

技術報告③

鋼管パイプラインの新技术について

JFE エンジニアリング株式会社

藪口 貴啓 長谷川 延広 佐藤 具揮

1. はじめに

農業水利施設は農業生産の維持発展を図っていく上で極めて根幹的なインフラであり、基幹的水路が地震等の災害や老朽化の進展により機能不全となった場合の影響は極めて大きい。

そこで本稿では、パイプラインの強靱化や持続性強化に資するものとして、鋼管に関する以下の2つの技術について概説する。

まず、これまで耐震構造上のウィークポイントとなる管とコンクリート構造物との接続部における大規模地震対策として開発した「大変位吸収鋼管」について、国営事業における施工事例を交えて、その概要や幅広い適用の考え方について紹介する。

さらに、近年管路更生工事で採用事例が増加している鋼管内挿による鞘管工法、いわゆるパイプ・イン・パイプ工法（以下、PIP工法という）に係る技術動向について述べる。なお、2021（令和3）年6月に改訂された土地改良事業計画設計基準・設計「パイプライン」¹⁾（以下「設計基準パイプライン」という）においては、鋼管（液

状エポキシ塗装管）の流速係数C値が改定され、従来に比し同一流量での縮径が可能となった。このため、鋼管の内挿によるPIP工法については、水理設計、経済性の両面からその適用可能性がますます広がりつつあるところである。

2. 大変位吸収鋼管

2.1 大変位吸収鋼管の開発

弁室や調整池等のコンクリート構造物と管の接続部においては、地盤沈下や地震時の地盤振動対策として伸縮可とう管を適用することが一般的であったが、近年では想定を大きく上回る地盤沈下や地震時の地盤変状が発生し、伸縮可とう管の脱管による漏水被害が数多く発生している。

そこで、大規模地震時に想定を超えて発生する地盤と構造物との大きな相対変位を吸収し、通水機能を維持することのできる「大変位吸収鋼管」を開発した。大変位吸収鋼管は、図-1.1に示すように、本管と同厚・同材質の

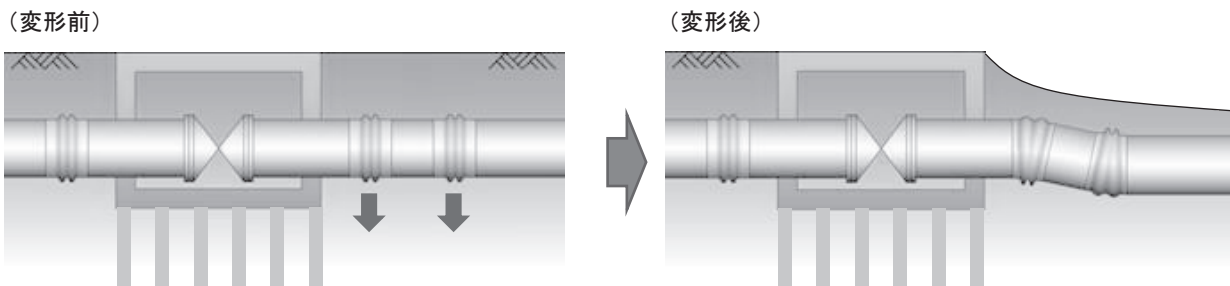


図-1.1 大変位吸収鋼管

鋼管に複数の波形形状部を設けた特殊鋼管であり、同部が直管部に先行して変形し、相対変位を吸収するため、本管の座屈をはじめ、亀裂の発生や脱管を抑止し、パイプラインの通水機能維持が実現できる。

なお、波形部の形状については、構造物との接続部に設置された大変位吸収鋼管の変形が当該構造物に与える作動反力を極力小さく抑えるよう設計している。

2.2 大変位吸収鋼管の性能確認実験

大変位吸収鋼管は、曲げ実験および塗覆装追随性確認実験などの実験を実施し、性能を確認した上で許容値を設定している。また、変形後の地震による影響についても繰り返し変形実験により安全性を確認している。本稿では、繰り返し変形実験について紹介する。

・繰り返し変形実験

大変位吸収鋼管が地盤沈下により変形した後に、地震による繰り返し変位が生じた場合の波形部の変形性能を確認するため、図-1.2、

図-1.3に示すように繰り返し変形実験を実施した。実験では、図-1.2に示すように地盤沈下として鉛直方向に変形させたあと、図-1.3に示すように地震による地盤振幅として水平方向に5回繰り返し変位を与え、波形部に亀裂や漏水の発生がないことを確認した。

2.3 大変位吸収鋼管の設計

大変位吸収鋼管の設計に際しては、設定した想定変位量をもとに以下を考慮してFEM解析を実施し、目的に応じた最適な形状および山数の決定ならびに配置設計を行う。

- ・設計変位量に応じた山数の設定
(標準仕様では1山タイプ：400mm，2山タイプ：800mm，3山タイプ：1,200mm)
- ・構造安全性照査(最大ひずみまたは応力度が、許容ひずみまたは許容応力度以下であることの確認)
- ・防食上の安全性照査(塗覆装が追随可能な波形部の曲げ角度 9.4° 以下)

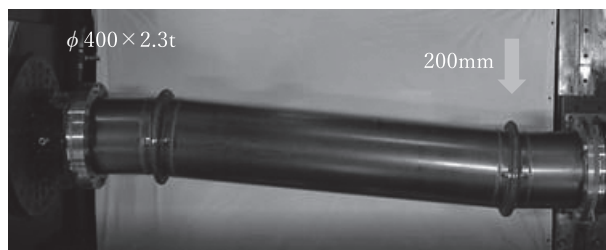


図-1.2 鉛直変位

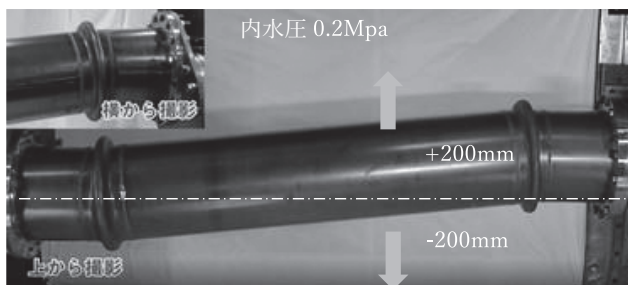


図-1.3 繰り返し水平変位

2.4 大変位吸収鋼管の施工事例

大変位吸収鋼管は、これまで多くの国営事業において採用されており、その適用目的は大規模地震対策として構造物との接続部や液状化地盤、地質変化点に設置されるケースに加え、泥炭地域における地盤沈下対策としても活用されている。

(1) 九頭竜川下流地区（地震時の液状化に伴う側方流動対策）

写真-1.1は九頭竜川下流地区に設置された調圧水槽建設工事である。本工事で採用された「大変位吸収鋼管」（写真-1.2参照）は、調整水槽と管路との接続部において、地震時の液状化による側方流動（通常の設計値の2倍）が発生しても漏水することなく、パイプラインの通水機能を保持することができるよう設置されたものである。



写真-1.1 調圧水槽外観



写真-1.2 大変位吸収鋼管
(調圧水槽流入・流出管：口径 1,650mm, 800mm)

(2) 篠津中央地区（泥炭地盤対策）

篠津中央地区は、石狩川下流域の泥炭地帯に位置しており、大きな地盤の不同沈下が長期間に渡り発生することで知られている。写真-1.3および図-1.4に示す八幡揚水機場から調圧水槽を繋ぐ配管は布設後20年以上経過しているが、地盤沈下の収束がみられず、既設伸縮可とう管の設計値を超える変形423mmが発生しており、今後も地盤沈下は進行していくものと想定された。そこで、大規模地盤変状に対しても対応可能な「大変位吸収鋼管」が揚水機場および調整水槽と連絡配管（ ϕ 2,000mm）との接続部に設置された。



写真-1.3 八幡揚水機場外観

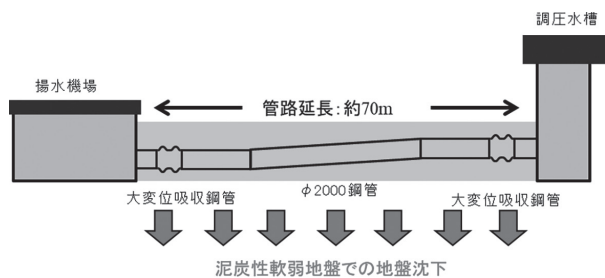


図-1.4 泥炭地盤における大変位吸収鋼管の設置
(口径 2,000mm)

(3) 香川用水（流動浮上対策）

香川県三木町に位置する新川サイホン（PC管 ϕ 1,200mm, 延長1,364m）は、PIP工法により全線にわたり鋼管（ ϕ 1,100mm）に更新する計画であった。しかしながら、既設管の一部区間に、過去の地震による地盤液状化に伴う流動浮上の影響と思われる著しい不陸の発生が認

められた。今後も同区間（約 50m）では、地震時に液状化現象による流動浮上で管路に損傷が生じる可能性があることから、その対策として図-1.5に示すように不陸区間の始終点近傍に「大変位吸収鋼管」が設置された。図-1.6はFEM解析による大変位吸収鋼管の変形を示しており、流動浮上に伴う相対変位を波形部の変形で吸収し、管路（直管部）における座屈の発生を防いでいる。写真-1.4は立坑内への大変位吸収鋼管の搬入状況を示しており、波形部の高さを調整することで、既設管内への設置を可能としている。

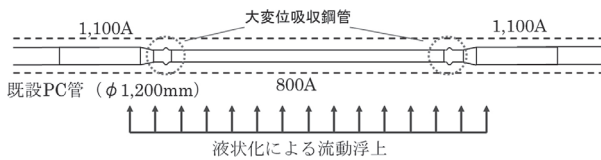


図-1.5 液状化による流動浮上対策

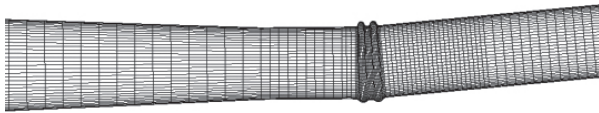


図-1.6 大変位吸収鋼管の変形

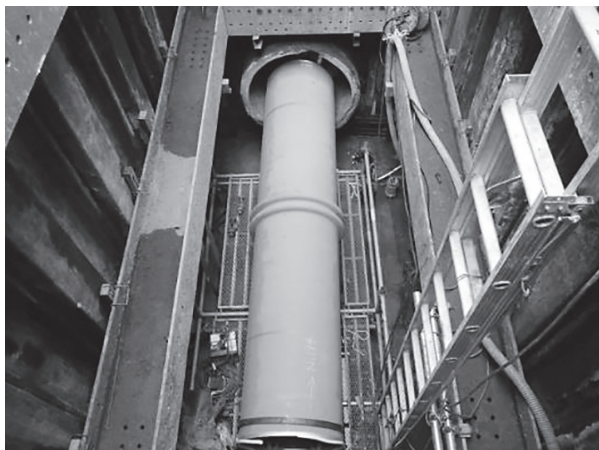


写真-1.4 既設管内搬入状況

(4) 東播用水（地質変化点）

本事例は、東播用水の既設管水路（φ2,600mm ヒューム管）内に PIP 工法を用いて鋼管を布設する工事である。図-1.7に示すように基盤面が傾斜する不整形地盤の区域があり、既設推進区間には管路が基盤面から表層に変化する地層変化部が存在する。管路が硬い基

盤面に布設されている場合、地震時の地盤変位は非常に小さいため、管路への影響は極めて小さいが、管路が基盤面と表層に跨って布設されている場合には、両層間に相対変位が生じ管路に変形が生じる。そこで、地層変化部に発生する地盤相対変位の対策として当該区間に変位吸収鋼管が設置された。図-1.8は数値解析モデルを示しており、大変位吸収鋼管の波形部を地質変化点に設置することにより、基盤面と表層との地盤の相対変位 104mm を波形部で吸収することができる。

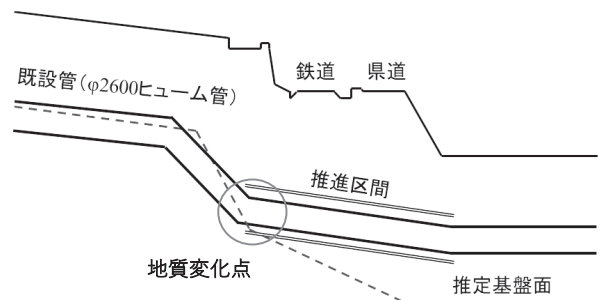
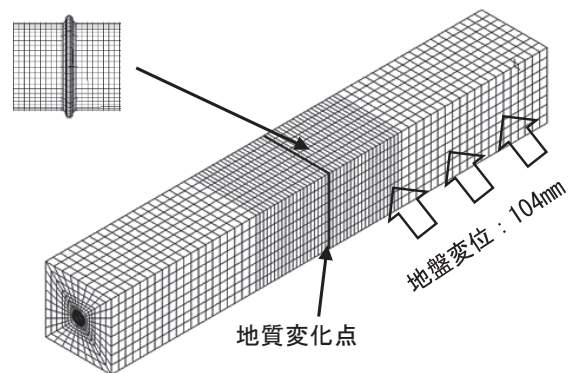


図-1.7 配管と推定基盤面



直管および大変位吸収鋼管

口径：φ1,800mm

管厚：9mm

材質：SS400

図-1.8 地質変化点での大変位吸収鋼管の変形
(口径 1,800mm)

2021（令和3）年6月の設計基準「パイプライン」改定では、パイプラインの被災の大部分はウィークポイント（構造物との接続部や屈曲部、液状化地盤、軟弱地盤等）に集中していることから当該箇所への対策を十分に行うことが

重要として耐震設計が充実されている。大変位吸収鋼管はこのウィークポイントへの対策として大きな役割を果たせるものと考えている。

3. 鋼管を内挿するパイプ・イン・パイプ工法に係る技術動向について

PIP 工法は、既設管路の中に非開削にて新設管を挿入する工法であり、老朽化対策と耐震化対策を兼ねた工法である。以下に鋼管による PIP 工法の特徴、既設 FRPM 管の改修技術の開発概要、およびエポキシ樹脂塗装鋼管の流速係数 C 値の改定について述べる。

3.1 鋼管による PIP 工法の特徴

(1) 耐震管路の構築

鋼管による PIP 工法では、既設管の残存強度に期待しない自立管としての構造設計を行う。このため、鋼の優れた材料特性と溶接による一体構造管路構築により、抜群の耐震性を有する耐震管路へ生まれ変わることができる。

(2) 通水断面の確保

PIP 工法に使用する鋼管としては、一般的に

工場にて管状に製作された普通鋼管を用いるが、管軸方向溶接を現場で行う巻込鋼管を用いる場合も増えている。巻込鋼管は、PIP 工法の中では既設管に最も近い口径を確保できる利点がある。

普通鋼管を用いる場合は、既設管に対し 1 口径 (100mm) 程度小さい管径 (図-2.1 参照) になるが、巻込鋼管は、拡管後に既設管径により近い管径 (約 40mm ダウン) とすることができる (図-2.2 参照)。

(3) 立坑位置の選定が自由

鋼管は、既設管内で曲管を構築することが可能で (図-2.3 参照)、また、短管を用いることで曲がり部への新設管の搬入が容易となる。そのため、図-2.4 に示すように鋼管による PIP 工法は必ずしも曲管の位置に立坑築造を行う必要はなく、立坑位置の選定が自由である。さらに、非開削工法で立坑部のみの掘削作業となるため、土木工事費の縮減 (経済性) と併せて用地調整、交通渋滞の回避、建設廃棄物の発生抑制など環境に優しい工法である。

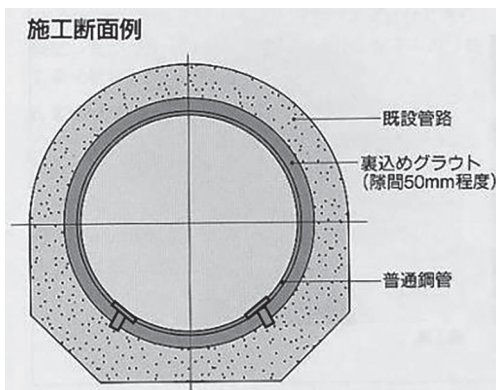


図-2.1 普通鋼管による PIP 工法概要図

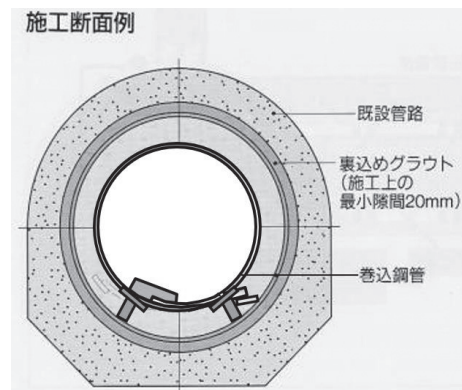


図-2.2 巻込鋼管による PIP 工法概要図

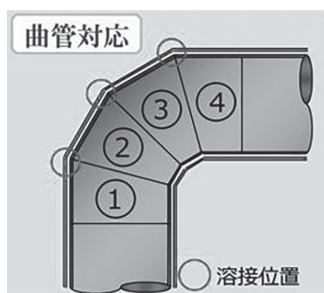


図-2.3 曲管部での PIP 工法適用例

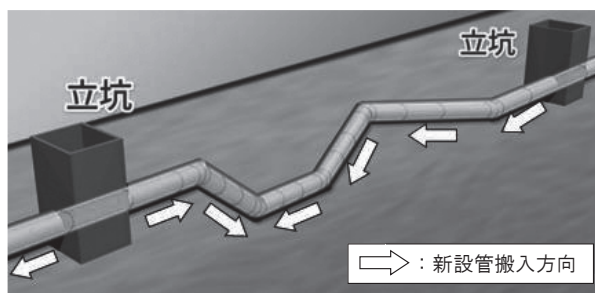


図-2.4 鋼管による PIP 工法のイメージ図

3.2 鋼管による既設 FRPM 管の改修技術の開発

既設管が FRPM 管の場合、内挿する鋼管の溶接熱による FRP 樹脂の燃焼や有毒ガスの発生などが懸念されたため、予備試験を実施し、安全な施工方法の検討を行った。各種試験結果から得られた知見に基づき安全性が確認された既設 FRPM 管内での PIP 工法は、既設管に対し 1 口径（100mm）以上小さい径の鋼管を使用し、隙間 40mm 以上を確保することを標準的な施工方法とした。また、既設管のへん平などにより隙間 40mm 以上を確保できない場合は、隙間 20mm 以上を確保し、溶接部には有効性の確認された耐熱材を施すこととした（図-2.5 参照）。

なお、本稿で紹介した技術開発の内容は、日本水道鋼管協会にて「鞘管工法計画・施工指針（WSP A-103-2021）²⁾」として制定、発行されており、以降、鋼管による既設 FRPM 管への PIP 工法の施工実績が着実に増加している。

3.3 エポキシ樹脂塗装鋼管の流速係数 C 値の改定

(1) エポキシ樹脂塗装鋼管の流速係数実験および調査

2021（令和 3）年 6 月以前の設計基準「パイプライン」では、内面に液状エポキシ樹脂塗装を施した鋼管の流速係数は、水理データが不十分

なことから、タールエポキシ樹脂塗装と同等として扱われていた。

そこで、日本水道鋼管協会では 2018（平成 30）年度から農業用パイプラインの事業現場で広く使われている液状エポキシ樹脂塗装および無溶剤形エポキシ樹脂塗装を内面に施した水輸送用塗覆装鋼管について、水理実験および実管路による調査を行い、水輸送用塗覆装鋼管の C 値を把握することとした。

まず、2018（平成 30）年度に（独法）水資源機構総合技術センターへ流速係数確認のための水理実験を委託し、前述した 2 種類の塗装鋼管（呼び径 300A）における C 値を得た。

次に、2019（令和元）年度に（独法）水資源機構木曾川用水総合管理所美濃加茂管理所管轄の供用中の液状エポキシ樹脂塗装鋼管路（呼び径 1100A）において圧力損失等を調査し、C 値について検証した。

最後に、2020（令和 2）年度に愛知県企業庁東三河水道事務所管轄の供用前の無溶剤形エポキシ樹脂塗装鋼管路（呼び径 900A）において上記と同様にて圧力損失等を調査し、C 値について検証した。

鋼管路におけるエポキシ樹脂塗装鋼管の C 値に関して、実験管路における水理実験および実管路における調査から得られた結果を表-1 および図-2.6 に示す。

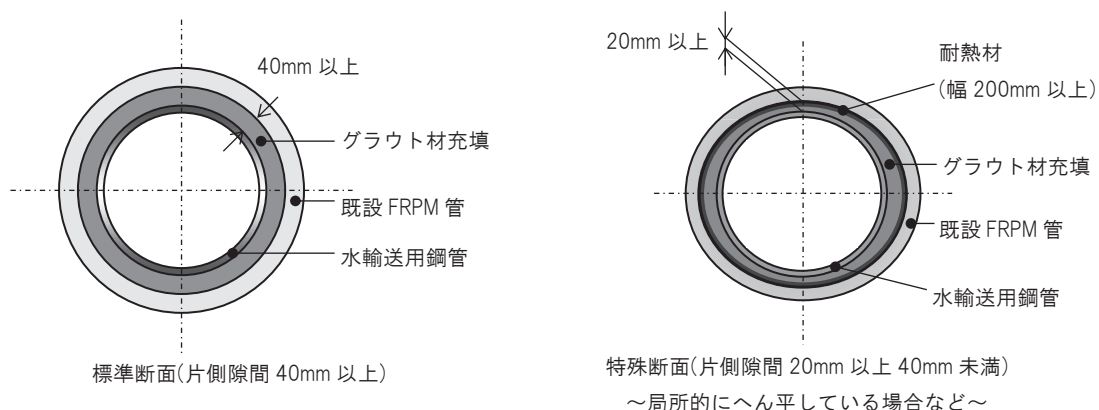


図-2.5 既設 FRPM 管への PIP 工法

表-1 水輸送用塗覆装鋼管のC値

内面塗装種別		C値		
		最大値	最小値	平均値
無溶剤形エポキシ樹脂塗装	実験管路 300A	167	156	162
	実管路 900A	163	158	161
液状エポキシ樹脂塗装	実験管路 300A	155	149	153
	実管路 1,100A	154	151	153

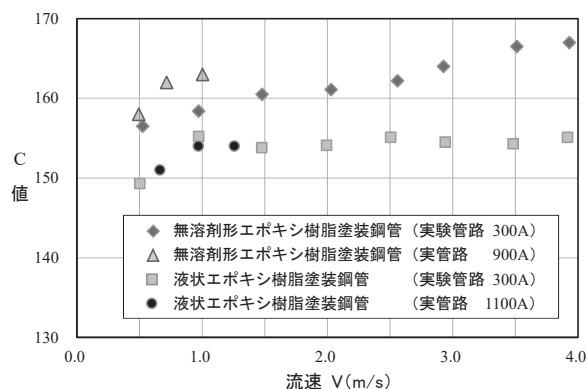


図-2.6 流速と流速係数C値との関係

(2) 設計基準「パイプライン」の流速係数C値の改定

農業用パイプラインの口径決定に際しては、 $<1>$ 式に示すヘーゼン・ウィリアムス (Hazen-Williams) 公式が使用されている。同式を管内径 D について誘導すると $<2>$ 式ようになる。

$$V = 0.849 \cdot C \cdot R^{0.63} \cdot I^{0.54} \quad <1>$$

$$D = 1.626 \cdot C^{-0.38} \cdot Q^{0.38} \cdot I^{-0.21} \quad <2>$$

ここに、

V : 平均流速 (m/s), C : 流速係数, R : 径深 (m),
 I : 動水勾配, D : 管内径 (mm), Q : 流量 (m^3/s)

鋼管路における流速係数 C 値は、2021 (令和3) 年6月の設計基準「パイプライン」の改定において、現場溶接部の内面塗装が実施可能な呼び径 800mm 以上については、暫定標準値として「 $C=150$ を適用してよい」と見直された。この改定内容は、前述したエポキシ樹脂塗装鋼

管の実験管路における水理実験および実管路における調査の結果も反映されたものと思料している。

$<2>$ 式からわかるように、パイプラインの所要口径は流速係数 C 値の 0.38 乗に反比例することから、 C 値を従来の $C=130$ から $C=150$ に変更した場合、同じ流量に対して口径を約 5.3% 小さくすることができる。例えば従来の設計で所要口径 2,000mm ($C=130$) であったものが、現行の設計では口径 1,900mm ($C=150$) へ 1 サイズダウンすることができ、管路の新設および更新時の工事費用の縮減、さらには CO_2 排出量の削減につながるものと期待される。

4. おわりに

以上、鋼管パイプラインに係る耐震対策や PIP 工法の新技術についてその概要を紹介した。今後とも、安全安心な農業水利施設の整備等に寄与できるよう、技術開発に取り組んでいく所存である。

引用文献

- 1) 農林水産省農村振興局整備部設計課 監修：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」, 2021
- 2) 日本水道鋼管協会：鞘管工法計画・施工指針 (WSP A-103-2021), 2021