

VI-4

既製コンクリートトラフの凍圧回避形状に関する一考察

北王コンクリート技術開発室 正員 北村 泰介

十勝支庁

高橋 宏明

まえがき

近年、小規模な土木構造物は、そのほとんどが二次製品化されている。これは、その品質の確保および施工の簡易性から多用されているものである。特に、小規模な水路においては施工の迅速性や施工現場の悪条件などから、鉄筋コンクリート二次製品水路（通称トラフ）を用いる利点は計り知れないものがある。しかし、その反面、軽量化が図られ部材が薄くなり、現場打ちコンクリート水路時代にはあまり考えられなかった冬季間の傾頭被災が増加している。ここでは、平成2年と平成3年に施工された、十勝管内の鉄筋コンクリート二次製品水路の被害調査結果と若干の考察を報告する。

1. 調査の範囲

表-1 水路調査の内訳 単位 m %

ここに調査されたトラフ（鉄筋コンクリート二次製品水路）は全延長で72,274mである。この内訳を表-1にとりまとめた。これによると、施工量は平成2年度の33km、平成3年度の40kmとなっている。また、トラフの形式はU形トラフとV形トラフの二種類に限定されており、なかでも、V形トラフは全体施工量の9割を占めている。

このことは、凍上の厳しい十勝地方において、強度の低いU形式トラフの施工を控えていることと、V形トラフが水理的に有利な断

施工年度	延長	構成比
平成2年	32,608	45.12
平成3年	39,666	54.88
合 計	72,272	100.00

V形強度	延長	構成比
1 種	17,517	27.06
2 種	45,969	71.01
不 明	1,250	1.93
合 計	64,736	100.00

形 式	延長	構成比
V 形 式	64,736	89.57
U 形 式	7,538	10.43
合 計	72,274	100.00

水路規模	延長	構成比
H400 >	44,438	61.49
H450-499	6,286	8.70
H500-699	12,040	16.66
H700-799	3,898	5.39
H800-999	3,508	4.85
H1000 <	2,104	2.91
合 計	72,274	100.00

表-2 トラフの許容抵抗tf/m

規 模	U形式 トラフ	V形式トラフ	
		1 種	2 種
H-300	0.07	0.05	0.11
H-450	0.19	0.11	0.26
H-500	—	0.14	0.32
H-600	0.32	0.21	0.47

* Hは壁高を示す

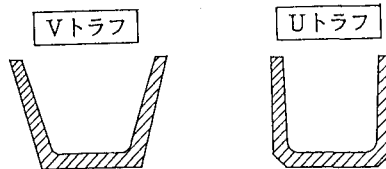


図-1 形式の略図

* U形トラフは土地改良事業標準設計第5編鉄筋コンクリート二次製品水路（解説書）による。

注）U形式トラフはJISA5305であり、V形式は北海道農政部規格V型トラフである。

A Case Study on Shape of Concrete-flume with the Purpose of Reducing Frost Heave Action
by TAKAHASHI Hiroaki and KITAMURA Taisuke

面を有していること、および、土と接する壁面勾配が土圧荷重を軽減する方向に傾斜していることがその選定理由になっていると考えられる。さらに、このV形式トラフの強度別施工状況をみると2種強度が7割強を占めており、1種強度は3割に満たない。このことは、十勝地方では既に最寒冷地を意識し高強度のトラフを用いていることが理解される。さらに水路規模別ではH500以下が7割を占め、H700を含めると約9割に達し、全体的に小規模水路を対象としているといえる。

2. 側壁傾頭状況

表-3は、十勝管内の清水町、更別村を除く18市町村、68地区のトラフ傾頭量調査結果である。

ここに示した傾頭量は、実際に施工されているトラフの内寸法をコンベックスで計測した値と製品の正規寸法との差を表したものである。このため、製品誤差、計測個人差などの要素が含まれており厳密計測値とはいえないが、その傾向を表すには十分と考える。

調査全資料の中で、傾頭量ゼロは85.62%を占めており、1mm以上の傾頭をしめすのは14.4%となっている。同様に、5mm以上の傾頭は7.91%、10mm以上の傾頭は4.68%、15mm以上の傾頭で3.46%と減少していく。

3. 十勝管内トラフの被災状況

この種のコンクリート構造系では、たとえば、U形式450では片側側壁の変位量が1～2mm程度で引張側コンクリートにひび割れが生ずる。しかし、この値をもってトラフの破壊とするのは意味がないとしている¹⁾。したがって、ここでは、この傾頭がどの程度の値になると「構造物の破壊」といえるのかについて検討し、今回の傾頭量調査結果に被災の判断を加える。

1) 傾頭量と破壊の関係

部材のたわみ量は一般的に剛度(EI)に支配される。弾性係数(E)は部材の材質により決まり、二次製品コンクリートでは圧縮強度 $\sigma_{ck}=300\text{kgf/cm}^2$ に対して $E=2.8\times E^5\text{kgf/cm}^2$ となっている²⁾。断面二次モーメント(I)は部材厚の関数として示されるものであり、通常はコンクリートの部材厚を用いている。しかし、たわみ量が重要となる場合は「コンクリート断面の引張側に発生するひび割れを考慮した断面二次モーメント(換算断面二次モーメント)³⁾」を用いる必要がある。このようなことから「トラフのたわみ」をトラフ破壊の判断基準とする場合、断面二次モーメント(I)はひび割れを考慮した換算断面二次モーメント(I')⁴⁾で検討しなければならないと考える。

以下、この換算断面二次モーメントを用い、鉄筋応力とトラフ天端のたわみ量について数値計算を行う。計算の条件として、コンクリートのひび割れ限界モーメントを「コンクリート標準示方書設計編」に示されている「ひび割れ幅算定式」において、ひび割れ幅0.004cmと設定して求めた。また、U形トラフの部材厚と鉄筋量は「JISに基づく土地改良事業標準設計(解説書)」および、V形トラ

表-3 両側傾頭量別構成

傾頭 mm	延長 m	構成比 %	累積比
0	61,877	85.62	100.00
1 - 4	4,676	6.47	14.38
5 - 9	2,337	3.23	7.91
10 - 14	882	1.22	4.68
15 - 19	698	0.97	3.46
20 - 24	708	0.98	2.49
25 - 29	638	0.88	1.51
30 - 34	364	0.50	0.63
35 - 39	12	0.02	0.13
40 <	82	0.11	0.11
合 計	72,274	100.00	0.00

表-4 集中荷重と I' を用いた天端たわみ量

単位 kgf/m , mm

鉄筋応力度		1,400		1,800		2,400		摘 *上段 U形式 *下段 V形式
トラフ形式		U形	V形	U形	V形	U形	V形	
壁 高	H-300	226 0.87	226 0.87	291 1.12	291 1.12	388 2.27	388 2.27	As=1.05cm ² , D=7cm As=1.21cm ² , D=7cm
	H-450	256 1.73	287 1.78	329 2.66	370 2.81	439 3.94	493 4.24	As=2.62cm ² , D=7cm As=1.88cm ² , D=7cm
	H-600	451 3.99	371 2.23	580 5.38	477 3.78	774 7.35	636 6.03	As=3.76cm ² , D=8cm As=2.76cm ² , D=8cm

*上段は集中荷重(kgf/m)、下段はたわみ量(mm)を示す。

フは「北海道農政部」の基準によった。また、鉄筋の伸び(鉄筋中心まで)を鉄筋径の3倍とした。

表-4はトラフの天端に側壁下端の鉄筋応力が表示の値となる集中荷重(上段)を作用させ、換算断面二次モーメント(I')を用いフレーム計算により得られたたわみ量(下段)を示したものである。この結果より、鉄筋の降伏点強度を2,400kgf/cm²(旧SR24)と考え、この範囲内において側壁は弾性変形すると仮定すると、H300トラフでは2mm程度、H450では4mm程度、H600では6mm程度の側壁の傾頭があっても破壊とはいえない事が判る。これらのことを踏まえ、今回の傾倒量調査で「トラフの破壊」と判断される傾頭量はトラフ規模によって異なるが、両側傾頭で最小5mm～最大15mmの範囲といえる。

2) 十勝管内の被災状況

前項をもとに被災傾頭量別に分類した管内の被災率を表-5にまとめた。これによると、施工量にかなりの差があるが、小規模トラフほど被災率が高くなる傾向がみられる。トラフ規模H400以下で被災率7.72%、H800以上では1.14%であるが、全体を平均した被災率は6.51%となる。

表-5 管内トラフの規模別被災率

トラフ規模	施工延長 m	被災傾頭量 mm	被災延長 m	被災率 %
400 以下	50,496	5 mm以上	3,898	7.72
500-700	16,166	10mm以上	744	4.60
800 以上	5,621	15mm以上	64	1.14
合 計	72,274		4,706	6.51

3) 傾頭量の地域別分布

十勝地方の凍結指数と傾頭傾向を計るために、地区別にトラフ側壁両側傾頭5mm以上の傾頭延長比率(5mm以上の傾頭延長/地区内施工延長、以下傾頭率と呼ぶ)を求めた。この結果を図-2に示す。ここに示す凍結指数は「積雪深20cm未満の積算寒度」の平成2年度(H2.11-H3.4)と平成3年度(H3.11-H4.4)の平均値である。

調査対象68地区の内、5mm以上の傾頭が確認されなかった地区数は51地区であり75%となる。傾頭率(5mm以上の傾頭)30%以

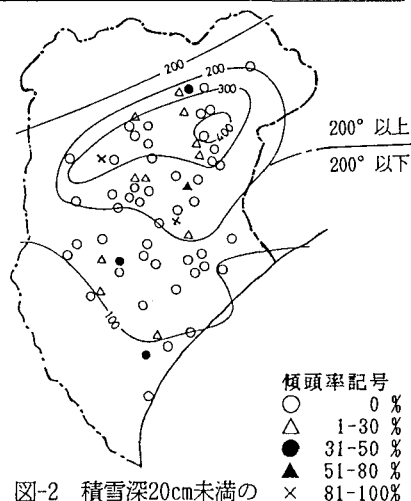


図-2 積雪深20cm未満の凍結指数と5mm以上傾頭率分布

下は11地区、31～50% および 50%以上は各々3地区となっている。図-2より、傾頭率が50%以上に達するところは、凍結指数-200°以上の区域に限定されているといえる。しかし、同区域に傾頭率0%地区も多数存在する。また、地区内の傾頭率がほぼ100%の隣の地区で傾頭率0%となっている。これらの事から、今回の調査では傾頭状況と地域差や凍結指数との相関性は低いといえる。

4) トラフ形状による傾頭状況

次に、トラフの形状別の傾頭量を検討してみる。検討の対象として、十勝の中でも寒冷な地域ではU形式の施工を控える傾向にあることから、図-2に示す「凍結指数」-200°以下の地域とした。この検討には両側で5mm以上傾頭しているトラフの延長比を用いる。表-6に対象地域のU形状およびV形状トラフの5mm以上傾頭延長比を示した。これ

によると、V形状の施工量は約9割を占めるに到っている。このため形式別の「傾頭延長比」を単純に比較することは出来ないが、比率的にはV形状がU形状に比して約3倍以上の高い傾頭傾向を示している。この傾向は表-7に示した同一規模(H300-450)の比較でも同様の傾向である。さらに、V形状2種強度と比較してもこの傾向は変わらない。

この理由として、U形状は道路側溝に用いられている場合が多く、除雪や雪が吹き溜まるなどして、断熱効果を発揮している為とも考えられる。しかし、道路側溝は一般に法面が長く存在することから、外力面では、必ずしも、恵まれた設置条件とはいえない。このことから、トラフ形状による「被害差」は否定しえない。

4. トラフに作用する凍上力

凍上力は凍結膨張を拘束すると増大することは良く知られた事実である。また、氷は粘弾性体であり緩やかに凍結させると応力を内部に吸収することで、凍上力は緩和される。さらに、土壌の凍上では急速に冷却されると凍結水分の供給が追いつかず、アイスレンズの成長が妨げられ凍上量が緩和されるといわれている。

トラフなど土中に設置される構造物が凍上力をどの程度受けるかについては、その要因が多岐にわたるため、明確化することは非常な困難を伴う。しかし、凍上を発生させる必要かつ十分条件は①地表面の寒さが厳しく、②水分を吸水し易い土質であり、③凍結水が十分に供給される場合である。この内、ひとつでも欠けると凍上は起こらないとされている。

凍上力に関しては、室内試験装置で得られた「拘束力と凍上量」の実験値⁵⁾によれば上載荷重6.4kgf/cm²で凍上量0.6mm、0.8kgf/cm²で凍上量7.8mm程度となっている。このことは凍上量を拘束すると64tf/m²以上の膨張圧が発生し、拘束を緩和すると急激に低下することを示している。また、鈴木

表-6 凍結指数-200°以下地域

トラフ形状	全施工延長	5mm以上傾頭延長	傾頭延長比 %
V形状	27,601 m	1,604 m	5.81
U形状	3,742 m	70 m	1.87
合計	31,343 m	1,674 m	5.34

表-7 同上地域 H300-450対象

トラフ形状	全施工延長	5mm以上傾頭延長	傾頭延長比 %
V形状	20,648 m	1,430 m	6.93
内2種	(12,853)	(880)	(6.85)
内1種	(7,383)	(548)	(7.42)
内不明	(412)	(2)	(0.48)
U形状	3,472 m	70 m	2.02
合計	24,120 m	1,500 m	6.22

らよる、野外でのトラフに作用する凍上力の観測⁹⁾によれば、トラフの天端に最大4tの荷重が作用したとしている。

このように凍上力は非常に大きな値を示すが、実際には、トラフ側壁のたわみやトラフ左右の凍上力の違い、トラフの持ち上がりなどで凍上拘束力が緩和されたり、さらに、凍上力回避工法としてトラフ背面土を礫など非凍上性土と置換することでトラフの破壊が軽減されているといえる。このことは十勝地方など積雪が少なく寒冷で凍上の必要条件がそろっている地区においても、被災率が6.5%（今回の調査）程度でおさまっていることから理解できることである。

5. トラフ形状に関する考察

トラフに作用する凍上力は前項の野外観測などの結果から、その破壊荷重をはるかに越える数値となっている。したがって、この凍上力をこの種トラフ構造で対応させることは理論上不可能となる。しかし、実際にはそのほとんど（今回の調査では93.5%）のトラフが機能を果たしているという現実がある。このことから、実際の現場においては凍上発生機構とトラフ自体の持つ側壁抵抗やたわみ、持ち上がり、回転などの凍上力回避作用が複雑に干渉し、被害を回避しているものと考えられる。このことは先に述べたV形状とU形状別の傾頭差や、表-8に示すV形状トラフでの1種、2種強度別傾頭傾向などに表れている（特に、表-7と表-8の1種

強度の傾頭延長比に注目）。表-8は十勝管内全域のV形式トラフの強度別の5mm以上の傾頭延長比を比較したものである。表-2の「トラフの許容抵抗モーメント」から、強度別の許容天端集中荷重を逆算すると、1種は264kgf、2種は536kgfが得られる。この程度（凍上荷重に比して）の抵抗値の増加で傾

頭延長比は半分以下に減少する。このように、トラフ強度や形状の違いにより傾頭延長比が減少することから、トラフの凍上対策は凍圧荷重を対象とする試みよりも、凍圧を回避するような形状での対応が存在するように思われる。以下、この形状について検討する。

凍上力は凍結進行面に対して直角に発生し平坦面では上方に向かう。トラフ背面などでは地表面と側壁面の両方から冷却されるため凍結面は曲線的に進行し、この面に直角方向に凍上力が作用している⁷⁾。この凍上力と側壁の関係を模式的に図-3に示す。

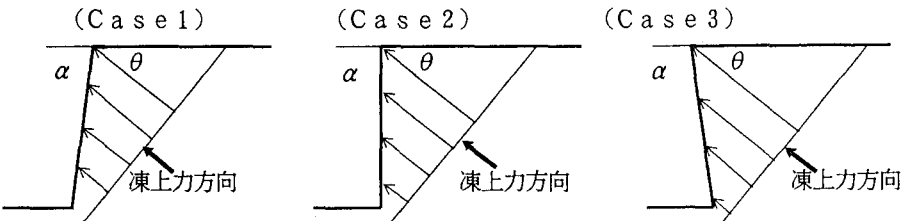


図-3 凍上力と側壁の模式

Case 1は側壁がトラフの外側に傾斜している場合で、Case 2は鉛直壁であり、Case 3は内側に傾斜している場合である。ここに、 θ は地表面との凍圧方向角であり、大型水路（壁高1m程度以上）では 40° としている⁷⁾。小規模水路の場合、特に十勝などでは凍結深が50～60cm以上になるため、上記のモデルは凍結初期の段階に限られる。 α は壁面が地表面となす角であり、Case 1は $\alpha < 90^\circ$ 、Case 2は $\alpha = 90^\circ$ 、Case 3は $\alpha > 90^\circ$ の条件である。

これを力学的には次式で表せる。

$$N = P \cdot \cos \delta$$

$$F = P \cdot \sin \delta$$

ここに、N：壁面直角方向力

F：壁面平行方向力

P：凍上力

δ ：凍圧の壁面作用角（ $\alpha + \theta - 90$ ）

α ：壁面が地表面となす角

θ ：地表面と凍圧方向角

このように、側壁の傾斜方向について、単純な力の分配から導かれる力学的な面からはさほど大きな差異はみられない。しかし、凍上力は膨張拘束圧であり、この膨張を拘束しない形状がより有利になることは明らかである。この意味での相対的な評価として、Case 1はCase 2に比べて膨張を拘束する側壁の傾きであり、Case 3は膨張をより拘束しない傾きといえる。

この点について、石井らは円筒鋼管と円筒内部にテーパーを付した鋼管を用い内部に小砂利と塩水を入れ、凍結させ内部応力を比較している。この結果として、1/90のテーパーを付ける事で内部圧力が半減した。これは水盤自体が鋼管内壁をスリップ上昇するためであるとしている⁸⁾。

おわりに

トラフ構造に、ほぼ理論通りの凍上力が作用すると、現状構造では力学的に対応することは不可能といえる。このため、凍上力をいかに回避するかが課題となっており、この対策として裏込砂利を用いる工法が確立されている。この工法により、凍上被災は急激に低下したものと考えられるが、それでも寒冷地では5～10%の被害が毎年生じている。先に述べたように、凍上力は拘束すると強大な力を発生するものであり、氷の膨張を拘束しないで上方に回避させるトラフ形状と、これに合わせて、コンクリート壁と背面土の接する部分の摩擦係数を極力小さくしたり、凍着力を減ずる工夫をすることで、被害率をさらに低下させる事が可能と考える。

<参考文献>

- 1) 鈴木輝之 地盤凍結にともなうコンクリート製U-トラフの被害に関する実験（第3報）
- 2) 土木学会 コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編
- 3) _____ //
- 4) 岡田清 他 鉄筋コンクリート工学 鹿島出版会
- 5) 土質工学会 土の凍結—その抑制と応用— P38, 図-2.13
- 6) 鈴木輝之 他 地盤凍結にともなうコンクリート製U-トラフの被害に関する実験（第2報）
土質工学会 北海道支部 技術報告集 第28号 昭和63年2月
- 7) 開発局土木試験所 水路構造物の凍害対策工法検討報告書 昭和54年
- 8) 石井、佐伯他 海水と砂よりなる中詰材の凍結によるケーソン内圧の増加に関する研究
海洋開発論文集 VOL.8 1992年