

講義②

減圧施設のある管水路における漏水の原因調査

株式会社田幸技建コンサルタント 湧川 哲雄

1. 業務の目的及び内容

県営かんがい排水事業与勝第1地区（以下、「本地区」）は、沖縄本島中央部のうるま市南東の与勝半島に位置し、農地面積225haのさとうきびを基幹作物とする畑作地帯である。地区内では、地形や地質的な条件から地表水が乏しく、十分な農業用水の確保が困難で地下ダムが建設されるまでは恒常的な干ばつに見舞われていた。地区の南側では、全体に急斜面に囲まれた台地状の地形を成し、灰色の島尻泥岩（通称：クチャ）を不透水性基盤として、その上に水が浸透しやすい透水層の琉球層群（主に琉球石灰

岩）が載る地質構成となっており、地区一帯の琉球石灰岩下に存在する地下谷を地下連続壁で堰き止めた地下ダム（有効貯水量：1,382千 m^3 ）を建設することで、安定的な農業用水が確保された。

与勝地下ダムから井戸ポンプで取水したかんがい用水は、ファームポンドまで揚水され、自然流下で各受益団地に配水されている。（図-1）本業務では、本地区で造成されたパイプラインの特定区間で多発している漏水事故の原因を過去の調査事例等を踏まえ、詳細な水圧調査により究明し、機能保全計画を策定した。

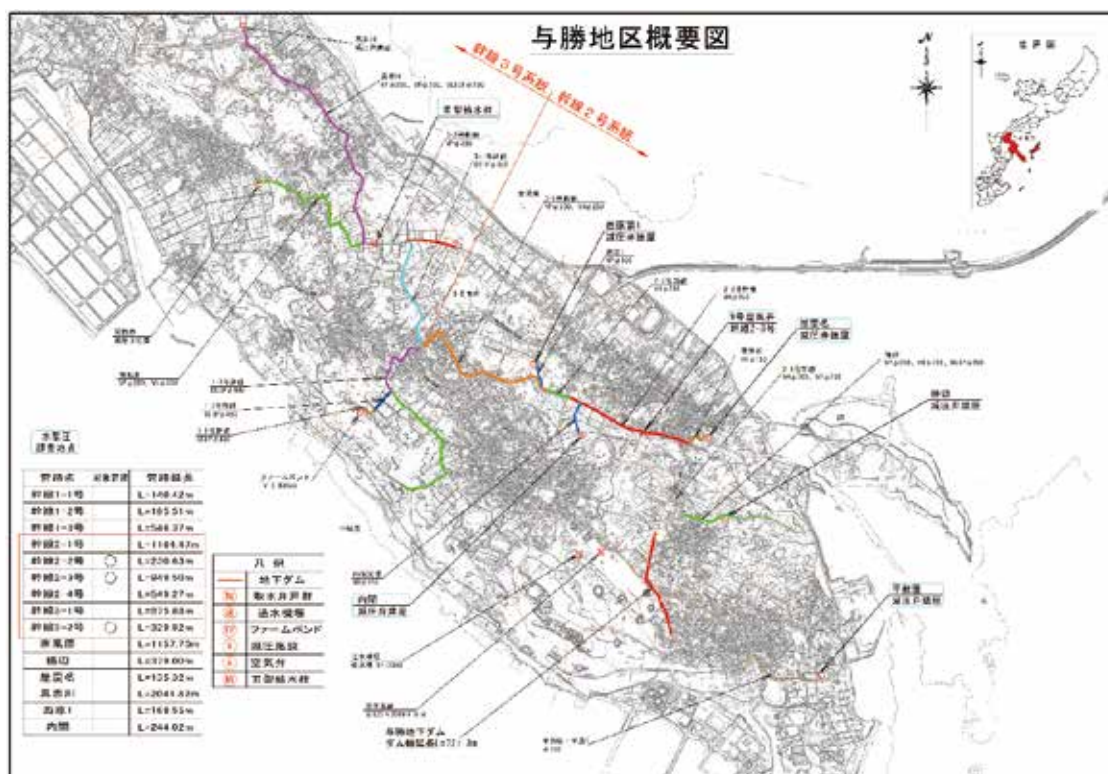


図-1 地区概要図

2. 機能診断調査

2.1 事前調査（問診調査）

今回調査対象の幹線2号系統及び幹線3号系統で漏水事故が発生した路線は、平成17年から平成20年に施工完了しており、最も早く漏水事故が起きたのは幹線2-3号で施工後9年後であり、漏水事故の加重平均年数は12.8年となり標準耐用年数の1/3以下であった。（表-1）

表-1 漏水発生状況

系統	路線名	施工から漏水までの年数	発生件数
幹線2号系統	幹線2-2号	11年	1件
	幹線2-2号	15年	1件
	幹線2-3号	9年	1件
	幹線2-3号	10年	1件
	幹線2-3号	11年	2件
	幹線2-3号	13年	1件
	幹線2-3号	14年	3件
	幹線2-3号	16年	1件
	幹線2-4号	14年	1件
幹線3号系統	西原幹線	11年	1件
	幹線3-2号	12年	1件
	幹線3-2号	15年	1件
	具志川幹線	13年	1件
	具志川幹線	14年	2件

2.2 漏水事故の要因

漏水調査によると、漏水はすべての路線で管の亀裂（写真-1）が要因となっている。管体の側面に亀裂が発生し破断面（写真-2）には縞状の模様（ストライエーション：striation）が確認できることから、漏水の原因は、疲労破壊よると判断できる。疲労破壊とは、繰り返し荷重によって鋸歯状の亀裂が生じる破壊であり、破面にはストライエーションが形成される。（写真-3）



写真-1 管体側面の亀裂



写真-2 破断面の拡大



写真-3 破断面のストライエーション

2.3 水圧調査

事前調査（水圧調査）では、1日の中で脈動が発生する時刻と経過時間を特定するために2分間隔で水圧観測を行った。

その結果、減圧弁の上流部において約2秒間隔の短い周期で圧力変動が観測された。そのため、詳細調査では、脈動回数を確実に捉えられるように測定間隔を2秒とし、同じ系統内での水圧伝達が検証できるように、観測開始のタイミングを秒単位で合わせた。水圧変動が多かった減圧弁の1次側（減圧弁の上流側の（減圧前の管路）を1次側、減圧弁の下流側（減圧後の管路）を2次側とする）や対象路線の低位部、開閉頻度の高いⅢ型給水栓箇所では1/100秒間隔で20秒間の水撃圧の計測を行った。



写真-4 DLS-HS



写真-5 DLS-H21

なお、今回の調査にあたり、測定間隔2秒で観測可能なフジテコム社のデータロガー（2ch）DLS-HS（写真-4）及びDLS-H21（写真-5）と解析ソフトDSL-HWを使用した。

2.4 水圧調査結果

幹線2号系統ユニット内の1日の平均脈動回数は630回（表-2）、脈動周期は0.25秒/回であった。脈動回数の測定は、水圧調査結果を水頭グラフに変換し日単位で回収したデータから脈動周期が判別できるように30分単位のグラフより読み取った。（図-2）

2.5 水撃圧調査結果

水撃圧を観測した結果、最大圧力は0.938～1.023Mpaであり許容圧力（1.25Mpa）以下であった。（表-3）

最も高かった内間減圧弁箇所の水撃圧のピーク値は、2023年1月22日10時11分17.66秒に記録し、（図-3）この時の振幅は約0.3秒周期となっている。（図-4）

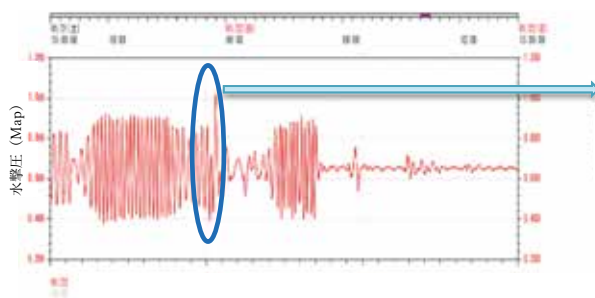


図-3 水撃圧グラフ（10時00分～10時30分）

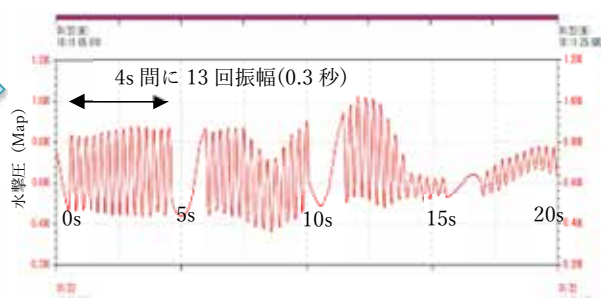


図-4 水撃圧グラフ（ピーク前後20秒）

表-2 脈動回数表

観測回数	観測期間	観測時間	観測回数	脈動発生回数
1	R5/1/11 ～ R5/1/12		927	927
2	R5/1/12 ～ R5/1/13		1,501	★
2	R5/1/13 ～ R5/1/14		732	732
3	R5/1/14 ～ R5/1/15		782	782
4	R5/1/15 ～ R5/1/16		316	316
5	R5/1/16 ～ R5/1/17		316	316
6	R5.1.18 ～ R5/1/19		398	398
7	R5/1/19 ～ R5/1/20		750	750
8	R5/1/20 ～ R5/1/21		600	600
9	R5/1/21 ～ R5/1/22		771	771
10	R5/1/22 ～ R5/1/23		352	352
10	R5.1.24 ～ R5/1/25		146	146
11	R5/1/25 ～ R5/1/26		212	212
期間最低脈動回数				146
期間最高脈動回数				927
期間平均脈動回数				630

★R5/1/12～R5/1/13のデータは異常値として除外した。

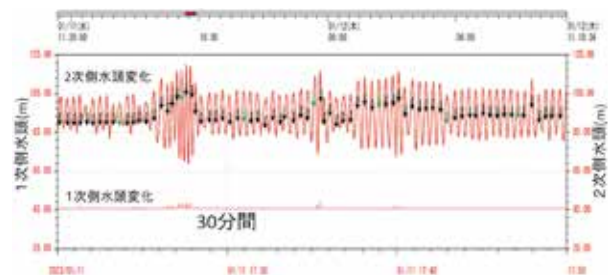


図-2 水撃圧グラフ（17時20分～17時50分）

表-3 水撃圧調査結果表

観測場所	路線系統	静水圧 (m)	設定圧 (m)	回数 (回)	期間最高値/期間最低値 (Mpa)
9号空気弁	幹線2号	0.86	0.90	162	1.01/0.683
屋敷名減圧弁	幹線2号	0.82	0.90	70	0.987/0.575
内間減圧弁	幹線2号	0.77	0.90	530	1.023/0.342
平敷屋減圧弁	幹線2号	0.75	0.80	103	1/0.385
皿型給水栓	幹線3号	0.58	0.75	75	0.938/0.435
合計				940	

2.6 管路の脈動現象について

水路の脈動現象の要因の一つに、末端の給水栓の開閉時に水圧調整を行う減圧弁が共振している事が考えられる。この現象は、標高の低い位置にある減圧弁に生じる水撃圧がきっかけとなっていることを田中¹⁾は指摘している。今回の調査においても、同じ系統内の1次側で脈動現象がほぼ同じタイミングで起きていることが観測された。(図-5)

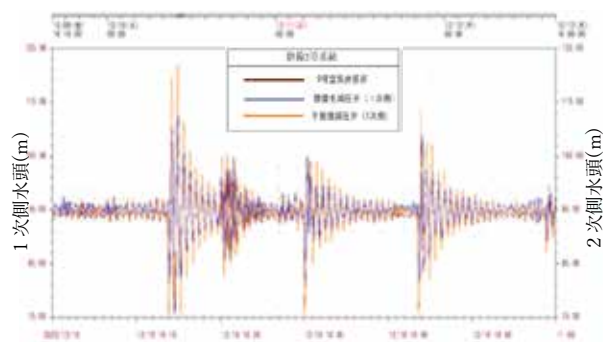


図-5 幹線2号系統水撃圧グラフ

幹線3号系統においても具志川減圧弁で発生した1次側の脈動が、上流のⅢ型給水栓で同じ周期で発生していることがわかる。また、この脈動は幹線2号系統の一番端にある平敷屋減圧弁の1次側にも伝播しているが位相にずれがある。(図-6)

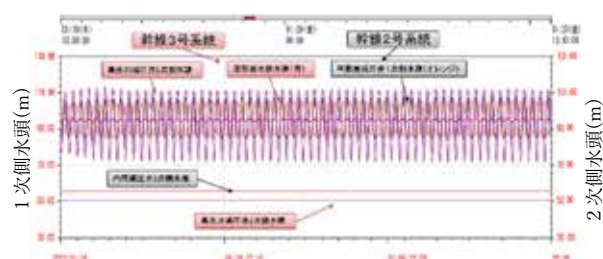


図-6 脈動グラフ

2.7 減圧弁の違いによる脈動

減圧弁の違いによって、2次側の作動に伴い1次側で脈動が発生する場合と発生しない場合があることがわかった。(図-7)、(図-8)

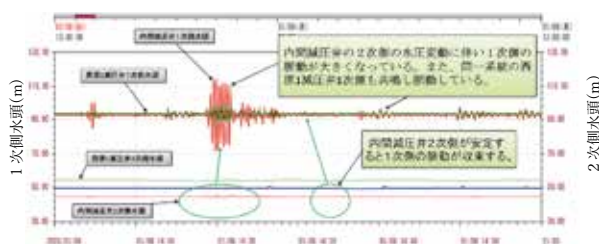


図-7 脈動グラフ(内間減圧弁)

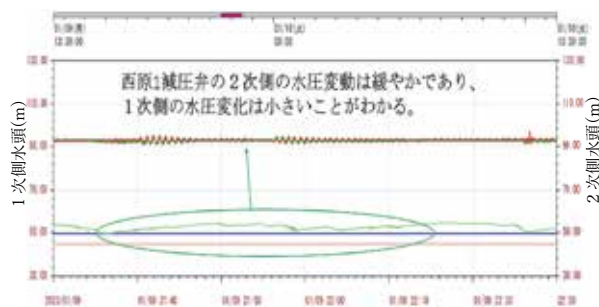


図-8 脈動グラフ(西原1減圧弁)

3. 漏水事故とその原因

これまでの履歴調査及び水圧調査より漏水事故の多くは、内圧の変動による管路破損による漏水であることが分かった。今回の水圧調査では、静水圧及び水撃圧はいずれも使用管の許容値内であるため管路破損の原因とは考えにくいですが、脈動現象が特定の減圧弁の1次側で1日平均630回と多く観測されたため、それが管破損の原因と考えた。

Vinson は、破壊に至るまでの脈動した回数(疲労破壊回数) N と載荷した最大フープ応力(円周応力) σ_{peak} との関係を(1)式および図-9で示されることを明らかにしている。

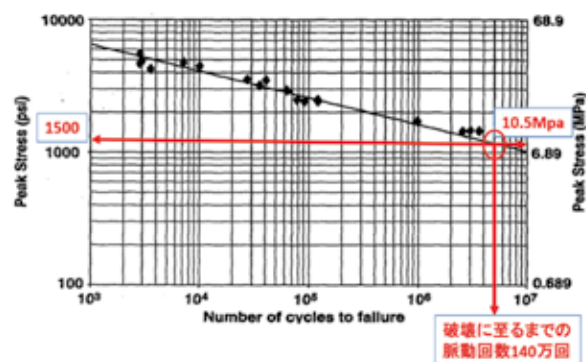


図-9 最大フープ応力と疲労破壊回数の関係式

表－４ 脈動回数による路線別耐用年数

＊日平均脈動回数：630回/日・年間漏水回数：240日・年間脈動回数：15万回										
路線名称	管名称	外形	管厚	最大水圧		フープ応力	疲労破壊回数	年間の脈動回数	疲労破壊による耐用年数	漏水までの経過年数(年)
		D:(mm)	t:(mm)	P:(Mpa)	P:(psi)	$\sigma_{peak}:(psi)$	N:(万回)	N':(万回)	T=N/N':(年)	
幹線2-2号	VHφ250	267	15	1.25	178.5714	1,500	140	15	9	9～15
幹線2-3号	VHφ250	267	15	1.25	178.5714	1,500	140	15	9	10～16
幹線2-4号	VHφ200	216	12.1	1.25	178.5714	1,505	140	15	9	14
西原1幹線	VPφ100	114	6.6	1.00	142.8571	1,162	470	15	31	11
内間幹線	VHφ100	114	7.6	1.25	178.5714	1,250	330	15	22	-
屋敷名幹線	VHφ150	165	10.5	1.25	178.5714	1,314	260	15	17	-
				＊ 100psi＝0.7Mpa						

$N = (5.05 \times 10^{21}) \sigma_{peak}^{-4.906} \dots\dots\dots (1)$
 ここで、フープ応力 σ は (2) 式によって求めることができる。

$\sigma = P (D-t) / 2t \dots\dots\dots (2)$
 ただし、D：外径、t：管壁の厚、P：全水頭
 100psi＝0.7Mpaである。

幹線2－2号の場合 (D=267mm、t=15mm、
 P=1.25Mpa)、式(2)より、 $\sigma_{peak} = 1.25 \times (267 - 15) / (2 \times 15) = 10.5 \text{Mpa} = 1500 \text{psi}$ となる。

ここで、式(1)より、疲労破壊回数 $N = (5.05 \times 10^{21}) \times 1,500^{-4.906} = 1,322,475 \div 140$ 万回となるが、これは、図－9より読み取れる 10.5Mpa＝1500psiの時の疲労破壊回数140万回と一致する。

本地区で得られた、年間の脈動回数 N' の 15 万回 (630 回 × 240 日 ÷ 150,000) を用いて、疲労破壊回数による耐用年数 T を試算すると $T = N / N' = 140$ (万回) / 15 (万回 / 年) = 9.33 ÷ 9 年となった。

同様に表－4に示す、幹線2－3号、幹線2－4号の耐用年数も9年と算定された。試算

した耐用年数と施工から漏水発生までの年数が概ね一致している。

田中¹⁾は、上式を用いて、宮古島における塩ビ管の耐用年数を10年と試算しており、本地区でも同様の結果が得られたことになる。

4. 機能保全計画の策定

4.1 健全度評価

本地区の事故区間は、既に10年を経過しており、その間に2回以上の突発事故を起こしているため、健全度評価はS-2以下とする。無事故区間は存耐用年数に余裕があり管体劣化の進行が遅いと考えられる。また、1回のみの突発事故は通常の維持管理範囲内とし、耐用年数経過後に管路の更新事業を実施することを鑑みると、「時間計画保全」で対応するのが望ましいと考えられるため健全度評価はS-5とする。

4.2 機能保全コストの算定

機能保全コストの算定に当たっては、以下の2つの対策工法を比較・検討した。(表－5)

表－5 機能保全コスト比較表

(単位：円)								
全体	管種	10年目	20年目	30年目	40年目	合計	評価	備考
シナリオ①	VPφ200	27,173,000	27,173,000	27,173,000	27,173,000	367,412,000	△	L＝ 937 m、 29,000 円/m
	VHφ250	51,304,000	51,304,000	51,304,000	51,304,000			L＝ 1,166 m、 44,000 円/m
	VHφ200	13,376,000	13,376,000	13,376,000	13,376,000			L＝ 418 m、 32,000 円/m
シナリオ②	DCIPφ250	72,292,000	0	0	0	135,977,000	○	L＝ 1,166 m、 62,000 円/m
	DCIPφ200	63,685,000	0	0	0			L＝ 1,355 m、 47,000 円/m

シナリオ①：同種管（VP・VH）で補修工事を行う。ただし、更新後も疲労破壊を起こすことが想定されるために10年に1回更新を見込む。シナリオ②：脈動に耐性のある管種（DCIP）で復旧工事を行う。耐用年数を40年に設定。

検討期間40年間では、シナリオ②がシナリオ①に比べて約3.7割のコストとなるため、シナリオ②を採用した。

4.3 今後の課題

（1）応急対策（管種変更）

本地区の幹線2号系統の硬質塩化ビニル管は全体的に管体の耐性が低下していると考えられるため、疲労破壊に耐性のある管種（ダクタイル鋳鉄管）に変更する必要がある。

（2）発生源対策

現在の自動減圧弁は、1次側に安全弁が設置されていないため安全機能を満たしていない。早急に1次側への安全弁設置の改善を行う必要がある。また、減圧弁1次側のフィルターの設定及びコントロールバルブに石灰が固着しない対策が必要である。沖縄県は、地下ダムの水源とするカルシウム分の多い農業用水が多いため、これらの対策は農業水利施設の長寿命化や

施設の維持管理にかかる費用を考えると、費用対効果は高いと思われる。さらに、脈動を起こさないシステムの検討が最重要と考える。

また、その他の発生源対策として、①減圧弁の定期的なメンテナンスを実施する。②減圧弁の応答速度管理のために、ニードルバルブを定期的に調整する。③減圧弁は水圧で制御するため水質管理を徹底する。（石灰が固着しないような水質改善など）④空気弁や安全弁、アキュムレーター等の圧力緩和装置を設置する。（ただし、圧力緩和装置の導入にあたっては、水撃圧の低減や脈動回数低減への影響などについても対象路線で十分な検討を行ったうえで決定する必要がある。適切な規格（容量）算定には、設置個所の静水圧、水撃圧、摩擦損失水頭、管内平均流速および管路の口径が必要となる。）⑤低位部にある減圧弁を脈動の発生しにくい減圧弁に交換するなどの対策が考えられる。

参考文献

- 1) 田中良和（農村工学研究所 水利工学研究領域 水路システム担当）：宮古土地改良区における小口径塩ビ管の破壊要因の検討、2012