

農業用水路更生の設計の考え方と課題

独立行政法人 農業・食品産業技術総合研究機構
農村工学研究所 施設資源部
土質研究室長 毛利 栄 征



1. はじめに

農業用のパイプラインの半数近くの路線は供用年数が20年を超えており、早急に老朽化対策を講じる必要がある。老朽化の進んだパイプラインの更新方法については、既にいくつかの技術開発が進み、下水道管路などの更生に施工実績を有している。また、一部については、大口径の幹線パイプラインへの適用事例も報告されてきており、着実にその実績と信頼性を積み上げているように思われる。

農業用のパイプラインの多くは、高位部の水源地から圃場までの長延長に亘って効率的に用水を配水するために、圧力管路としての機能を有している。また、営農上実施する水管理によって、一時的に大量の用水を供給することから、パイプラインには静的な圧力だけではなく水撃圧が発生する。このため、長大なパイプラインにおいては、地形の変化点や曲がり部に大きな圧力が作用することとなり、構造的なウィークポイントになっている。

このようなパイプライン全体の機能を総合的に回復し安全性を確保するためには、水理的機能、水利的機能、構造的機能などの基本的な機能を向上することが重要である。これらの個々の機能を回復するために、いろいろな補修工法や補強工法が開発されている。水理的機能の回復技術、特にコンクリートの管路の場合には、表面の摩耗、腐食防止のための被覆技術の開発が進められ、さらに高分子材料被覆によって構造的機能と水理的機能の両面の機能回復を実施するものも開発されている。構造的機能の回復・補修工法としては、(1)非開削改築工法、(2)敷設替え工法、(3)補修工法、に分類することができる。非開削改築工法は、パイプラインを掘起こすことなく既設の管内部に新たに管を構築するもので、構造的に危険な状態まで劣化が進行している場合にも適用で

きる。現在、施工実績を持つ工法としては、管内部に新管を構築する鞘管工法や製管工法、さらに、新しい管を挿入する工法や既設管を撤去しながら挿入するものなどがある。何れの工法においても、地盤の変状や作用する土圧などを精査することなく高い安全性と耐久性を維持することはできない。さらに、大規模な地震をも想定しなければならない状況において、単なる機能回復ではなく総合的にパイプラインの安全性を確保する更新技術の開発が重要である。

2. パイプラインの老朽度調査と更新

パイプライン網は全体として一体的な機能を果たしているため、個々のパイプの更生だけでなくシステムとしての役割を保全できるように老朽化対策を進めなければならない。局所的な機能回復だけではなく、水理・構造的にバランスの取れた系としての更生を実施することが必要不可欠である。このためには、系全体の詳細な老朽度情報が必要となるが、パイプの変形や磨耗量、亀裂状態などの基本的なデータを入手することが技術的に困難な状況にある。このため、どのような回復技術が最適であるのかという判断を合理的に下せない。最近では、地下レーダーを用いたパイプライン背面の空洞調査や超音波を用いたコンクリートの亀裂探査手法が実用化されてきているが、調査結果で得られるデータの質、量と設計技術の整合性が十分でなく、具体的な老朽パイプの合理的な更新設計や対策技術の選定に活かせないのが現状である。

3. 更生技術の現状と課題

老朽化の進んできたパイプラインについては、適切な時期に適切な保全を実施することが重要であるが、現状のパイプラインを掘削撤去して再構築する

のではなく、非開削のまま機能を回復する技術は工期短縮や工費の縮減に大きく貢献するものとして注目されている。鞘管工法や反転工法、製管工法は老朽管の内部に新たに管を構築するものである。これらの工法は、更生後の力学的な機構の違いから「自立管」「二層構造管」と「複合管」に分類され、それぞれの構造設計に独特の考え方を取り入れて運用している。新管と老朽管の一体性やたわみ性の評価とともに作用する土圧の扱いについては、設計指針を策定する上で重要な問題である。

3.1 パイプライン更生の考え方

(1) 水理的機能

新たに更生されるパイプラインの水理的な機能については、新管と同様に設計することが可能であるが、付帯構造物、すなわち、分岐部分やマンホールとの接続部、さらには、曲管部分の水理的な機能については、多くの問題を残している。曲管に挿入される更生管は既設の管に100%密着して通水断面を確保することが求められるが、場合によってはパイプ断面に生じる「しわ」によって断面が縮小し流下能力の低下や通水障害となることもある。このため、曲がり角度が大きい場合については、この部分を開削工法による別施工とするなどの対応が必要となる。

(2) 構造的機能

構造的な機能を回復するためには、既設管の残存強度と作用外力を設計要件として適切な更生材による機能回復を図ることが基本である。しかしながら、先にも述べたように現在の調査手法では既設管に残存している構造的な機能を適切に評価することが困難であるため、既設管の残存強度を全く期待しないで更生管ですべての外力を負担するとして、設計するケースが多い。既設の老朽管を貫通するような亀裂が発生している場合や将来の劣化状況が想定される場合においても、大口径のパイプを除いてコンクリート管の部分的な管片の存在によって、内挿される更生管は何らかの力学的な支持を受けて、より安定な状態に維持されると考えることは、それほど大きな違和感はない。この特性は、小口径のパイプほど顕著に現れると思われる。また、同時に周辺地盤の変形や土圧の評価についても考え方を統一しなければならない。

老朽管に限らず地中に埋設されているパイプラインの構造的な安定性を確認するためには、パイプに

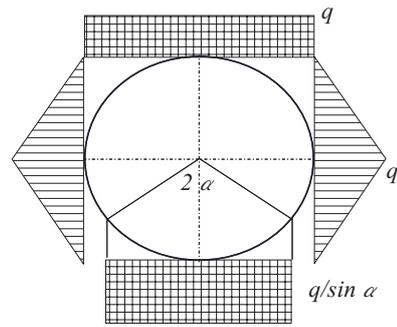


図1 下水道協会で採用する土圧分布

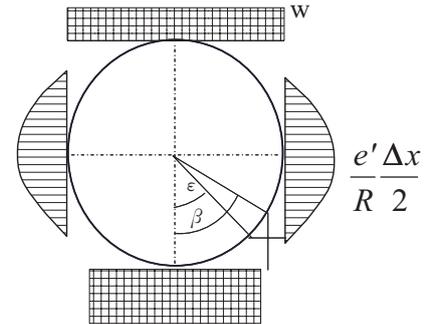


図2 IOWA 公式に基づく土圧分布
(農林水産省基準等)

作用している土圧分布とその大きさを評価することが不可欠である。パイプラインの構造的な安全性はパイプと地盤の相互作用によって決まると言っても過言ではない。

パイプに作用する土圧については、下水道分野の設計手法と水道、農水、石油、その他の分野で用いる分布形状に大きな違いがある。このように、統一的设计手法が確立されていないことが、管路の更新技術の開発や事業拡大の大きな障害になっている。

1) 下水道分野の設計手法 (JSWAS K-1)

下水道分野の構造設計手法では、パイプラインの深度および路面の活荷重に起因する荷重と基礎の反力によって生じる管の最大曲げ応力と管のたわみ量が許容値位内になるように管材料を選定する。このとき、パイプラインに作用する土圧分布は、地盤条件や埋戻し土の締固め度、材料などに関係なく図1のように設定している。鉛直土圧は管幅に作用する等分布荷重とし、側面の水平土圧は鉛直土圧の最大値をピークとする三角形分布を採用している点に特徴がある。

2) 農水、上水道分野の設計手法

たわみ性のパイプに対する構造設計手法としては、欧米でスタンダードとなっている IOWA 公式をパイプラインの設計方法として採用している。この手法は、1900年初頭からの室内実験によるパイ

ラインに作用する土圧の解明や大規模な実証試験による挙動観測などを経て構築されたもので、パイプラインに作用する土圧分布は図2のように設定している。鉛直土圧は管幅に作用する等分布荷重としているが、側面の水平土圧は管の水平変形量によって発生する受働土圧として扱い、中心角100度の放物線分布であるとする点に特徴がある。このため、水平土圧の大きさはパイプの変形を拘束する地盤剛性の影響を大きく受けることを前提とした設計手法となっている。具体的には、埋戻し材料の種類やその締固め度などによって設計で用いる反力係数を調整することとしている。

このほかに ASTM (ASTM F-1216 樹脂含浸チューブの反転および硬化による既存の配管、導管類の再生に関する標準方法) の設計手法がある。

3) 設計式の考え方の相違と課題

上記の設計手法は、たわみ性パイプラインの設計に用いられるもので、その前提としている土圧分布形状に相違があることを示している。下水道分野と農水・上水分野では、パイプラインに作用する鉛直土圧や管底面の基礎反力土圧については同じ考え方であるが、管側部に作用する水平土圧は異なった考え方になっている。すなわち、IOWA 公式を用いる方法は、パイプラインの側部に作用する水平土圧による変形抑制効果を変形量に応じて見込むのに対して、下水道式ではその効果を一定値として安全側の設計となっている。これらの、設計上の考え方の違いは、新設のパイプラインと同様に老朽管を更生する場合にも踏襲しており、更生管の設計方法として統一的な考え方にいたっていないのが現状である。

パイプの水平たわみ量は、IOWA 公式によって以下のように地盤の反力係数 e' と関連付けられる。

$$\Delta X = F \frac{2K \cdot W_w \cdot R^4}{E \cdot I + 0.061 e' \cdot R^3} \dots (3.1) \text{ 式}$$

ここに、

- e' : 基礎材の反力係数 (kgf/cm²)
- ΔX : 水平たわみ (cm)
- R : 管厚中心半径 (cm)
- W_w : 活荷重による鉛直荷重 (kgf/cm²)
- K : 基礎の支持角によって決まる係数
- F : 荷重による変形遅れ係数
- E : 管材のヤング係数 (kgf/cm²)
- I : 管軸方向を軸とし、管延長1cm当たりの管壁の断面二次モーメント (cm⁴/cm)

この e' は Spangler が指摘しているように、単純な地盤の変形試験から求め得るものではなく、実証的な埋設試験から逆算しなければならない。(3.1) 式は、パイプのたわみ量を外荷重とパイプの曲げ剛性、地盤の剛性から求まることを表しており、地盤とパイプの相互作用の結果としてバランスしたパイプのたわみ量が決定されると解釈することもできる。(3.1) 式を次のように書き下すと、

パイプのたわみ量 =

$$\frac{\text{外荷重因子}}{\text{パイプの剛性因子} + \text{地盤の剛性因子}} \dots (3.2) \text{ 式}$$

パイプのたわみ量は一定の外荷重に対して、パイプ、あるいは地盤の剛性を適切に設定することで、所定の値内に収めることができることを意味している。このような考え方に基づいて更生管の挙動を表現する場合、図3に示すように老朽管と内挿管の曲げ剛性を向上させる方法と地盤反力が大きくなると考える方法がある。

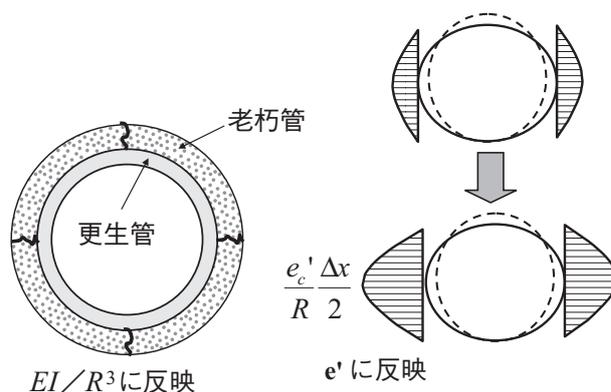


図3 更生効果の構造設計への反映方法

PC 管などの剛性管は、劣化の進行に伴って管体に亀裂が入り周辺の土圧や水圧によってパイプに変形が生じる。しかしながら、このように老朽化が進んだPC 管やヒューム管などの剛性管を管渠更生(内部に新管を挿入)したものをたわみ性管として考えることができるのかどうかについても、十分な実験データの蓄積がない。本来、パイプラインに対する剛性管とたわみ性管の区分は、管種によって決まるのではなく、周辺地盤や埋戻し地盤の剛性とパイプラインの剛性の相対的な関係から決まるものである。このパイプの変形性能に関しては Allgood が図5のような指標を示している。この図から判断すると、パイプの剛性が地盤の剛性に比べてかなり

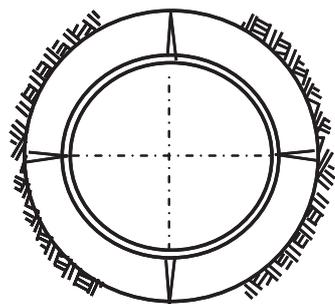
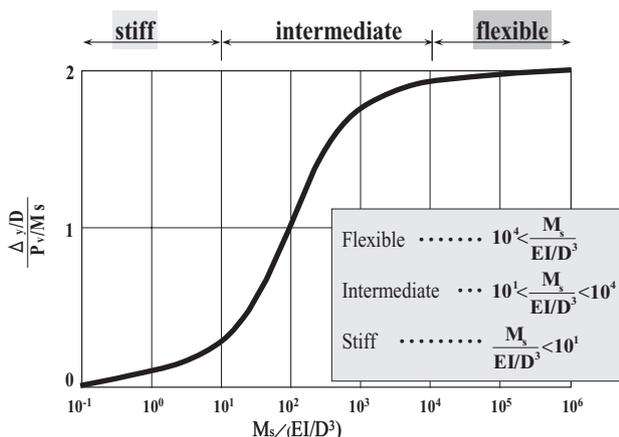


図4 亀裂が貫通した終局状態の老朽管



$$E_s = \left[\frac{(1-2\nu)(1+\nu)}{1-\nu} \right] M_s = \tilde{C} M_s$$

図5 パイプのたわみ指標 M_s は地盤の拘束弾性係数

小さい場合にたわみ性に属するが、既設の老朽管の剛性が残存している場合には、中間的な領域か剛性管に近い挙動を示す可能性が高い。さらには、更生後に新たなたわみが発生しない限り、受働的な土圧が作用しないのであるから、土圧に対する構造設計よりも地下水圧が更生管に作用した場合の安全性の確保が重要となる。一方、既設管に亀裂が入り完全に分離したような状況、すなわち、既設管の上下左右に貫通亀裂が入っているような状況で更生されたものについては、その曲げ剛性は新たに既設管内部に設置された更生材に多くを依存することになるので、全体としてはたわみ性管としての挙動を示すことが予測される。

土中に埋設された更生管に上載荷重を负荷した場合の荷重とパイプのたわみ量の関係を模式的に図6に示す。この図からパイプのたわみ量が発生しない状態でも荷重増加が見込めることが外推的に示され、さらにパイプがたわむことによって荷重増加が進んでいることが理解される。すなわち、老朽化の進んだ原管を更生した場合、内挿した管の影響に

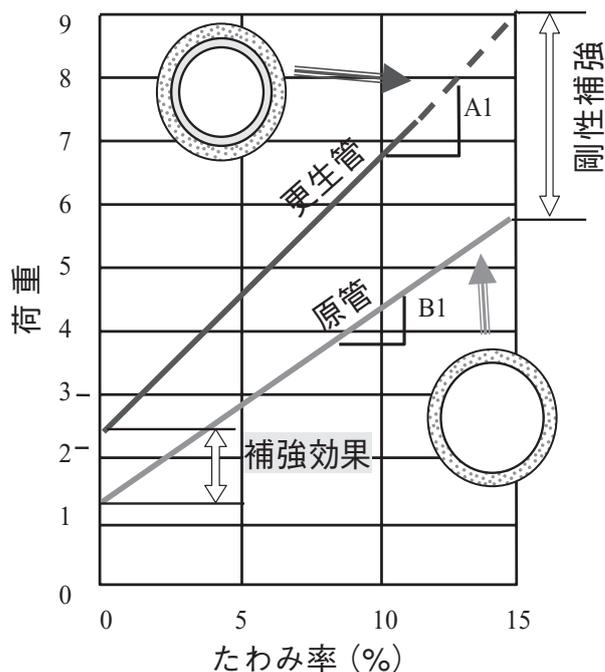


図6 更生された管の土中挙動と老朽管の比較

よって、曲げ剛性が改善されていることがわかる。このような更生管の挙動を補強効果として合理的に設計に取り込む手法を整理することがまず必要である。現行の構造設計手法の適用性の限界についても慎重に検討しなければならないが、内挿される管の剛性や品質のばらつきなどの問題も含めてさらに多くの実験的な検証が必要である。

4. まとめ

以上のように、パイプラインの老朽度によって、更生された管が剛性管として挙動するのか、たわみ性管として挙動するのが大きく左右される。現状の老朽管の調査手法では、このような管の残存強度を的確に求めることはできないが、ひび割れの分布や幅などの量的な指標を用いて、いくつかの階層に力学的老朽度分類が可能となれば、その残存強度を加味した合理的な設計体系を構築することが可能である。今後、老朽管の効率的な更新と高い安全性を確保するために更新方法に関する研究は、既設管の調査結果をいかに設計に生かせる情報として整理し、また、長期的な安全性を合理的な考え方によって予測するための手法開発などを系統的に展開する段階に来ている。次号は、管渠更生の具体的な施工面での課題となる事項について紹介し、全体の総括としたい。