

北海幹線用水路の応力解析について

札幌開発建設部 岩見沢農業事務所 第1工事課 ○山田 樹予成
中島 敬太郎
池下 裕 幸

北海幹線用水路は全長約80km、水路幅は上流位置にて最大約14m、下流位置では約6.3mとなる長大で大規模な断面をもった水路である。約40年前に建設した旧水路は、現在、国営かんがい排水事業において更新整備中である。流下距離にともない水路幅が変化する当該水路では、フルーム水路型式と分離型水路形式の2つの適用が経済面と合理性から考えられる。一方、とくに後者の形式では作用する地盤反力、浮力、寒冷地特有の凍上力等に対して、その挙動や内部発生応力の検証が重要である。建設当初から冬期・融雪期・通水期・落水期の一連の期間において、土圧、間隙水圧、水位等の計器と内部応力を推定するための鉄筋ひずみ等による指示値を分析し、水路の構造的安定性を確認したので報告する。

キーワード：大型フルーム水路、分離型水路、作用外力、鉄筋ひずみ、曲げモーメント

1. はじめに

北海幹線用水路は赤平市に位置する北海頭首工より灌漑用水を最大44m³/sで導水し、空知地域の砂川市、奈井江町、美唄市、三笠市、岩見沢市、南幌町の4市2町の農地約17,000haに送水する延長約80kmの長大で大規模な断面をもった水路である。当該水路は先行事業の「国営かんがい排水事業美唄地区(S32～S54年度)」と「国営かんがい排水事業空知中央地区(S54～H20年度)」により整備されたが、古いものでは水路本体の劣化が進んでおり、現在、「国営かんがい排水事業北海地区」により順次、更新整備を進めている。

水路の改修にあたり、最上流地域の水路では幅員14m、側壁高2.6m、最下流地域の水路は幅員6.3m、側壁高さ1.9mと、水路システムのなかで上流と下流で水路幅が倍以上の差となる。水路幅は長さとともに地盤反力等の外力により大きなモーメントが作用し、床版を厚くしたり、鉄筋量を増やしたりする必要があり、建設コストが高くなる。このため、水路幅が広い区間では、床版と側壁を縁切りした分離型水路を採用した(現行では水路幅約10mを境に分離型水路と一体型のフルーム水路に採用を分けている)¹⁾。その設計の着目点の妥当性と実際の作用力や発生する内部応力を検証すべく土圧計、間隙水圧計、鉄筋ひずみ計等の計測機器による監視と分析を実行した。本報では調査区の水路の建設初期から冬期・融雪期・通水期・落水期の一連の期間の計測結果と構造的安定性の確認結果を報告する。

2. 用水路の挙動計測の方法

(1) 計測機器の配置

Kiyonari Yamada, Keitarou Nakashima, Hiroyuki Ikeshita

図-1, 2にそれぞれ一体型のフルーム水路の美唄工区と分離型水路の赤平工区での計測機器の配置を示した(両図ともサイドドレーナーの位置は割愛)。

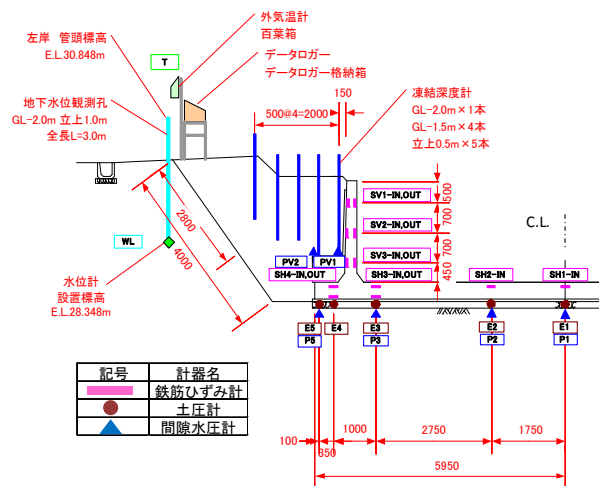


図-1 フルーム水路型式(美唄工区)での機器配置

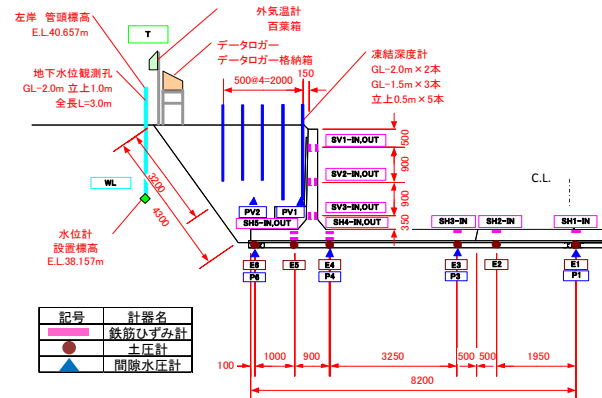


図-2 分離型水路(赤平工区)での機器設置

a.鉄筋ひずみ計の配置

鉄筋ひずみ計(測温機能付き)の配置は、水路各部位に生じる曲げモーメントの逆推算ができるように、側壁部では3標高位置に内空側(-INと称する)と背面側(-OUTと称する)に配置し、床版・底版部(かかと部・つまさき部)では適切な位置に、上面側(-INと称する)と下面側(-OUTと称する)の対、あるいは上面側だけに配置した。鉛直の側壁はSVシリーズ、水平な部材はSHシリーズと称す。

b.土圧計・間隙水圧計・水位計の配置

床版・底版部に作用する地盤反力や浮力、側壁に作用する水圧の大きさと分布を確認するために土圧計と間隙水圧計を設けたほか、農地側(地山相当)の地下水位の様子を計測した。

c.凍結深度計・気象観測

側壁背後の凍結の様子や凍上力の解析のため凍結深度計を側壁背面に配置した。また、現地の気温等を把握するための気象観測ユニットを設けたほか、積雪時期には積雪の状態を適宜観測した。

その他、用水路の通水時と落水後の用水路のレベル測量等を行い、試験工区の地盤の状態を分析・評価した。

(2) 計測期間における事象の特徴

両工区の施工着手時期は異なり、美唄工区の試験区は平成23年の秋期末の10月末にRC打設を行い、赤平工区の試験区は床版を同年10月中旬に打設し、分離型である側壁部は初冬の同年12月上旬にRC打設を行った。計測は赤平工区の側壁部打設後から1時間置ききの自動計測とし、表-1のようにRC打設初期～積雪寒冷期～融雪期～通水期～落水期にわたって観測を行った(途中、一部欠測や落水時期での計測時間間隔を10分とした変更を含む)。本解析期間での用水路に生じる事象は表-1のようである。

表-1 計測や観察で分析する主な事象

外的環境の変化/時期 (イベント)	美唄工区		赤平工区	
	水平部位 ¹	鉛直部位	水平部位 ²	鉛直部位
RC打設(全体、側壁部)				
・水和反応/乾燥収縮等	緩やか収縮	自重影響大	緩やか収縮	自重影響大
・型枠脱型	内空側は気温・日射の影響を受けた収縮変化顕著			
背面埋戻し				
・背面土圧/水圧作用	浮力作用	背面圧作用	浮力作用	背面圧作用
積雪寒冷環境				
・雪庇力作用	(積雪荷重)	雪庇力大	(積雪荷重)	雪庇力大
・凍上力作用		凍上力大		凍上力大
融雪時環境				
・地下水位変化(浮力)	浮力作用	背面圧	浮力作用	背面圧
・背面土圧変化		主動土圧域		主動土圧域
通水期(水管理、水制御)				
・内水圧作用	水重負荷	内外水圧	水重負荷	内外水圧
・地下水位変化	浮力作用		浮力作用	
落水時期				
・内水位と間隙水圧	浮力作用	内外水圧	浮力作用	内外水圧
・地盤変位(リバウンド)	変位量と地盤反力		相対変位量と地盤反力	
↓				
落水後～冬期まで	環境変化と挙動観察			

水平部位¹: 底版(全体)、水平部位²: 先行打設の床版、側壁下部のつま先部とかかと部
鉛直部位: 側壁の鉛直部分

表1に示したように、①側壁の高さが高い場合では、

打設直後のスランプ的な沈下量の大きさ把握、②1セグメントが大きな躯体での継続的に進む硬化収縮量の把握、③埋戻しにより初めて土圧を受けた場合の部材の内部応力の発生状況の把握、④積雪寒冷地特有の雪庇力や凍上力による部材の内部応力の発生状況の把握、⑤水路利用時期や落水時期の地下水位(間隙水圧)と水路内水荷重とのバランスの把握、さらに、⑥これら各時期の計測値等の分析と水路型式による照査をつうじて、設計条件とする地盤反力分布等や部材の構造的安定性を検証することが肝要である。

3. 用水路の設計条件と構造断面略図

用水路の特徴的な設計条件は次のようである¹⁾。

(1) 地盤反力の分布

図-1のようにフーチング部(かかと部)を有する一体打ちの水路の底版では、フーチング部を除く底版に一樣分布の地盤反力が発生する。

図2のように分離型水路では、床版部は縁切りした自立構造とし、そのために、(自重+内水重)と地盤反力は均衡し、一体型のような大きなモーメントを想定しない。水路内空虚時で床版底面から浮力を受ける場合に、側壁つま先部との突合わせ(傾斜面の突合わせ固定)による曲げモーメントを考慮する。

(2) 構造設計方法等

分離型水路の側壁(かかと部とつまさき部を含む)は、逆T擁壁として構造計算するほか、床版に浮力が想定される場合では、そのつまさき荷重を考慮した安定計算を行った。

これらの条件や諸量から、図-3、4のような断面(縦断方向)の配筋で用水路を建設した。

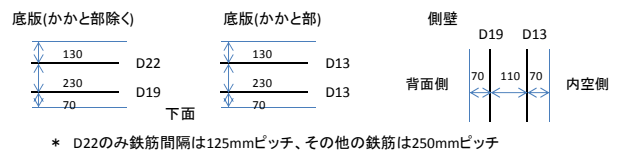


図-3 フルーム型水路(美唄工区)の部材厚と鉄筋配置

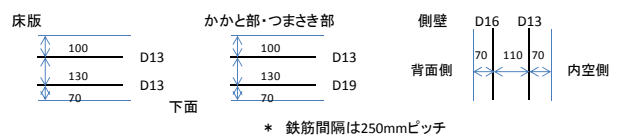


図-4 分離構造型水路(赤平工区)の部材厚と鉄筋配置

4. 計測結果と考察

(1) 鉄筋ひずみ計の計測結果概要

表-2, 3にそれぞれフルーム型水路(美唄工区)と分離型構造水路(赤平工区)での鉄筋ひずみ計の指示値の変化を要約した。(慣例的な表現により、鉄筋ひずみ計の指示値が小さくなる場合が収縮(圧縮)である。また、鉄筋計を応力として換算することなく、バイナリーデータのひずみ量として解析することが現象を理解しやすい。)

鉄筋ひずみの初期値を何時に置くかは課題があるが、RC打設1日後程度のスランプ的収縮後を初期値として、

ひずみ量変化が比較的大きな計器(100 μ)を枠塗りしている。表-2, 3では側壁部の鉄筋ひずみ量の変化が比較的大きく、また、フルーム型水路のかかと部(フーチング)下面側での伸張(引張)と側壁下部部の水路側での収縮(圧縮)が特徴的である。とくに側壁の-IN、-OUT対の収縮(圧縮)では、外力のほかに継続的な水和・乾燥収縮が変動量に含まれることを理由に、問題と考えないが、対の一方側の収縮(想定外力の圧縮側、美唄工区SV3-IN)や伸張(引張、美唄工区SH4-OUT)には留意が必要である。

表-2 フルーム型水路(美唄工区)の鉄筋計ひずみ指示値

時期(時間)	外的環境の変化 (イベント)	底版部位の鉄筋ひずみ(概数) $\cdot \mu$						側壁部の鉛直部位の鉄筋ひずみ(概数) $\cdot \mu$					
		SH1-IN	SH2-IN	SH3-IN	SH3-OUT	SH4-IN	SH4-OUT	SV1-IN	SV1-OUT	SV2-IN	SV2-OUT	SV3-IN	SV3-OUT
H23.10.28.13:00	コンクリート打設	1210	1890	870	10	-1060	-2035	550	-220	-2120	270	-2130	-390
	・水和反応/乾燥収縮	不測	不測	不測	<-80>	<-1140>	<-2085>	<450>	<-330>	<-2260>	<110>	<-2240>	<-500>
H23.11.3.12:00	側壁型枠脱型												
H23.11.4.12:00	打設1週間後	1135	1815	795	-10	-1180	-2015	360	-380	-2300	30	-2330	-590
H23.11.12~13.	側壁背面埋戻し												
H23.11.25.12:00	打設28日後	1235	1895	865	40	-1140	-2000	50	-400	-2530	70	-2580	-440
	積雪荷重 雪庇作用、凍上作用 (別途)												
H24.3.31.12:00	(通常の)冬期終了	1175	1840	830	55	-1155	-1995	-100	-390	-2550	90	-2570	-410
	融雪 通水状態 水利用・水管理の状態反映												
H24.8.1.11:00	通水状態	1100	1780	795	25	-1125	-1985	-150	-520	-2560	-15	-2540	-470
H24.8.30.(17:00)	落水期(変化前)	1080	1765	790	25	-1125	-1975	-100	-495	-2550	-10	-2540	-475
H24.9.1.(20:00)	落水期(変化後)	1080	1755	750	15	-1130	-1985	-170	-525	-2635	-35	-2610	-490
現在	H24.10.24.14:00	1180	1850	820	10	-1130	-1980	-105	-485	-2665	-5	-2615	-495

凡例 水和反応/乾燥収縮(打設後1日)から100 μ 以上の変化

表-3 分離型構造水路(赤平工区)の鉄筋計ひずみ指示値

時期(時間)	外的環境の変化 (日時)	床版、側壁のつまさき部・かかと部の水平部位の鉄筋ひずみ(概数) $\cdot \mu$						側壁部の鉛直部位の鉄筋ひずみ(概数) $\cdot \mu$						
		SH1-IN	SH2-IN	SH3-IN	SH4-IN	SH4-OUT	SH5-IN	SH5-OUT	SV1-IN	SV1-OUT	SV2-IN	SV2-OUT	SV3-IN	SV3-OUT
H23.12.8:9:00	側壁打設	(-2330)	(-1360)	-100	-2110	80	-1135	-810	190	-1000	-1610	270	1320	210
	・水和反応/乾燥収縮			<-150>	<-2150>	<40>	<-1155>	<-830>	<40>	<-1090>	<-1770>	<100>	<1240>	<140>
H23.12.10.12:00	型枠脱型													
H23.12.15.8:00	側壁打設1週間後	(-2345)	(-1360)	-140	-2100	100	-1145	-790	0	-1200	-1810	70	1230	140
H23.12.22	サイドドレーン埋戻し													
H24.1.5:8:00	側壁打設28日後	(-2340)	(-1330)	-40	-2010	180	-1080	-730	0	-1120	-1820	150	1260	250
H24.1.12.12:00	側壁背面天端埋戻し													
	積雪荷重 雪庇作用、凍上作用 (別途)													
H24.3.31.23:00	(通常の)冬期終了	(-2340)	(-1320)	-70	-2055	185	-1070	-755	-30	-1075	-1775	210	1210	340
H24.4.30.14:00	(通常の)融解期現象	(-2390)	(-1350)	-120	-2090	140	-1095	-775	-150	-1170	-1950	145	1150	280
	欠測													
H24.5.8.14:00	通水開始													
	通水状態	(-2360)	(-1325)	-120	-2090	120	-1100	-780	-130	-1180	-1920	135	1170	275
	水利用・水管理の状態反映													
H24.8.1:10:00	通水状態	(-2405)	(-1360)	-220	-2210	20	-1160	-850	-270	-1360	-1980	0	1090	170
H24.8.30.(17:00)	落水期(変化前)	(-2405)	(-1360)	-225	-2220	15	-1185	-870	-270	-1365	-1990	0	1065	165
H24.8.31.(12:00)	落水期(変化後)	(-2400)	(-1360)	-225	-2220	10	-1185	-870	-280	-1375	-1990	-5	1070	160
現在	H24.10.24.10:00	(-2380)	(-1330)	-200	-2190	40	-1180	-850	-200	-1300	-2010	30	1120	185

凡例 水和反応/乾燥収縮(打設後1日)から100 μ 以上の変化

表-4 試験工区(赤平工区、美唄工区)における積雪深と凍結深

観測日	赤平工区						美唄工区					
	積雪深 (m)	凍結深度(m)					積雪深 (m)	凍結深度(m)				
		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
H23.12.23	0	0	0	0	0	0	0.70	0	0	0	0	0
H23.12.28	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0	0
H24.1.6	0	0	0	0	0	0	1.00	0	0	0	0	0
H24.1.13	0	0	0	0	0	0	1.62	0	0	0	0	0
H24.1.20	0.08	1.40	1.40	1.35	1.35	1.50	1.40	0	0	0	0	0.05
H24.1.27	0.30	2.00	1.60	1.46	1.33	1.25	1.63	0.60	0.07	0	0	0.05
H24.2.3	0.27	2.00	1.52	1.32	1.24	1.16	1.40	0.69	0.20	0	0	0.05
H24.2.10	0.54	2.00	1.44	1.25	1.18	1.09	1.78	0.70	0.24	0	0	0.05
H24.2.17	0.75	2.00	1.42	1.22	1.16	0.77	1.83	0.79	0.36	0	0	0
H24.2.24	0.61	2.00	1.34	1.14	1.10	0.66	1.63	0.77	0.40	0	0	0
H24.3.3	0.52	2.00	1.32	1.13	1.06	0.62	1.53	0.81	0.43	0	0	0
H24.3.9	0.41	2.00	1.32	1.11	0.92	0.61	1.39	0.81	0.42	0	0	0

(2) 冬期の鉄筋ひずみの推移

各試験工区における積雪深と凍結深の推移を表-4に示した。美唄工区での凍結は側壁に近い領域に限られるが、冬期にいても工事を行った赤平工区では側壁背面の広い領域に凍結が見られた。凍上力・雪底力が作用する冬期では、以下のような鉄筋ひずみの変化を得た。

〈一体型フルーム水路〉

美唄工区では底版部SH3(側壁下部ハンチに近い水路側)、および側壁の中位SV2と下位SV3にそれぞれ図-5, 6, 7の鉄筋ひずみの推移がみられた。

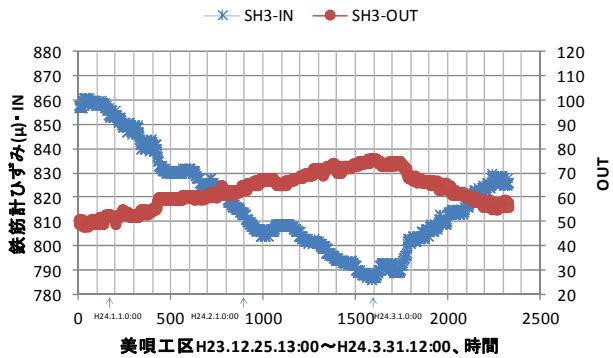


図-5 側壁に近い底版部位での鉄筋ひずみ変化

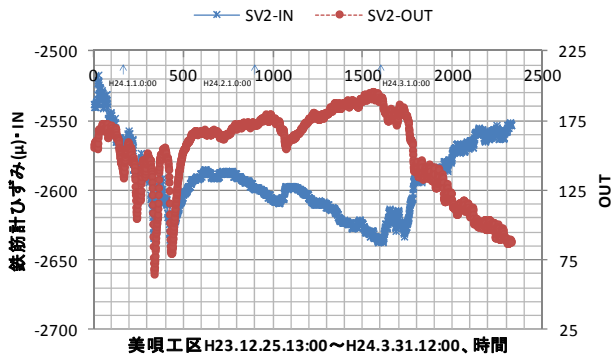


図-6 側壁中位SV2の鉄筋ひずみ変化

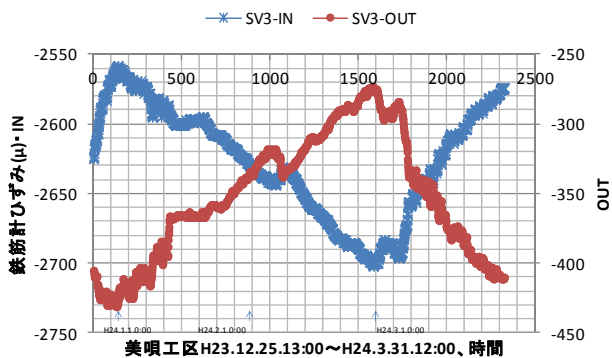


図-7 側壁下位SV3の鉄筋ひずみ変化

側壁上位では曲げモーメントが発現しないようであるが、中位や下位の箇所では比較的大きな曲げモーメントが作用し、水路側へと屈曲(側壁背面で伸張(引張)、水路側で収縮(圧縮))する応力が作用している。

また、大きな曲げモーメントではないが、側壁に近い部位の底版に、上面側で収縮(圧縮)と下面側で伸張(引張)が生じているのが特徴的である。

〈分離構造型水路〉

赤平工区では床版には、特徴的な変化は皆無であり、側壁(分離型擁壁)ハンチ部に近い底版部位(水路側、背面側)と側壁下位において冬期の特徴的な鉄筋ひずみ変化を計測できた。側壁下部ハンチに近い水路側SH4、同背面側SH5および側壁下位SV3の鉄筋ひずみをそれぞれ図-8, 9, 10に示した。

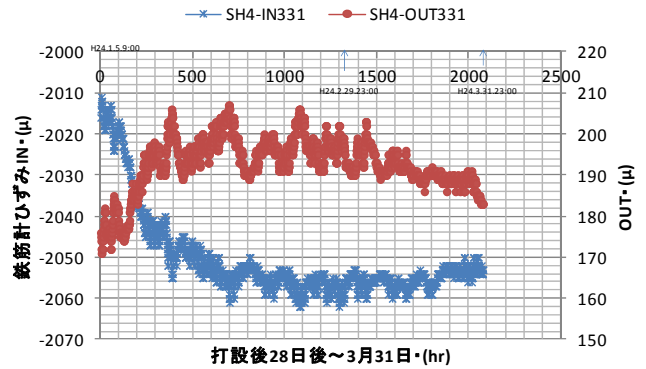


図-8 側壁に近い底版部位SH4の鉄筋ひずみ変化

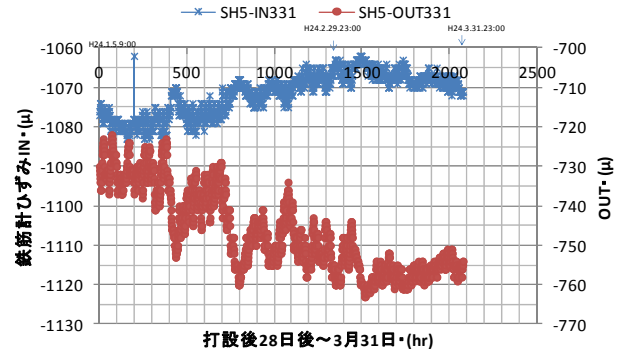


図-9 側壁に近い底版部位SH5の鉄筋ひずみ変化

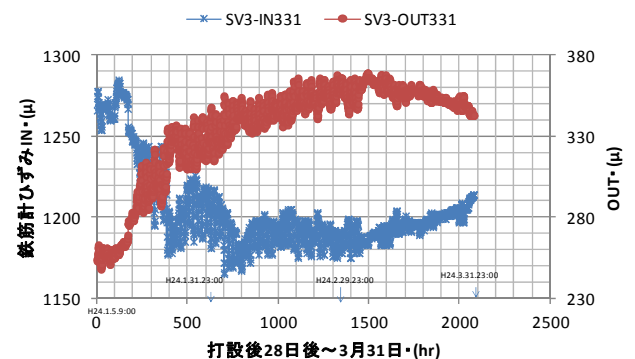


図-10 側壁下位SV3の鉄筋ひずみ変化

側壁下位において比較的大きな曲げモーメントが発現する。底版部においては、水路側では内空側凹な変位(上面側収縮(圧縮)、下面側伸張(引張))、背面側では上面側が伸張(引張)、下面側で収縮(圧縮)となる逆T型の特徴が表れている。これらの鉄筋ひずみの変化量を使って、後述の曲げモーメントの照査を行った。

(3) 地下水位・間隙水圧・土圧の測定結果

赤平工区における通水時と落水時の水路躯体へ作用する浮力(間隙水圧)の推移を図-11、12に例示した。

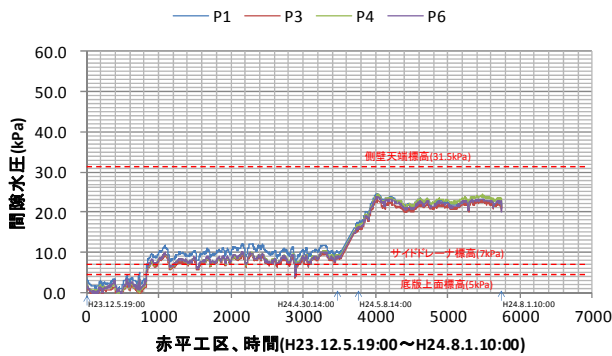


図-11 水路底部の間隙水圧の推移(冬期～通水時期)

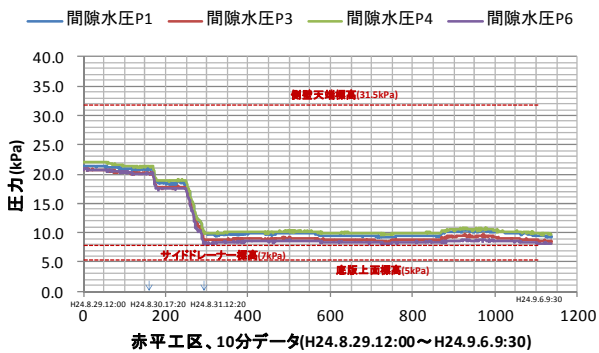


図-12 水路底部の間隙水圧の推移(落水時期)

間隙水圧は地山の水位よりは、埋戻し断面内の水位に影響を受け、また、図-11、12のように断面内で等しい水圧が生じている。ほぼ水路内の水位変動に追従して、間隙水圧は発生する。また、落水後は図-12のように、間隙水圧はサイドドレーナ標高程度に低下する。(美唄工区では、水路近辺の土地形状等の影響を受け、幾分高い位置水頭で残る。)

美唄工区においても、間隙水圧の大きさは均等であることを確認した。

土圧(全応力)の測定は、受圧面に応力集中したりするなど測定では、設置と解析に留意が必要である。分離型構造水路(赤平)では、先行設置の床版と側壁(逆T擁壁)のつまさき部との隣接付近での土圧(地盤反力)の連続性が重要である。図-13は通水期の土圧分布の解析1例である。図-13では、かかと部の背面土塊の重量や側壁の自重により、側壁下端に偏した土圧(地盤反力)が発生しているが、底版と床版にはおよそ等しい土圧が連続して発生しており、突合わせ構造がうまく機能していることが確認された。

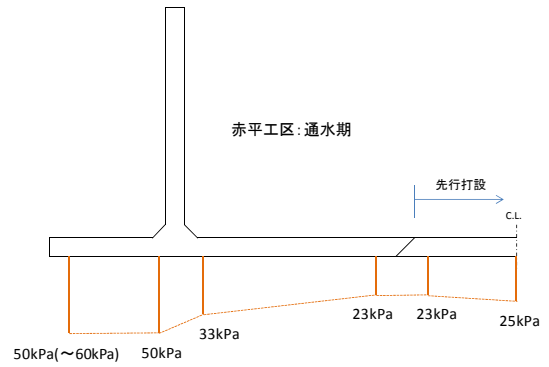


図-13 分離型水路における土圧(全応力)分布

(4) 水路のレベル測量

試験区の地盤条件および分離型水路での床版とつま先部との相対変位の有無等を注目し、通水時と落水時(赤平工区は1m水位低下後)の水路の変位を計測した(写真-1参照)。水重の有無によるリバンド量は小さく(美唄工区で1cm以下、赤平工区で約1cm)、両試験区とも比較的堅固な地盤とされ、また、分離型水路の相対的変位が無いことを確認できた。



写真-1 水路底のレベル測量概況(通水時)

5. 設計条件と曲げモーメントの検討

地盤反力分布の検証事例として、図-14に赤平工区(分離型水路)における通水時期の地盤反力分布の推定を示した。前出の図-13と同時期の地盤反力分布である。

地盤反力の総和は、躯体の自重・通水中の水重・かかと部にかかる側壁背面土塊重量に相等しい。図-14のように躯体自重と水重を等分とし、背面土塊重量を側壁底版に三角形分布荷重とした重ね合わせは、図-13の実測した分布と符合が良い。設計時に想定した重要な点-床版での鉛直方向の外力の釣合い(このことにより床版には大きな曲げモーメントが生じない)-および-床版と底版の突き合わせ部における外力の釣り合い-を検証することができた。一方、かかと部を有し、背面土塊重量

が作用する場合は、底版での分布の様子をさらに継続して検証することが肝要とされる。

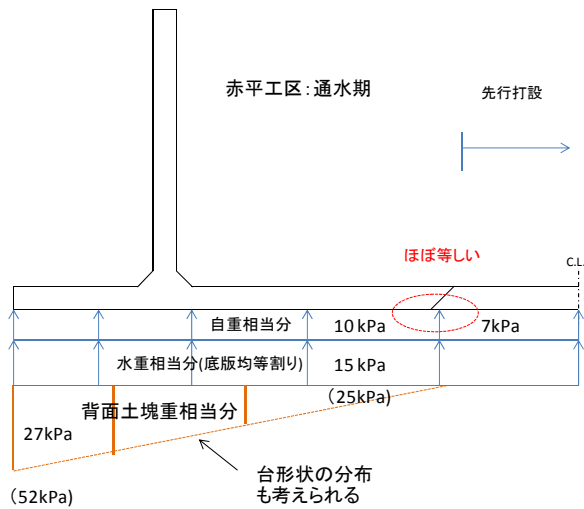


図-14 分離型水路における地盤反力分布推定

計測した鉄筋ひずみ計の指示値の大きさでは、コンクリートの曲げ耐力を評価するより、鉄筋応力と弾性解析手法を用いて、曲げモーメントの大きさを逆推定の方が便益的である。すなわち、換算断面2次モーメントによる方法²⁾を使い、内部応力から発生している曲げモーメントを逆算する。このとき、中立軸まわりの換算断面2次モーメントは圧縮コンクリート、引張コンクリート、圧縮鉄筋、引張鉄筋の4成分の和として求めた³⁾。

周年の時期の中で大きな曲げモーメントが発生しやすい冬期(土圧、凍上力、背面地下水圧および底部での浮力等が作用)の鉄筋ひずみから逆算した曲げモーメントの計算例は表-5のとおりである(計算には、側壁背面土の埋戻し直前の鉄筋ひずみの指示値と冬期に最大の変化を示す時点との階差およびヤング係数比 $n=10$ を使用)。

表-5 鉄筋ひずみから逆算した曲げモーメント(赤平)

部位	鉄筋ひずみ計	ひずみ増減(μ)	推定曲げモーメント(kN・m)	
			計算値	平均値*
床版	SH1-IN	ほぼ変化なし	0	-
	SH2-IN	ほぼ変化なし	0	-
かかと部 つまさき部	SH3-IN	約15 μ 収縮	5.2	(5.2)
	SH4-IN	約45 μ 収縮	-15.6	-10.1
	SH4-OUT	約20 μ 伸張	-4.6	
	SH5-IN	約15 μ 伸張	-5.2	-6.1
	SH5-OUT	約30 μ 収縮	-6.9	

* -IN(上面側)と-OUT(下面側)で求めた曲げモーメントの平均鉄筋ひずみ計の較正係数は、全ての鉄筋計で約0.077MPa/ μ

部位/位置	鉄筋ひずみ計	ひずみ増減(μ)	推定曲げモーメント(kN・m)	
			計算値	平均値*
側壁/上位	SV1-IN	(硬化)収縮継続	-	-
	SV1-OUT	(硬化)収縮継続	-	
側壁/中位	SV2-IN	(硬化)収縮継続	-	(0)
	SV2-OUT	ほぼ変化なし	0	
側壁/下位	SV3-IN	約80 μ 収縮	-14.9	-17.9
	SV3-OUT	約110 μ 伸張	-20.9	

* -IN(通水断面側)と-OUT(背面側)で求めた曲げモーメントの平均鉄筋ひずみ計の較正係数は、全ての鉄筋計で約0.077MPa/ μ

表-5によれば、床版には小さな曲げモーメントも生じず、また、底版突き合わせ先で約5kN・m、その他の位置で10kN・m以下程度の比較的小さな曲げモーメントが生じたとされる。これらの曲げモーメントは設計時に予測した値に比べて小さく安全であり、分離型水路により水路底部での大きな曲げモーメントの発生を制御できたものと思われる。

また、側壁の上位・中位では曲げモーメントは観測されず、下位で観測される。その大きさは20kN・m程度以下であるが、一体型のフルーム水路側壁部で観測される曲げモーメントのオーダー相当である。

ここでは割愛したが、その他の時期の設計条件での照査、また、一体型フルーム型水路についても設計値との検証を行った。

6. おわりに

およそ1年の周期的な事象を通じて、2つの異なるタイプの水路の構造的安定性が目視観察や当該のような解析により確認された。一方、設計としての外力の大きさや作用範囲については、今後も精査が望まれる。とくに気候に左右され易い凍上外力や雪底力については、引続き計測と分析を行い、精度と確度のある設計手法として確立したい。

謝辞：本試験の計画にあたり、独立行政法人寒地土木研究所水利基盤チーム等の関係機関から有益な助言を頂いたほか、調査や解析では(株)農土コンサル秀島技術本部長からも多くの助言を頂いた。ここに深謝の意を表する。

参考文献

- 1) 上野豊ら(2012)：北海幹線用水路の設計の考え方及び検証方法について、第55回(平成23年度)北海道開発技術研究発表会論文集、CD-ROM版
- 2) 吉川弘道(1995)：鉄筋コンクリートの解析と設計、p75、丸善
- 3) 岡本寛昭(2012)：擁壁・カルバートの限界状態設計、pp4-5、鹿島出版会