の範囲で任意に設定可能だが、設定時に考慮すべき条件として、必要情報の把握以外に電源装置の容量の制約から、観測可能期間が測定間隔（測定回数）に規定される点が挙げられる。試験では、緊急時の即応性の確保と、漏水箇所特特定などの継続観測への対応を勘案し、測定間隔を1分とした。（この場合、2週間程度の連続観測が可能）
- ・情報収集の確実性：試験エリアの携帯電話の通信状態は概ね良好であり、通信状態が不良の場合でもアンテナの伸長により通信を確保することができた。本システムは、中山間部に立地する施設の場合でも、簡易な施設対応で通信の確保が可能である。

4. パイプラインの管理事例¹⁾

(1) 充水・落水作業の安全性確保

一般に、空の状態にある管路の水張り作業は、充水量（充水速度）を設計流量の1/5～1/10程度²⁾として、管路内の制水弁で流量制御を行う方式がとられている。

この場合、特に配水管路などの末端部は高圧・小口径となるため、より小流量・小開度の制御が必要となる。しかし、小口径ゆえに弁の開度計が設置されていないことや、弁自体が地中埋設型となっているため制御精度の確保は非常に難しく、充水作業における安全管理上の課題であった。

これに対し本システムは、携帯電話から現場の観測装置にアクセスしてデータを収集し、この水圧データを専用の処理ソフトを用いて水位に変換してグラフ描画できる。これにより、水張り作業中の充水位変化を高い精度で迅速に把握でき、充水状況に応じた柔軟な充水速度の調整が可能になった。

図-2は、水張り作業中に管内水位の異常な変動を検知した事例である。その後の調査により、施工時の空気弁保護キャップの取り忘れから、排気不良でエアハンマが発生したことが原因と判明した。(エアハンマ: 管路中の大きな空気の塊が抜けた時、空気が抜けてしまった領域に周囲の水が一瞬にして入り込み衝撃を与える現象)

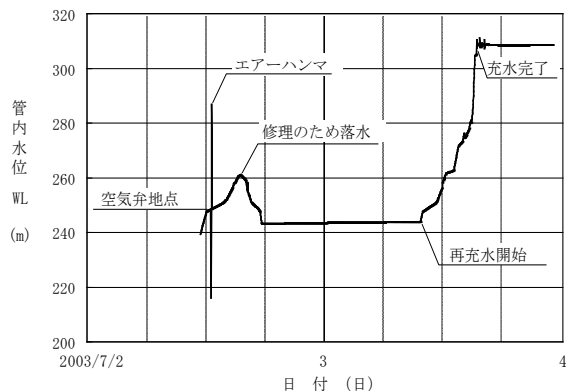


図-2 充水作業中のエアハンマの発生

このように、本システムによるリアルタイムの管内水位観測は、充水作業中、任意の場所・時間に充水速度のチェックや管内異常の検知が可能になるなど、充水作業の安全性を確保することに大いに役立った。

(2) 異常発生 of 早期検知

従来、水張り後の漏水観測は、定期的な巡回を通して量水標やゲージ類を観測者が目視で確認する方法をとっていた。しかし、この場合は、①観測者間で生じるデータの読み取り誤差があること、②高圧時には観測精度が著しく低下すること、さらに、③観測範囲・箇所次第では密なインターバルでの観測が不可能であることなどがデメリットとして挙げられ、とくに、異常事態が発生した場合、発見・対応が迅速にできないことが従来からの課題であった。

図-3は、漏水観測期間中に減水傾向の変化が確認された事例である。図-3中に---線で示した減水の予測ラインに対して、観測値が急変（減水傾向が増加）している様子を捉えている。本システムは、試験範囲が広域でも遠隔からのアクセスにより効率的に情報収集ができることから、変状の有無やその発生を早期に把握することが可能になった。

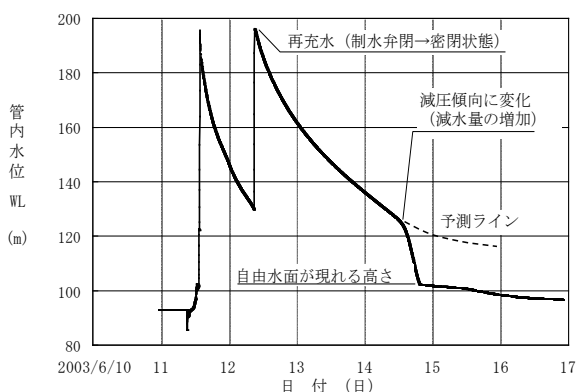


図-3 漏水観測中に異常を検知した事例

このように、本システムの漏水観測への適用は、広域を対象としたパイプラインの通水試験における安全性の確保に関して、有用な情報を提供するものであった。

(3) 漏水箇所の特定

パイプラインの漏水は、付帯施設内や地表面に湧水するなど、目視確認が可能な場合を除き発見が難しい。とくに、大口径に加えて布設勾配が緩い場合は、漏水に伴う管内水位の低下量が小さくなり、目視やアナログ式の圧力ゲージの精度では減水の確認が困難である。

以下は、比較的緩勾配のオープンタイプパイプラインを対象に（勾配 0.13° ，口径 1200mm，延長 5.5km），アナログ式の圧力ゲージと本システムを用いて管内水位の同時観測を行った事例である。図-4 にアナログ式の圧力ゲージによる観測状況を示すが、当図のみでは減水が有ると断定はできない。一方、本システムを用いた場合は図-5 のように明らかに減水傾向が確認できる。

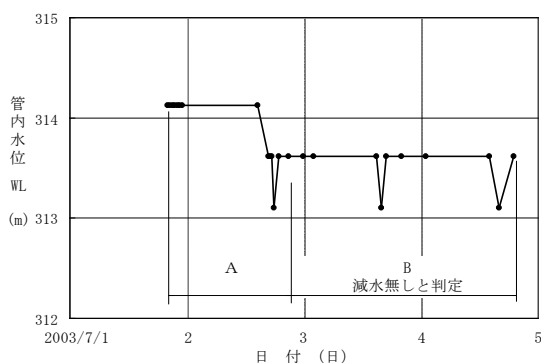


図-4 アナログ式の圧力ゲージによる観測
(任意観測：数時間間隔)

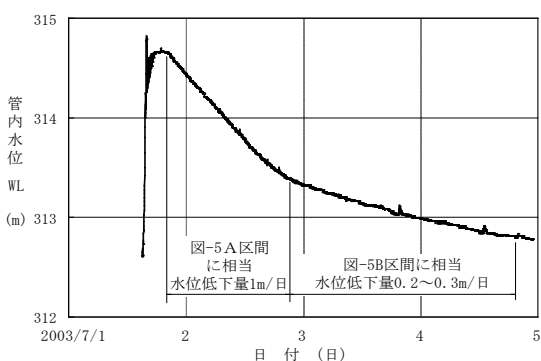


図-5 監視システムによる観測（1分間隔）

このとき、付帯施設の点検や周辺踏査から異常は確認されなかったが、水位の低下傾向

が続いたため観測を継続したところ、5日後に水位低下が停止した。その後、再充水による観測でも当初と同じ水位で停止した。観測経過は図-6 のとおりである。

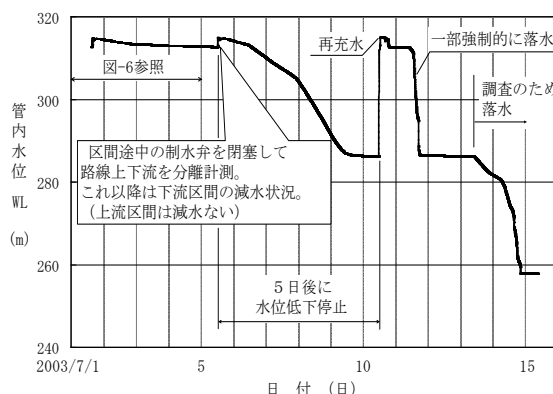


図-6 長期監視による管内水位の変化

この結果に基づき、水位低下の停止標高に該当する付近で管体工調査を実施したところ、管体のたわみや継ぎ手の抜け出しなどの漏水要因を確認することができた。

本システムの導入効果として注目すべき点は、測定精度の高さから、①漏水の有無の判定精度が向上すること、加えて、省労力で長期の観測にも容易に対応できることから、②他路線の試験進行に影響を与えずに漏水箇所の特定作業が行えることである。

5. 管理基準等の検討事例

(1) 漏水量管理基準の検討

通水試験の漏水観測に本システムを用いることで、常時の水理挙動についても従来よりも高い精度で把握することが可能になる。このため、施設の供用開始時点では、この観測結果を漏水量の管理基準値として用いることができる。

また、施設供用後も監視を継続することにより、常時の夜間や冬期間などの観測データを加えて詳細な分析を行うことができ、管理基準の安全性の判定精度を高めていくことが可能である。

(2) 弁類の操作基準整備に関する検討³⁾

弁類操作のうち、幹線用水路に付帯する排泥弁の操作は、分水栓の操作に比べて制御の対象流量が比較的大きくなる一方で、一般に操作頻度が少ないことから、施設管理者でも操作に不慣れなことが予想される。このため、操作時の安全性確保には操作基準等を整備する必要性が高い施設である。

本項は、実際にパイプラインの排泥弁を使用した操作試験で観測された水撃圧データを、操作基準作成の基礎となる数値シミュレーションモデルの再現性向上に活用した事例である。

対象施設の概要を表-1に示す。

操作試験では図-7のように観測機器を配置して流量と水圧の変化を観測した。図-8に示すように、排泥弁からの放水量を段階的に増加させ、このとき弁操作に伴って発生する水撃圧を観測し、その規模、継続時間および圧力振動周期等を把握し、数値シミュレーションモデルの諸定数の補正に用いた。

なお、試験中は分水栓等の利用はなく、流量変化の要因は排泥弁からの放水のみである。

表-1 操作試験の対象施設

対象施設	延長 (km)	管種	管径 (mm)	最大静水圧 (MPa)
施設A	20.4	FRPM, DCIP	φ 700~200	0.9
施設B	13.4	FRPM, DCIP	φ 600~150	1.5
施設C	12.3	FRPM, DCIP	φ 1200~250	0.8

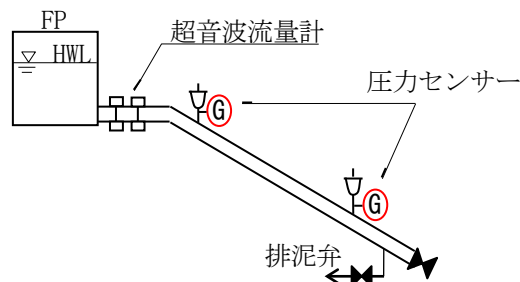


図-7 水撃圧観測の概念図

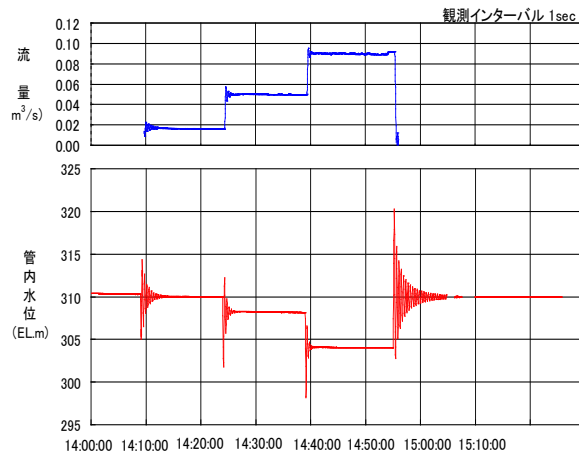


図-8 流量、水撃圧の観測事例

水撃圧のシミュレーションモデルは、水の弾性体理論に基づく非定常流況解析の一手法である中心差分法⁴⁾を用いた。

シミュレーションモデルにおける計算条件のうち、差分距離 Δx は100m、単位時間 Δt は対象施設の設計流量と圧力波の伝播速度を基に0.05sとした。

Δx および Δt のほか、シミュレーションモデルの再現性に関わる要素である等価流速係数(C)と圧力伝播速度(a)は、表-2に示すとおり、①設計時点で用いられる標準値や理論値を使用した場合(ケース1)と、②観測記録を基に補正した値を使用した場合(ケース2)を設定し、それぞれのシミュレーションモデルの再現性を比較した。なお、モデルに使用した弁の操作時間と操作量(開度)は試験における実績である。

表-2 諸定数の補正值

対象施設	圧力伝播速度 a (m/s)		等価流速係数 C	
	理論値	実測による補正值	理論値	実測による補正值
施設A	560	600	130	90
施設B	560	550	150	40
施設C	410	690	140	110

対象3施設について、ケース1およびケース2の計算条件の下に弁操作時の水撃圧をシミュレートし、シミュレーション結果と実測値との整合性から、各ケースの再現性を検証した。

図-9および図-10は施設Aにおける実測値とシミュレーションの比較である。

シミュレーションモデルの諸定数に理論値のみを使用した場合は(図-9: ケース1)、水撃圧のピークや圧力振動周期にずれが目立つ。モデルの再現性を評価する指標として相対誤差 j を用いると、本ケースの場合は $j=0.71$ である。

一方、諸定数のうち、等価流速係数 C と圧力伝播速度 a を実測から得られた値に置き換えた場合は(図-10: ケース2)、水撃圧のピークや圧力振動周期が実測値とよく一致している。この場合の相対誤差は $j=0.23$ となり、ケース1に比べてシミュレーションモデルの再現性が大幅に向上したと判断できる。

この傾向は表-3に示すとおり、施設Bおよび施設Cについても同様であり、対象としたいずれの施設でも、簡易な弁の操作試験から得られた観測データの活用によって、シミュレーションモデルの再現性が大幅に向上している。

施設の計画・設計時点では、シミュレーションに必要な諸定数は標準的な値を代入せざるを得ず、その再現性は良好とは言えない場合が多い。これに対し、実際に施設が完成した場面では、簡易な弁の操作試験で得られるデータがシミュレーションの再現性向上に役立つ。再現性の高いシミュレーションモデルは、実際の施設では危険と思われる短時間の弁操作に伴う水撃圧の予測も比較的高い精度で再現できることから、弁類操作基準の作成に有効である。

このように、一時的な観測機器の設置によっても、実管理に十分有用な情報が得られる。観測機器が常設されれば、日常の管理操作に

伴う膨大な水理挙動のデータが蓄積されるので、これらを有効に活用すれば、継続して操作基準の精度向上が図れる。また、施設管理に有用なその他の知見も得られる可能性がある。

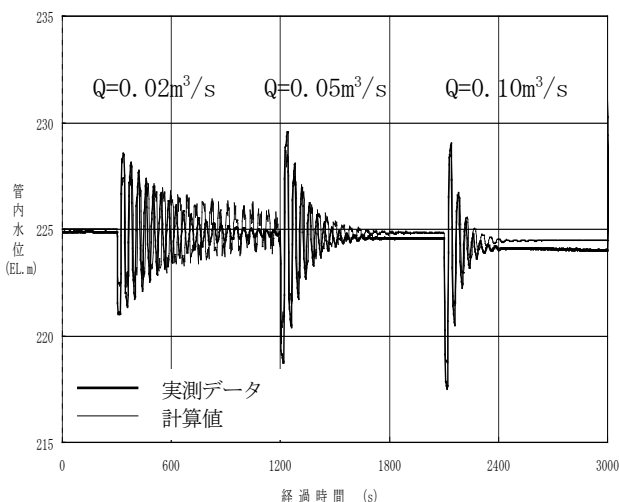


図-9 ケース1のシミュレーション結果

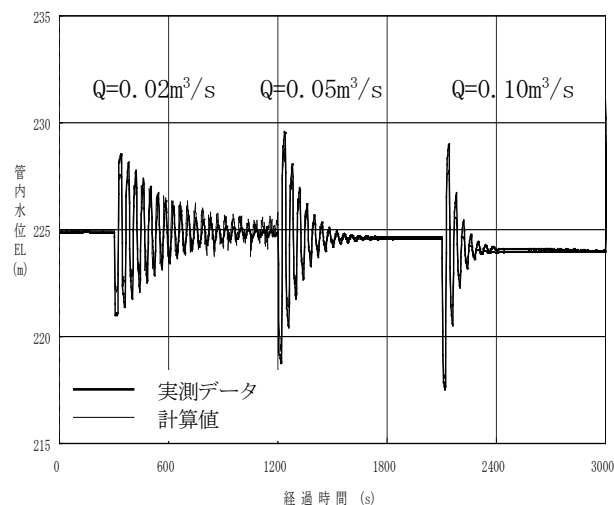


図-10 ケース2のシミュレーション結果

表-3 再現性の比較 (相対誤差)

対象施設	相対誤差 = $ \text{実測値} - \text{計算値} / \text{実測値}$	
	ケース1	ケース2
施設A	0.71	0.23
施設B	0.46	0.02
施設C	0.85	0.27

(3) 地震による水理挙動の分析^{5), 6)}

2003年9月26日未明、北海道の十勝沖を震源とするM8.0の強い地震が発生した。

当時、国営かんがい排水事業芽室地区ではパイプラインの通水試験を行っており、地震発生時刻には、管路途中の空気弁地点に圧力センサーを設置して1分間隔で管内水圧を観測していた。⁷⁾

この地震により、施設近傍の地震観測所で震度5弱の揺れが観測され、管内水圧の観測データには地震発生に対応した水圧変動が記録された。

地震発生当時、配水系パイプラインの2系統で通水試験を行っていた。一方の系は延長約3km、口径200~300mmで満水状態にあった。もう一方の系は延長約2km、口径600~700mmで管内に自由水面が存在していた。両系統はともに満水時の静水圧が約1MPa、ダクタイル鋳鉄管製のクローズドパイプラインである。

満水状態にあった系では、本震発生直後に図-11に示す管内水圧の変動(水撃圧の発生)が確認された。

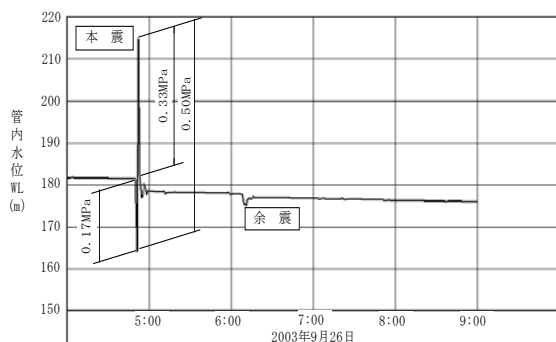


図-11 管内水圧の変動状況(満流管路)

一方、管内に自由水面があった系は図-12に示すとおり、本震発生直後から圧力センサーが故障して欠測になった。また、本震から約80分後に発生し震度4を記録した最大余震では、図-13に示すような空気弁体の周期的な上下動が確認された。

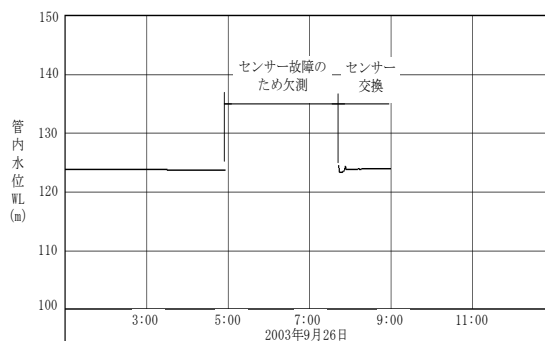


図-12 管内水圧の変動状況(自由水面あり)

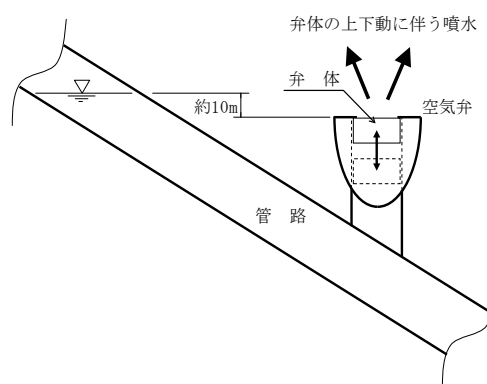


図-13 余震で確認した空気弁の動揺

満水だった系の水圧変動は、観測記録から設計水圧の範囲にあったことが確認された。一方、管内に自由水面があった系の水圧変動は、地震直前の水理条件や空気弁の動揺を考慮した数値シミュレーションにより、圧力センサーの計測範囲(2MPa)を超えた可能性が示された。また、対象地域の地震動の特徴として、管軸方向に大きな揺れが起こった可能性に加え、周期2~6秒程度のやや長周期帯域といわれる振動成分が卓越していたことが判った。

地震発生当時の管内の水理条件や、推定される水圧変動の大きさおよび地震動の特徴から、管内に自由水面が存在する系の水圧変動の要因として、スロッシング現象の発生が推察された。スロッシング現象とは、水槽などの貯留水面の1次固有振動周期と地震動など外力の振動周期が一致した場合に水面の動揺

が発生し、共振して動揺が増幅する現象である。

本事例では、推定された水圧変動量の割に施設の被害は軽微なものだった。これは、対象施設が設計水圧 1.4MPa 程度と比較的高耐圧の施設だったことや、高水圧の作用が短時間だったことなどが要因と思われる。しかし、より低耐圧な施設の場合は、同様の現象によって施設に重大な影響を及ぼす可能性が考えられる。

農業用パイプラインは、非かんがい期の通水停止や安全管理の一環としての一部落水により、管内に自由水面が存在することがある。このとき、管内水面の1次固有振動周期と対象地域で過去に発生した地震動の卓越周期が一致する場合は、とくに、低耐圧の管路やその付帯施設では、スロッシングの発生に伴う施設への影響が懸念される。管理面からの対応としては、施設機能維持用水として通年の通水管理（満水管理）を行うことが、事故防止のための有効手段の一つと考えられる。

このように、地震発生時に偶然捉えられた少ない情報でも、上記のような知見が得られるなど、管内水圧監視は施設の耐震性能の向上においても有用な情報を与えるものである。ただし、地震の発生日時を当てることは非常に難しく、地震による水理的挙動を捉えるには観測機器の常設が不可欠である。

6. 実管理に対応した監視システム

通水試験に用いた監視システムは、仮設型の簡易な機器構成であり、電源装置には車載用バッテリーを用い、通信回線は一般の携帯電話回線を使用していた。また、データの収集・処理は、試験現場で携帯用のノート型パソコンで行っていた。

これに対して、実管理に対応した監視システムは、通常、常設・常時監視型になるため、継続監視に伴う通信費の増大に配慮した通信回線の選択が最大の課題である。

また、情報の収集と処理は一般に管理センターで行うため、水路巡視員等に対しては、これとは別に情報把握の手段が必要になる。

これらを踏まえ、実管理に対応した常設型の管理システム構成を次頁図-14に示した。

まず、課題の通信回線については、現状、パケット方式でデータ伝送を行う Dopa 網の利用がコスト面で有利である。Dopa 網は通信費用が抑えられる反面、回線維持コストで割高になるが、これを開設・維持する IDC 事業者などの利用によって問題は解決される。

次に、水路巡視員等への情報提供については、インターネットを利用した情報閲覧や E-mail による警報の通知で対応している。

この管理システムは写真-1に示すとおり、開水路を対象とした水管理システムとして既に整備実績がある方式であり、テレメーター装置などを用いた従来の管理システムに比べ、建設費や維持管理費が格段に安価で、所要の性能を十分に備えている。



写真-1 観測装置の設置例

なお、通信回線については、現状の携帯電話通信のほか、地震等の広域かつ大規模な災害時における通信確保や、きめ細かい観測に伴う大量のデータ伝送などを考慮すると、今後、サービスエリアの拡大が予定されている mcAccess e (800MHz 帯デジタル MCA 無線機) などの利用も有効となる。

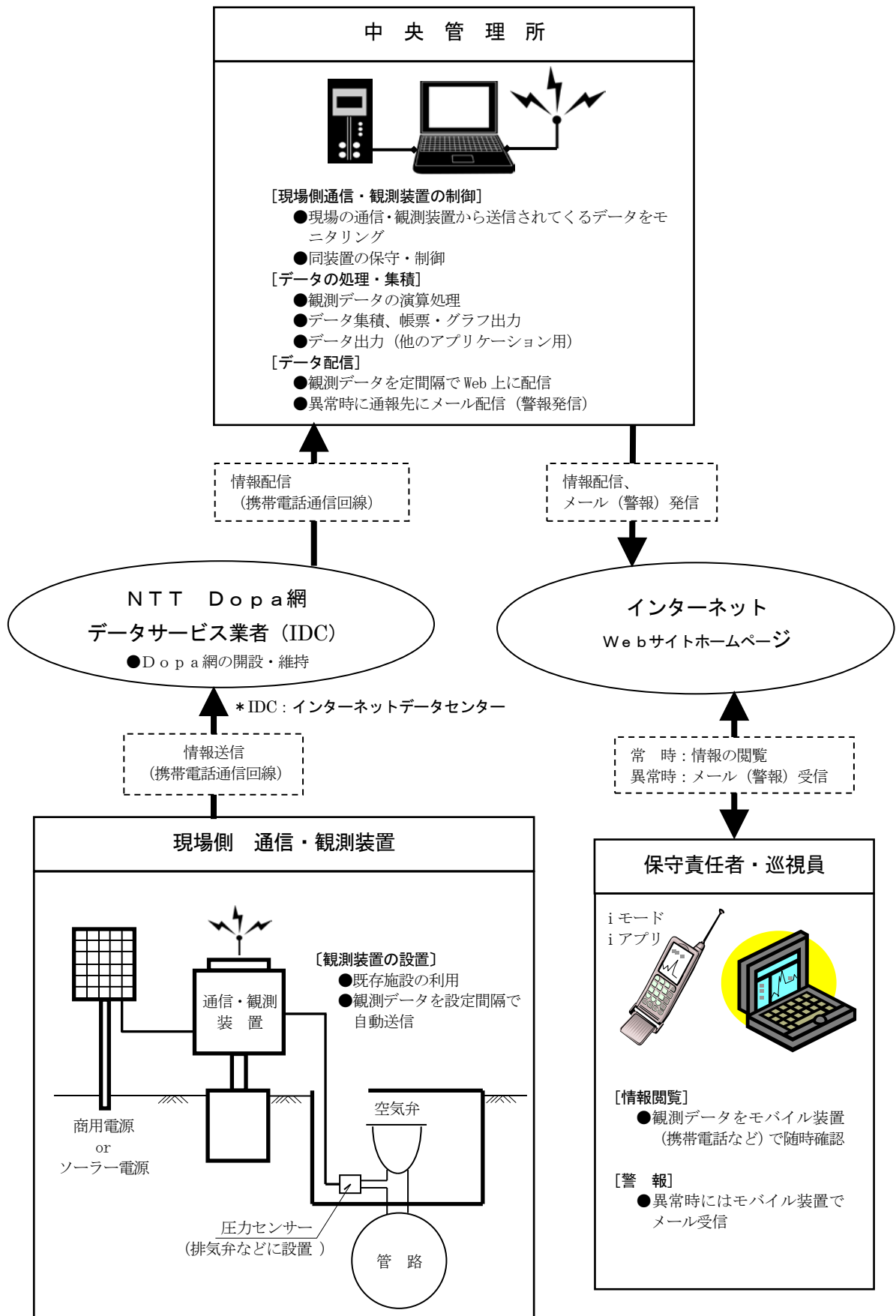


図-14 監視システム構成図

7. おわりに

地震等の自然災害が多いわが国では、構造物に高い安全性能が求められる。例えば、液体を貯留する貯水槽の設計には、地震動に対する貯留水の応答性が考慮される。しかし、同様に液体を貯留するパイプラインについては、水理挙動に関する情報量の少なさから、水の応答性については不明確な部分が多いのが現状である。

パイプライン事故の要因としては、自然災害のほか、利水管理操作に伴うサージングやウォーターハンマなどの非定常的な水理現象の影響も指摘される。

水利組織の大規模化に伴い有事の被害拡大が懸念される農業用パイプラインでは、安全性能の向上が急務である。対応として、現状では不明確な部分が多い地震動や施設の管理操作に伴う水理挙動を精度良く解明し、その対策を講じていくことが重要と考える。

近年は IT の発達によって高性能な観測機器や情報通信網が利用し易い環境にある。今回紹介したシステムも、市場にある技術を利用して当社が開発したものであり、このような監視システムの整備によって、パイプラインの水理挙動に関する膨大な情報の蓄積と、それによる分析精度の飛躍的な向上が期待できる。パイプラインにおける水理挙動の高精度な解明は、施設の管理技術面だけでなく、施設設計や施工技術面からも安全性能の向上に資する重要な課題であり、現象を捉える監視システムの整備・普及が不可欠といえる。

近年は、土地改良施設の維持管理にあたり、用水の効率的利用や施設の安全性確保に加え、経費の節減も強く求められている。このため、管理システム等の導入は、管理レベルの向上とともに管理組織の財政や組織力に特に配慮すべきであり、当社では、IT、高度施設管理、省労力、省コスト等をキーワードに、これらに対応した監視システムの開発と性能の規定化に向け、日夜研鑽を重ねております。

謝 辞

本報文の執筆にあたり、業務報告成果の転載等について、多分なるご理解とご協力を頂きました。独立行政法人北海道開発土木研究所農業土木研究室、ならびに北海道開発局帯広開発建設部帯広農業事務所の皆様には、ここに記して厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 徳井 順ら：北海道の水管理システムにおける IT の活用－携帯電話通信技術を活用したパイプラインの安全管理－，農業土木学会誌 Vol. 72/No. 6, pp. 29～32 (2004)
- 2) 農林水産省構造改善局総務課施設管理室：基幹水利施設指導・点検・整備マニュアル（パイプライン編） p. I-1 (1995)
- 3) 阿部匡弘ら：パイプラインにおける弁類の安全操作方法の検討手法－実測データの活用による管内発生水撃圧の非定常流況解析－，第 53 回農業土木学会北海道支部研究発表会講演集，pp. 16～19 (2004)
- 4) 吉野・栗田：管水路（パイプライン）の設計手法（その 5）中心差分法を用いたパイプライン非定常水理解析，ARIC 情報第 42 号，pp. 5～22 (1996)
- 5) 北海道開発土木研究所農業土木研究室：地震による管内発生水撃圧の検討業務報告書 (2004)
- 6) 植屋賢祐ら：「'03 十勝沖地震」に伴う管内発生水撃圧の分析，平成 16 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集，pp. 800～801 (2004)
- 7) 北海道開発局帯広開発建設部帯広農業事務所：平成 15 年度施行芽室地区通水試験業務報告書 (2004)