

老朽管の改修方法に関する共同研究

第5回（最終回） 農業用水管に対する
単独管更生工法の適用における設計手法

日本管路更生工法品質確保協会では、独立行政法人農業工学研究所（現：農村工学研究所）が公募した共同研究課題「地中に埋設された老朽パイプラインの限界状態評価と補強工法の開発」に平成16年度から参画し、このほど研究が終了したため、本連載講座に報告をすることに至った。

現在、我国の主要な農業用水管路の延長は約4万5000kmに達するとされ、中小の水路を含めると約40万kmに及んでいる。

これらの中には、以前より管路更生工法が採用されているが、設計手法が確立されておらず、対応が様々であるのが現状である。そこで、「土地改良事業計画設計基準 設計『パイプライン』」の改訂にあたり、単独管更生工法単体での強度特性を明らかにするとともに、老朽管に更生された状態での埋設試験を行うことで、老朽管の強度への寄与率を求め、適切な更生管の強度（管厚）を設計するための資料を提供することを目的として、研究を行った。

本連載講座では、試験の内容について報告するとともに、農業用水管路に対する更生工法の適用における設計手法の一考察を提案・報告する。

第5回目（最終回）は「農業用水管に対する単独管更生工法の適用における設計手法」について説明する。

1. はじめに

これまでに、管片外圧試験やクリープ試験をはじめとする材料・力学試験と、土中での更生管と既設管の挙動を確認した埋設試験とについて、概要と考察を連載してきた。

今回は、これら試験の結果を受けて、農業用水管に対する単独管更生工法の設計手法についての検討をしていく。

2. これまでの試験概要と結果

2-1. 管片外圧試験

2-1-1. 試験目的

更生管の材料・力学試験を行い、製品の強度を確認すること。この試験結果よりクリープ試験・繰返し載荷試験の載荷荷重を決定した。

2-1-2. 試験結果

図-1に外圧試験で得られた荷重-鉛直たわみ率曲線を示す。図-1から、工法毎に違いはあるものの、

同工法における試験結果バラツキは少なかった。

また、この結果から各更生工法を“高剛性グループ”と“低剛性グループ”に分けて、それぞれから埋設試験に使用する工法を選定した。

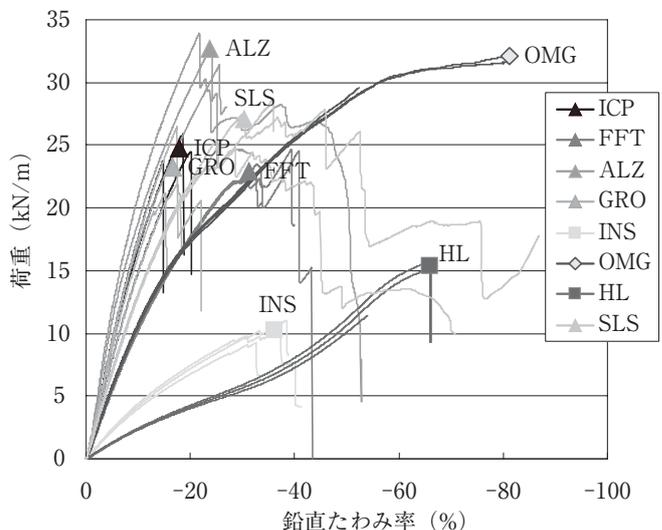


図-1 管片外圧試験 荷重-鉛直たわみ率曲線

表-1 クリープ試験結果
(鉛直たわみ率時間別増加)

工法名	鉛直たわみ率 (%)				
	35分～ 10時間の 増加	10時間～ 100時間の 増加	100時間～ 1000時間の 増加	1000時間～ 10000時間の 増加	35分～ 10000時間の 増加
ICP	-0.33	-0.41	-0.84	-1.20	-2.78
FFT	-0.24	-0.36	-0.61	-0.72	-1.94
ALZ	-0.33	-0.50	-1.09	-0.90	-2.82
GRO	-0.41	-0.44	-0.76	-1.55	-3.17
INS	-0.58	-0.64	-1.30	-1.58	-4.09
OMG	-0.86	-0.75	-1.08	-2.83	-5.51
HL	-0.30	-0.34	-1.11	-1.62	-3.37
SLS	-0.29	-0.24	-0.36	-0.45	-1.34

表-2 継手部曲げ試験結果

工法名	最大荷重 (kN)	最大角度 (°)	漏水状況
ICP	22.58	3.4	上部破断漏水
FFT	39.59	5.8	下部座屈漏水
ALZ	30.14	4.7	ヒューム管内部右上 部破断漏水
INS	22.66	2.8	上部中央破断漏水
OMG	21.60	12.3	なし
HL	7.57	11.8	なし
SLS	29.05	2.7	下部座屈漏水

2-2. クリープ試験

2-2-1. 試験目的

更生管に土圧等の安定した鉛直荷重が作用し続けると、長期的なひずみの進展、すなわちクリープ変形が問題となる。

本共同研究では、円管を用いた水中下でのクリープ試験により、地下水下に埋設された更生管のクリープ挙動の特性を検証することを目的とした。

2-2-2. 試験結果

各工法の初期変形と10,000時間経過後の変形量との差分から、クリープ変形率を算出し、表-1にまとめた。

表-1よりFFTとSLSを除く工法については、10,000時間後には初期たわみ率の2倍以上の変形を生じており、クリープ的な変形挙動を設計に取り入れる必要性が伺えた。

2-3. 継手部の曲げ試験

2-3-1. 試験目的

既設管継手部に施工された更生管について3点曲げ試験を行い、既設管継手部における曲げ特性および止水性能を確認した。

また、更生管として地盤沈下や地震時の縦断方向の変位への追従性を確認することを目的とした。

2-3-2. 試験結果

表-2に試験結果をまとめた。

表-2より、7工法は曲げ角度が10°を超えても漏水が発生せず変位追従能力が高い工法と、そうでない工法とに分けることができた。

最大荷重時の曲げ角度は、各工法とも、硬質塩化ビニル管φ300の使用限界角度2°00'以上であり、硬質塩化ビニル管と同等以上の屈曲性能を有していることを確認できた。

2-4. 更生管埋設試験

2-4-1. 試験目的

更生管単体と、既設管に施工した更生管を用いた埋設試験を行い、それぞれの土中挙動を詳細に検証し、既設老朽管の外圧強度への寄与効果を明らかにすることを目的とした。

2-4-2. 試験概要

試験は、2-1 管片外圧試験でグループ分けした“高剛性グループ”からOMG、“低剛性グループ”からINSを供試体として行った。

また、載荷荷重および載荷方法の違いにより、下記に示す3種類の載荷試験を実施した。

(1) 静的載荷試験-1

静的荷重 最大T-25後輪相当荷重まで、段階的に載荷。

(2) 繰返し載荷試験

繰返し荷重 土被り2m相当荷重～T-25後輪相当荷重の範囲で10万回(0.5Hz、エアバック)、100万回(2.5Hz、載荷板)の回数、速度で載荷。

(3) 静的載荷試験-2

静的荷重 鉛直たわみ率5%まで載荷。

2-4-3. 試験結果

どの載荷試験においても、老朽管の更生管に対する補強効果が確認された。

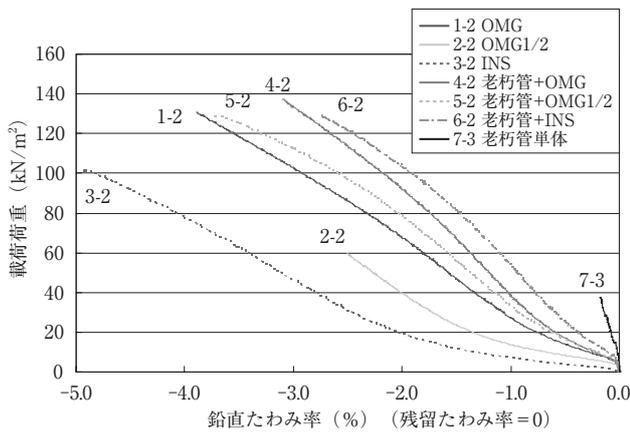


図-2 載荷荷重－鉛直たわみ率曲線
(載荷板・残留たわみ=0)

例えば、図-2に示す静的載荷試験-2の載荷荷重－鉛直たわみ率曲線を見ると、更生管単体よりも老朽管+更生管の方がグラフの右上側にあり、剛性が高い結果となった。

3. 農業用水管に対する更生工法設計手法

3-1. 概要

現在、農業用水管に対する更生管の構造設計は、既設管がないものと仮定して、新設管と同様に「土地改良事業計画設計基準 設計『パイプライン』平成10年3月 農林水産省構造改善局」（以下「基準書」とする）に準拠して行っている。

この本において、管路の構造設計は以下のような基準となっている。

管路については、基本設計で定めた条件下で、管体の横断方向及び縦断方向の耐圧強さ、移動、変形、水密性等について十分検討の上、適切に設計しなければならない。

3-2. 検討順序および内容

更生管路の構造設計は、設計条件として既設管の埋設深、活荷重、設計水圧等を確認して、荷重を決定し、続いて管体の横断方向の構造計算を行う。検討内容は、耐圧強さとする。

縦断方向の耐圧強さについては、管体にかかる荷重が均衡する場合が多く、そのため縦断方向の曲げモーメントが小さいため、検討を省略する。

参考として、図-3に新設管路の構造設計手順を示す。

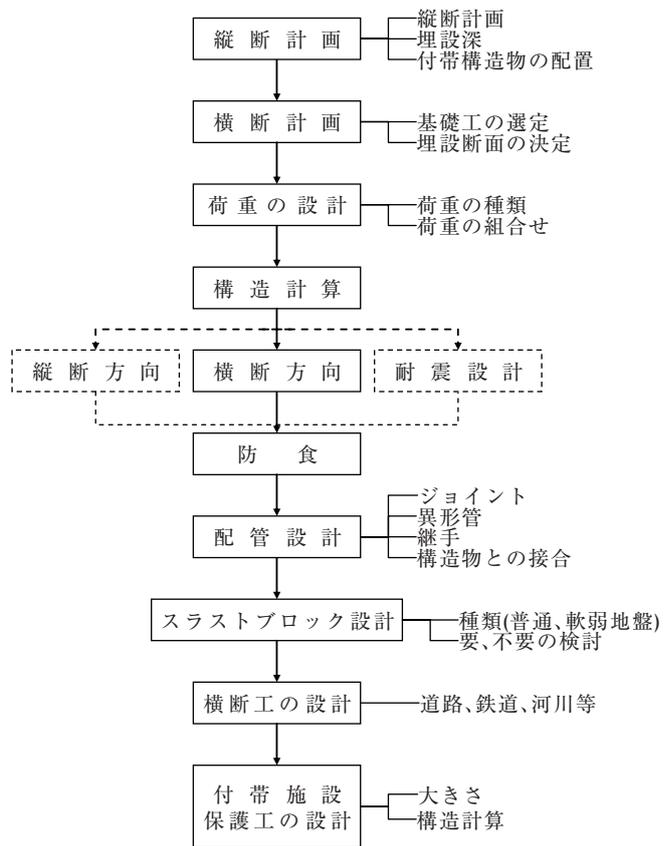


図-3 農業用水新設管路の構造設計手順（参考）

3-3. 荷重に対する安全性の検討

とう性管については、そのたわみ量の許容範囲を設定しておく必要がある。それは、たわみ量が許容範囲を超えると、必要な通水断面が確保できないことや、管体が座屈に至る場合があるからである。

「基準書」では、管体に発生するたわみを許容範囲内とするため、許容たわみ率（許容たわみ量/管圧中心半径×100(%)）を定めている。

締固め程度が施工上のバラツキによって変動することに対応して、たわみ量は変動する。このバラツキ幅を考慮したたわみ率を設計たわみ率とし、表-3に示す値を標準としている。

更生工法では、非開削工法なので埋戻しによるバ

表-3 設計たわみ率の標準

単位：%

締固めの程度	締固めⅠ	締固めⅡ
設計たわみ率	5	5
たわみ率のバラツキ	±2 (±1)	±1
設計たわみ率	3 (4)	4

注1) 締固め程度は、次のとおりとする。

締固めⅠ …… 締固め度90%平均

締固めⅡ …… 締固め度95%平均

注2) ()内は基礎材料に礫質土を使用した場合の値を示す。

ラッキは起こらないが、安全を考慮して“締めI”の値を採用することが一般的である。

3-4. 管体の横断方向の設計

管体の横断方向の設計では、管体に同時に働く内外圧の複合作用について検討し、これに対して十分安全であるように設計する。

3-4-1. 横断方向に生ずる曲げモーメント

管体では一般に管底部に最大曲げモーメントが生ずる。種々の荷重条件と基礎の支持条件において、延長1mm当たりの管の横断面に生ずる最大曲げモーメントを表-4に示す。

基礎の支持角を決定し、同時に作用する各設計荷重によって生ずる曲げモーメントを、表-4を用いてそれぞれ計算すれば、その代数和が管体の横断方向に生ずる曲げモーメントになる。

表-4の記号は、以下のとおりである。

W : 管体の単位面積に働く鉛直荷重 (N/mm²)

W = 鉛直土圧 + 活荷重、または軌道荷重
またはその他上載荷重

w₀ : 水の単位体積重量 (1 × 10⁻⁵N/mm³)

W_d : 単位管長当たりの管体重量 (N/mm)

R : 管厚中心半径 (mm)

P : 管体側面中央に作用する水平荷重 (N/mm²)

P = 水平土圧 + 管体の自重および管内水重、

または水平軌道荷重、

または水平その他の上載荷重

3-4-2. 設計支持角

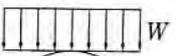
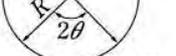
曲げモーメント計算に用いる設計支持角について、とう性管の場合施工支持角は360°であり、基礎の土質分類によって、120°と90°を選択する。一般的には120°が用いられることが多い。

3-4-3. たわみ率から求める管厚計算式

とう性管のたわみに対する検討には、スパングレーの修正式に管内水重、管体の自重および活荷重等を考慮して補正した式-1を用いる。

水平たわみ量の管厚中心直径に対する比率 (%) は、式-2と式-3を代入して変形すると、式-4で表される。

表-4 とう性管の横断面に生ずる最大曲げモーメント (単位: N/mm・mm)

対象荷重	設計支持角	自由支承		対象荷重	設計支持角	自由支承	
		最大曲げモーメント	荷重作用状態			最大曲げモーメント	荷重作用状態
鉛直等分布荷重	60°	0.377WR ²		管体自重	60°	0.134W _d R	
	90°	0.314WR ²			90°	0.102W _d R	
	120°	0.275WR ²			120°	0.083W _d R	
管内水重	60°	0.420w ₀ R ³		側面水平荷重	60°	-0.166PR ²	
	90°	0.321w ₀ R ³			90°	-0.166PR ²	
	120°	0.260w ₀ R ³			120°	-0.166PR ²	

$$\Delta X = \Delta X_1 + \Delta X_2 \quad \dots\dots\dots\text{式-1}$$

$$\Delta X_1 = F_1 \frac{2(K \cdot W_v \cdot R^4 + K_0 \cdot w_0 \cdot R^5 + K_p \cdot W_p \cdot R^4)}{EI + 0.061e' \cdot R^3} \quad \dots\dots\dots\text{式-2}$$

$$\Delta X_2 = F_2 \frac{2K \cdot W_w \cdot R^4}{EI + 0.061e' \cdot R^3} \quad \dots\dots\dots\text{式-3}$$

$$\frac{\Delta X}{2R} \times 100 = \frac{F_1(K \cdot W_v + K_0 \cdot w_0 \cdot R + K_p \cdot W_p) + F_2 \cdot K \cdot W_w}{\frac{EI}{R^3} + 0.061e'} \times 100(\%) \quad \dots\dots\dots\text{式-4}$$

ここに、

- ΔX : 水平たわみ量 (mm)
- ΔX_1 : 荷重 (活荷重を除く) によるたわみ量 (mm)
- ΔX_2 : 荷重によるたわみ量 (mm)
- R : 管厚中心半径 (mm)
- W_v : 土圧、上載荷重による鉛直荷重 (N/mm²)
- W_w : 活荷重または軌道荷重または施工時荷重による鉛直荷重 (N/mm²)
- w_0 : 水の単位体積重量 (1×10^{-5} N/mm³)
- W_p : 管体の単位面積当たりの重量 (N/mm²)
- K, K_0, K_p : 基礎の支持角によって決まる係数 (表-5参照)
- F_1 : 荷重 (活荷重を除く) による変形遅れ係数 (表-6参照)
- F_2 : 活荷重による変形遅れ係数 (ここでは1.0とする)

- E : 管材のヤング係数 (N/mm²)
- I : 管軸方向を軸とし、管延長1mm当たりの管壁の断面二次モーメント (mm⁴/mm)
- e' : 基礎材の反力係数 (N/mm²)

3-4-4. 基礎材の反力係数

基礎材の反力係数は、現地盤の土質および施工方法等によって異なるので、現地盤の土質試験を実施して下式より算定する。

$$e' = e'_0 \cdot \alpha_a \cdot \alpha_b \cdot \alpha_w$$

ここに、

- e' : 基礎材の反力係数 (N/mm²)
- e'_0 : 現地盤、施工方法、基礎材による基準反力係数 (N/mm²) (表-7参照)
- α_a : 溝幅による補正係数

$$\alpha_a = \left\{ 1 + \frac{0.1 \times (B_C - B_S)}{100} \right\} \leq 1.2$$

- B_C : 設計の管心レベルの溝幅 (mm)
- B_S : 標準溝幅 (mm)

表-5 K, K_0, K_p の標準値

基礎の設計支持角	0°	60°	90°	120°
K	0.110	0.103	0.096	0.089
K_0	0.107	0.096	0.085	0.075
K_p	0.215	0.191	0.169	0.149

表-6 変形遅れ係数 F_1 の標準値

現地盤の土質	基礎材料	
	砂質土	礫質土
礫質土	1.0	1.0
砂質土	1.1	1.0
粘性土	1.3	1.2
その他	1.5以上	1.5

表-7 基準反力係数 e'_0 (素掘り施工の場合)

現地盤の土質	基礎材料	
	砂質土	礫質土
礫質土	45	60
砂質土	40	55
粘性土	30	40
その他	15	20

α_b : 基礎材の締固め度合による補正係数
(表-8参照)

表-8 締固め度合による補正係数

区分	締固め度	
	I	II
砂質土	1.0	1.2
礫質土	1.0	1.1

α_w : 地下水位の影響による補正係数

$$\alpha_w = \frac{P_r - 45}{50}$$

P_r : 基礎材の締固め度 ≤ 95%

3-4-5. たわみ量の計測値から反力係数を求める

前項で示したように、一般的に反力係数 e' は、基準反力係数と補正係数の積として算出される。

また一方で、たわみ量を計測し、その値から反力係数 e' を算出することもできる。

前出の式-2において、荷重(活荷重を除く)によるたわみ量 ΔX_1 を増加たわみ量 ΔX と置き換えれば、

反力係数 e' は下式より求まる。

$$e' = \frac{2F_1(K \cdot W_v \cdot R^4 + K_0 \cdot w_0 \cdot R^5 + K_p \cdot W_p \cdot R^4) - EI \cdot \Delta X}{0.061R^3 \cdot \Delta X}$$

この式から、水重と管自重の項を削除することで整理しなおすと、下式のようになり e' を求めることができる。

$$e' = \frac{2F_1 \cdot K \cdot W_v - EI \cdot \Delta X}{0.061R^3 \cdot \Delta X}$$

4. 埋設試験結果の設計手法への反映

本共同研究において、“静的載荷試験-1”、“繰返し載荷試験”、“静的載荷試験-2”の結果から、更生管単体よりも更生管+老朽管のほうが剛性の高いことが確認された。これは、同じ載荷荷重を受けた時に、更生管+老朽管のたわみ率が小さいことを示している。

このことから、更生管+老朽管の場合は、基準反力係数に対する補正係数が、新設管の場合と異なると考えられる。

そこで、試験により得られたたわみ量から基礎材の反力係数を算出し表-9にまとめた。

表-9 埋設試験より算出した基礎材の反力係数

基礎材の反力係数の算出(弾性係数:管片外圧試験値)

	CASE 1-1	CASE 1-2	CASE 2-1	CASE 2-2	CASE 3-1	CASE 3-2	CASE 4-1	CASE 4-2	CASE 5-1	CASE 5-2	CASE 6-1	CASE 6-2	備 考	
更生管工法	OMG	OMG	OMG	OMG	INS	INS	OMG+老朽管	OMG+老朽管	OMG1/2+老朽管	OMG1/2+老朽管	INS+老朽管	INS+老朽管		
断面諸元	更生管外径 (m)	0.2996	0.3001	0.2969	0.2975	0.2979	0.2994	0.2994	0.2991	0.3015	0.3004	0.3003	0.3011	
	更生管厚さ (t) (m)	0.0113	0.0112	0.0067	0.0070	0.0070	0.0069	0.0113	0.0113	0.0068	0.0067	0.0075	0.0058	
	管厚中心半径 (m)	0.1442	0.1445	0.1451	0.1453	0.1455	0.1463	0.1441	0.1439	0.1474	0.1469	0.1464	0.1477	D/2 - t/2
	断面二次モーメント (m ⁴)	1.202E-07	1.171E-07	2.506E-08	2.858E-08	2.858E-08	2.738E-08	1.202E-07	1.202E-07	2.620E-08	2.506E-08	3.516E-08	1.626E-08	bt ³ /12
	弾性係数 (N/m ²)	1.829E+09	1.829E+09	1.829E+09	1.829E+09	2.726E+09	2.726E+09	1.829E+09	1.829E+09	1.829E+09	1.829E+09	2.726E+09	2.726E+09	管片外圧試験値(080819報告書 p.32)
地盤密度	1.44	1.45	1.43	1.45	1.44	1.45	1.44	1.46	1.46	1.46	1.47	1.46		
設計たわみ係数	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	0.089	とう性管設計値(設計支持角:120°)	
変形遅れ係数 (F1)	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
実験値	初期水平たわみ率 (%)	1.316	1.032	5.840	6.108	4.157	4.671	0.988	1.127	3.514	5.695	2.324	5.229	5%載荷試験初期(繰返し載荷終了後)
	最終水平たわみ率 (%)	4.962	5.937	7.935	8.083	7.519	8.473	5.172	5.551	5.408	8.565	5.346	7.587	5%載荷試験最終
	水平増加たわみ量 (ΔX (mm))	0.0109	0.0147	0.0062	0.0059	0.0100	0.0114	0.0125	0.0132	0.0057	0.0086	0.0091	0.0071	5%載荷試験結果(最終-初期)より
	鉛直荷重 (W _v) (Pa=N/m ²)	132812	179422	95775	59640	125208	101556	174418	204675	128594	129361	173262	129038	5%載荷試験結果(最終荷重)より
基礎材の反力係数 (N/m ²)	3.910E+06	3.973E+06	6.274E+06	4.021E+06	4.891E+06	3.416E+06	4.646E+06	5.285E+06	9.437E+06	6.194E+06	7.656E+06	7.604E+06	5%載荷試験結果(最終荷重)より	
老朽管による反力係数増加率	-	-	-	-	-	-	(1.19)	1.33	1.50	1.54	1.57	(2.23)	平均値=1.485()は異常値として除外	

表-10 “老朽管+更生管”における反力係数 e'

現地盤の土質	基礎材料	
	砂質土	礫質土
礫質土	65 (45)	85 (60)
砂質土	55 (40)	80 (55)
粘性土	40 (30)	55 (40)
その他	20 (15)	25 (20)

()内は基礎値、表-7参照

表-9より、いずれのケースにおいても“老朽管+更生管”の方が基礎材反力係数が大きい値となった。これは、更生管の周囲に存在する老朽管が構造体として機能しているためと推定される。

老朽管による反力係数増加率について、最小値であるCASE4-1 (= 1.19)と、最大値であるCASE6-2 (= 2.23)を除外した、CASE4-2、CASE5-1、CASE5-2、CASE6-1の平均値をとると、1.485となる。

これより、“老朽管+更生管”の設計において、反力係数の補正係数を1.485と提案する。

この補正係数と基準反力係数から算出される反力

係数を使用して更生管厚さを算出する。

なお、基準反力係数については、矢板引抜きによる地盤のゆるみ等はないことから、表-7の数値を使用する。

表-10に“老朽管+更生管”における反力係数算出値をまとめる。

5. まとめ

2004年から2008年にかけて、様々な試験を行い、貴重なデータを数多く収集することができた。

これらのデータを整理、解析することで、単独管更生工法では、各工法の材料特性等に相違はあるものの、硬質塩化ビニル管と同等以上の埋設性能を有していることを確認することができた。

また、既設老朽管の存在を基礎材反力係数に反映させることで、更生管の合理的な設計を行うことができることも確認できた。

最後に、「老朽管の改修方法に関する共同研究」と題して5回に亘って連載してきました。

この結果が、管路更生の資料として活用していただければ幸いです。

【参考図書】

- 1) 土地改良事業計画設計基準 設計「パイプライン」技術書 (平成10年3月 農林水産省構造改善局)
- 2) 老朽管の改修方法に関する共同研究 報告書 平成20年3月 (独)農村工学研究所・日本管路更生工法品質確保協会

連載講座小委員会

委員長	宮川 恒夫	EX ダンビー協会・技術委員
委員	大塚 孝	3SICP 技術協会・技術部長
委員	渡辺 充彦	積水化学工業(株)・環境土木システム事業部 課長
委員	眞田 和彦	光硬化工法協会・技術委員長
委員	池ヶ谷貴之	オールライナー協会・技術委員