

北海幹線用水路の設計の考え方 及び検証方法について

札幌開発建設部 岩見沢農業事務所 工事課 ○上野 豊
池下 裕幸
淵 洋平

北海幹線用水路は全長約 80km、水路内幅は最大約 14m に及ぶ長大水路である。約 40 年前に建設された当該水路の改修を国営かんがい排水事業北海地区で行うに当たって、側壁の高さに対して水路幅が広いという特徴に着目した上で設計の考え方を検討した結果、水路底幅 10m 程度を境界として、上流側を床版と側壁が分離した構造とし、下流側を一体の構造とした。本稿ではその考え方及び水路にかかる土圧、水圧、浮力、地盤反力、凍上力等の設計の前提となる荷重が実際にどの程度発生するのか、水路にどのような影響を与えるのかということについての検証方法を報告する。

キーワード：大型フルーム水路、構造計算、浮力、地盤反力、凍上力

1. はじめに

北海幹線用水路は北海道の道央部の赤平市を起点とし、砂川市、奈井江町、美瑛市、三笠市、岩見沢市、南幌町の4市2町、約80kmにわたって流下する長大な水路である。起点の北海頭首工では、最大で44m³/secを取水し、光珠内調整池や市来知頭首工等からの補水を受けながら、約17,000haに及ぶ農地に農業用水を供給する空知地域の農業用水の大動脈である。(図1)



図1 北海幹線用水路位置図

現在の北海幹線用水路は国営かんがい排水事業美瑛地区(以下、「美瑛地区」という。)で昭和32年度～54年度に整備された区間と国営かんがい排水事業空知中央地区(以下、「空知中央地区」という。)で昭和54年度～平成20年度に整備された区間が混在しており、美瑛地区で

整備された区間の大部分である約33kmについては、用水路の耐用年数である40年を超過し、傾倒(写真1)や凍害(写真2)等の水路本体の劣化が著しく、一部区間は倒壊を起こすなど早急に改修する必要があることから、国営かんがい排水事業北海地区(以下、「北海地区」という。)で改修を行っている。

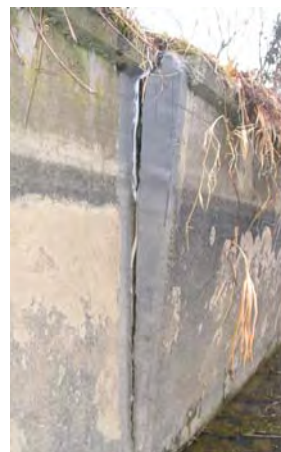


写真1 傾倒状況

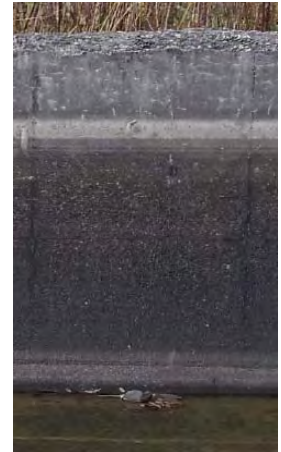


写真2 凍害状況

事業の実施に当たり、水路本体の設計を検討したところ、北海地区で改修する水路断面は、最も上流の赤平地域で水路幅14.0m、側壁高2.6mであり、最も下流の栗沢地域では水路幅6.3m、側壁高1.9mと、同じ一条の水路でありながら水路幅は上流と下流で倍以上の違いがあった。

水路幅は水路の構造に与える影響が大きい。水路幅が広くなると浮力や地盤反力により、水路底板中央部に非常に大きなモーメントが作用することから、底板の厚さや鉄筋の量が大きなものとなってしまう、結果としてコ

ストの高い水路となってしまう。そこで、水路幅が広い区間においては、水路床版と側壁を縁切りして、それぞれ独立した構造体として設計することでコストを抑えた水路にできるのではないかと考え、検討を行った。

最上流から考えると、用水の分水に伴い水路幅は徐々に狭くなり、側壁高も徐々に低くなることから、どの区間から縁切りした水路とすべきであるのかという点については、それぞれの区間で詳細設計を行うだけでは見えてこない。この点以外にも、基本的な構造計算の考え方やサイドドレーン、目地、安全防護柵等、北海幹線用水路全体の統一した考え方が必要であったことから、北海地区の事業開始直後から検討を始め、昨年度北海幹線用水路全体整備計画を作成し、その中で北海幹線用水路設計施工指針（以下、「設計施工指針」という。）を策定した。本稿では、設計施工指針策定の中で議論のあった事項の中で特に水路幅の違いに着目した用水路の構造の考え方について述べる。

2. 構造計算の基礎

(1) 水路形式

構造計算は、土地改良事業計画設計基準「水路工」（以下、設計基準水路工という）に準拠して行った。水路形式は水路側壁と底版が構造的に一体となって土圧、水圧等の荷重を支持する型式のフルーム水路とし、水路背面の地下水位を下げるためサイドドレーンを設置した図1モデルケースの標準断面（フーチング無し）と水路背面に地下水位があり、浮上に対する対策が必要な場合（設計基準水路工P333式(8.1.6)を満たさない場合）はフーチングを設けることとした図2モデルケースの標準断面（フーチングあり）となる。

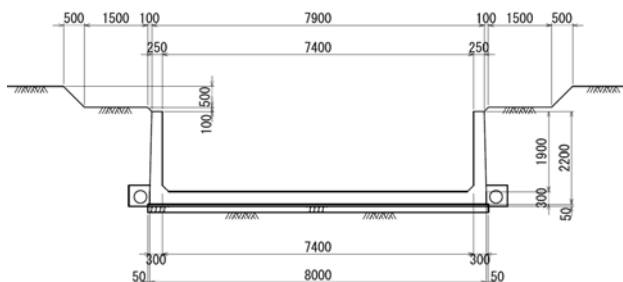


図1 モデルケースの標準断面（フーチング無し）

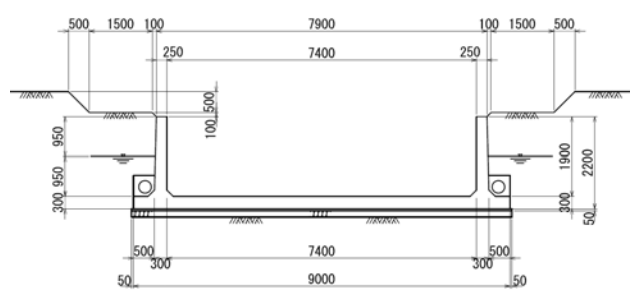


図2 モデルケースの標準断面（フーチングあり）

(2) 荷重

水路断面に作用する荷重は、水路自重、土圧、載加重（自動車加重、積雪加重）、水路内及び水路背面の水圧、水路内の水の重さ、地盤反力、揚圧力、凍上力及び雪庇力とした。各荷重については以下の前提としている。

a) 土圧、地盤反力

土圧はクーロン土圧公式を用いる（設計基準水路工P210）。また、地盤反力については、水路底版自重は底版反力と相殺させ、底版側壁の自重、水路内の水の重さ及びフーチング上部の土重に対して水路底版に等分布の反力が発生するとして計算を行った（設計基準水路工P242, P336）。

b) 載荷重

載荷重については、夏期は自動車荷重(T-14)、冬期は積雪荷重とした。

c) 水路背面水圧

水路背面の地下水位については、サイドドレーンの流末で水路外に排水できる場合は考慮しないこととし、水路内に排水を行う場合は側壁高の1/2とした（設計基準水路工P209）。

3. 構造解析

水路背面の地下水位を考慮する必要が無くフーチングを設けない場合（図1）と地下水位を考慮する必要がありフーチングを設ける場合（図2）について構造計算の結果を以下に示す。

(1) フーチングを設けない場合

a) ケース1：冬期空虚時

地下水がない場合の冬期空虚時の荷重図を図3に示す。このとき側壁及び底版外側の断面計算の支配的なケースとなり、モーメントは図4のとおりとなる。

図のとおり、側壁の付け根の側壁外側及び底版上側に最も大きなモーメントが作用する。

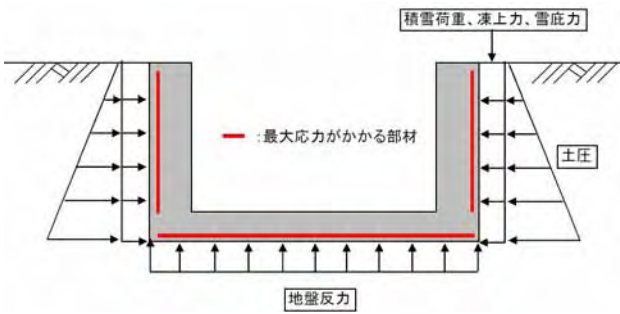


図3 ケース1 荷重図

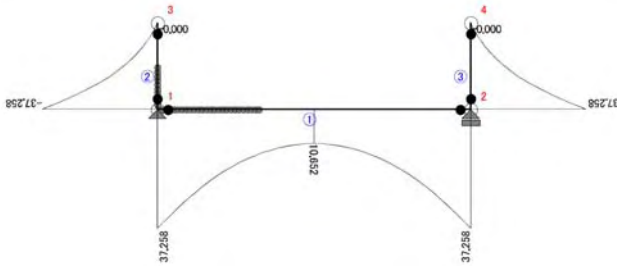


図4 ケース1 モーメント図

b) ケース2：夏期満水時

地下水がない場合の夏期満水時の荷重図を図5に示す。なお、上載荷重の自動車荷重は安全側に働いたため、考慮しない。

このとき側壁及び底板内側の断面計算の支配的なケースとなり、モーメントは図6のとおりとなる。

図のとおり、側壁内側では側壁付け根でモーメントが最大となるもののケース1の水路外側と比較すると小さい値となっている。また、水路底板については、底板の中央部でモーメントが最大となる。

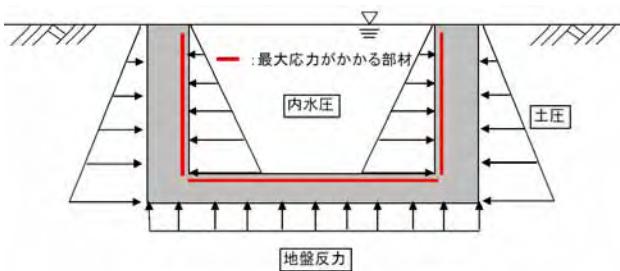


図5 ケース2 荷重図

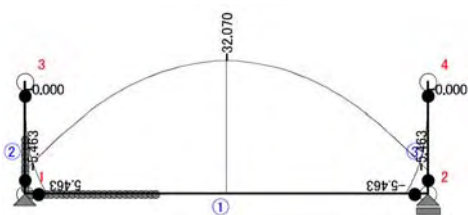


図6 ケース2 モーメント図

(2) フーチングを設ける場合

a) ケース3：冬期空虚時（背面地下水位あり）

地下水がある場合の冬期空虚時の荷重図を図7に示す。フーチングがある場合は、水路背面の地下水位（側壁高の1/2）に応じて発生する浮力を水路自重及びフーチング上部の土重で抑えるという設計となっているため、側壁自重及びフーチング上部の土重に対する地盤反力が底板に均等にかかることとなる。このとき側壁及び底板外側の断面計算の支配的なケースとなり、モーメントは図8のとおりとなる。

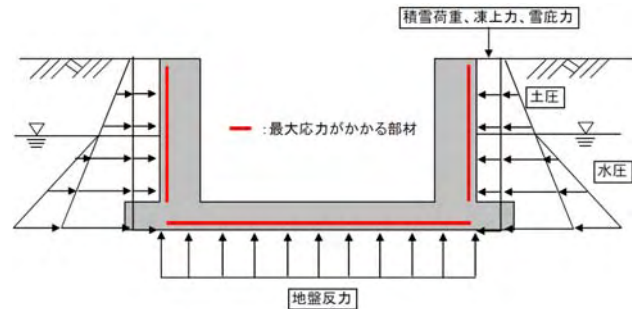


図7 ケース3 荷重図

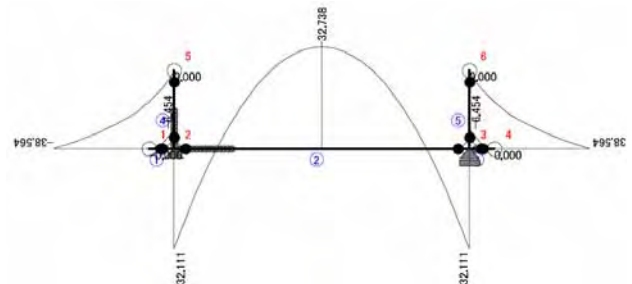


図8 ケース3 荷重図

図のとおり、側壁の付け根に最も大きなモーメントが作用する。側壁外側については背面水の水圧の分だけケース1よりもモーメントが大きくなっており、水路底板についてはフーチングがあることに伴う材端モーメントを差し引くため側壁付け根のモーメントはケース1より小さくなっている。また、水路底板の途中から水路上面に引張がかかっており、中央部において最大となっている。これはフーチング上部の土重の分だけ地盤反力が大きくなっているためである。

b) ケース4：冬期空虚時（背面地下水位なし）

地下水がない場合の冬期空虚時の荷重図を図9に示す。水路背面の地下水位がない場合、フーチングの上部の土重は浮力による軽減がなくそのままかかることから、ケース3よりも地盤反力が大きくなる。このとき底板上面及びフーチング部の断面計算の支配的なケースとなり、モーメントは図10のとおりとなる。

図のとおり、底板中央部に非常に大きなモーメントがかかっている。これは地盤反力が最大となるからである。

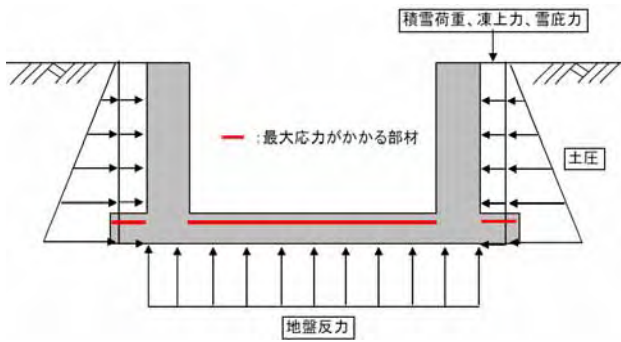


図9 ケース4荷重図

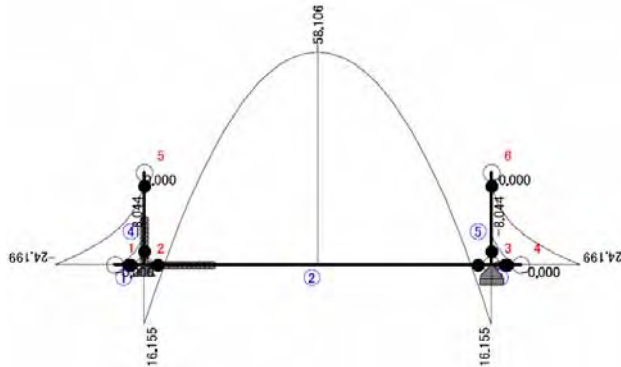


図10 ケース4モーメント図

c) ケース5：夏期満水時（背面地下水位なし）

地下水がない場合の夏期満水時の荷重図を図11に示す。

ケース1よりも地盤反力が大きくなったケースで、側壁内側の断面計算の支配的なケースとなり、モーメントは図12のとおりとなる。

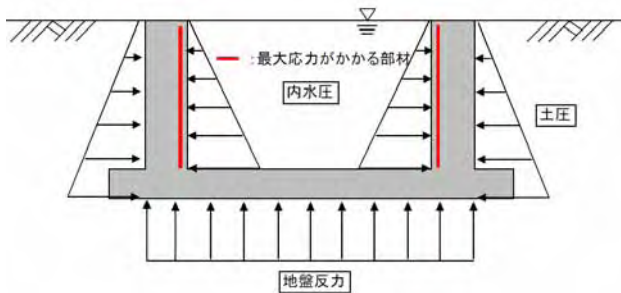


図11 ケース5荷重図

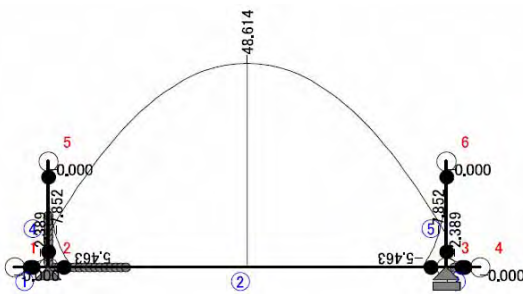


図12 ケース5モーメント図

側壁内側にかかるモーメントが最大となるケースであるが、その値は他の部材よりも小さい。なお、地盤反力が大きくなったことから、水路底版のモーメントは完全に反転しており、水路底版上側に引張応力が発生している。

(3) 小括

以上のように、地下水位を考慮する場合としない場合に分けて水路本体の各部材にかかるモーメントを検討してきた。結果をとりまとめると、最も大きいモーメントが発生するのは、地下水位を考慮しなければならない断面で、冬期空虚時の地下水位がない時（ケース4）であった。このとき水路底版中央の上側の鉄筋に非常に大きなモーメントが発生し、その要因は水路自重及び浮力に対抗するために設けているフーチングの上載土重が直接地盤反力として底版に作用することであった。

次に大きなモーメントが発生するのは地下水位を考慮しなければならない断面で、冬期空虚時の地下水位がある時（ケース3）であった。このとき、側壁付け根の外側の鉄筋に大きなモーメントが発生した。モーメントの大きさは水路底版上側に作用する最大モーメントの2/3程度であり、その要因は水路背面土圧、水圧に加え凍上力及び雪庇力が作用することであった。

また、地下水位を考慮しない断面では、冬期空虚時（ケース1）に側壁付け根の外側の鉄筋及び底版付け根の下側の鉄筋に最も大きなモーメントが発生する。モーメントの大きさは地下水位を考慮する断面の水路底版上側に作用する最大モーメントの2/3程度であり、その要因は水路背面土圧、水圧に加え凍上力及び雪庇力が作用することであった。

地下水位を考慮しない断面で次に大きなモーメントが発生するのは夏期満水時（ケース2）の底版中央の上側の鉄筋であった。モーメントの大きさは地下水位を考慮する断面の水路底版上側に作用する最大モーメントの1/2程度であり、その要因は自重に対する地盤反力及び内水圧が作用することであった。

4. 幅の広い水路の構造検討

3で述べたとおり、水路の各部材にかかるモーメントのうち最も大きいものは水路背面地下水を考慮する断面で冬期空虚時に水路底版上側にかかるモーメントである。その要因は水路自重及び浮力に対抗するために設けているフーチングの上載土重が直接地盤反力として底版に作用することであった。

2(2a)で述べたとおり、地盤反力は底版に均等に作用する考え方となっていることから、中央部のモーメントは次の式のとおりとなり、水路の幅に比例して大きくなることとなる。

$$M = \frac{wB^2}{8} \div \frac{q}{B} \cdot \frac{B^2}{8} = \frac{qB}{8} \quad (1)$$

M : 水路中央モーメント B : 水路幅
q : 側壁自重及びフーチング上載土重

3で計算したモデルケースは水路内幅が7.4mの断面であったが、北海幹線用水路の最上流では水路内幅が14.0mとなることから、モデルケースの2倍程度のモーメントがかかることとなり、モデルケースでは30cmであった底版厚が、水路内幅が14.0mの断面では60cm程度となり、割高な水路となってしまった。

その要因は水路の底版に均等にかかる底版反力であり、その応力を軽減するために一体型のフルーム水路ではなく、床版と側壁に分離した構造の水路（以下、分離型水路という。）を検討した。次項ではその考え方及び構造計算について述べる。

(1) 分離型水路の型式

分離型水路の水路背面水位を考慮しない場合の標準断面を図13に、考慮する場合の標準断面を図14に示す。

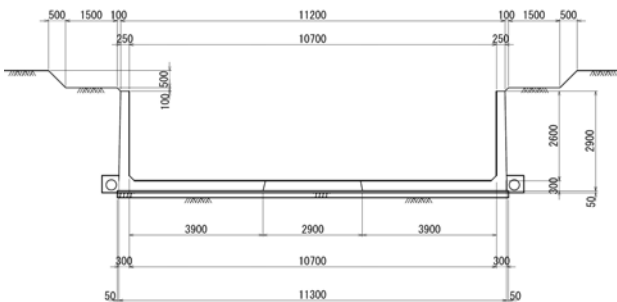


図13 分離型モデルケースの断面（フーチング無し）

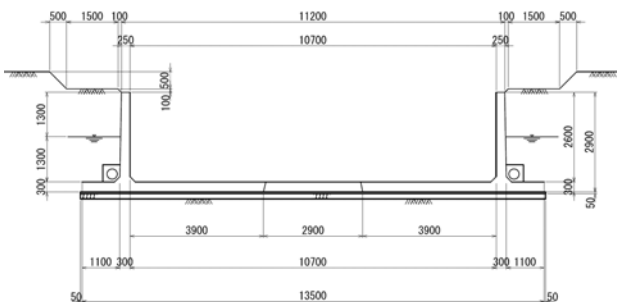


図14 分離型モデルケースの断面（フーチングあり）

分離型水路は水路底版を縁切りして、水路中央床版部分とコンクリート擁壁（フーチングがない場合はL型擁壁、フーチングがある場合は逆T擁壁）とすることとし、擁壁部は土地改良事業計画設計基準「農道」（以下、設計基準農道という）に従って設計した。

設計の考え方で最も大きな違いは、一体型では水路全体をラーメン構造として計算するため、底版は単純梁と

して応力計算を行ったが、分離型では側壁と底版の接合部を固定端とし、堅壁、つま先版（水路底版）、かかと版（フーチング）を片持ち梁として計算することである。

(2) 分離型水路構造の考え方

分離構造の狙いは、底版中央部にかかるモーメントの軽減である。擁壁部はコンクリート擁壁の構造計算を行い、自立するように設計し、床版部は縁切りされているため、自重と地盤反力は釣り合い、一体型のような大きなモーメントが水路中央部に発生しない（図15冬期空虚時荷重図、図16夏期満水時荷重図）。

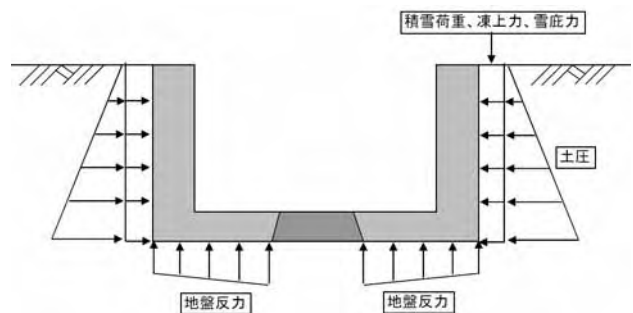


図15 冬期空虚時荷重図

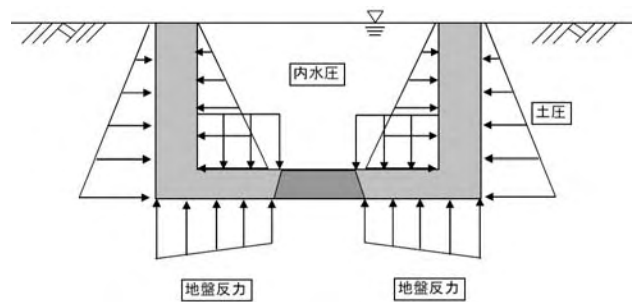


図16 夏期満水時荷重図

また、水路背面水位がある場合、床版部にも均等に浮力が発生することから、床版部を台形とし、擁壁部に浮力をつま先加重としてかけることで床版部も浮上しない構造とした（図17）。

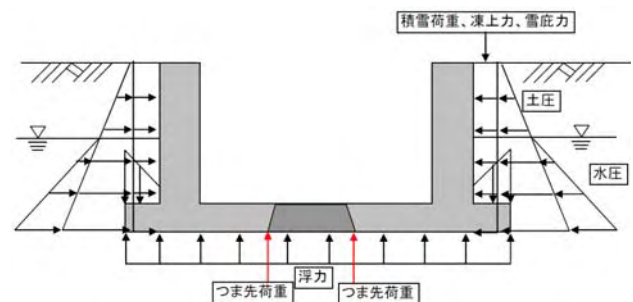


図17 冬期空虚時荷重図（背面水位あり）

このとき床版部については浮力分のみの曲げモーメントが発生することから、底版上部に引張応力が発生するが、

曲げモーメントは13.4kN・m程度であり、一体型として計算した場合の約1/9となる。また、擁壁部については床版部の浮力に伴うつま先荷重を考慮して、逆T擁壁としての安定計算を行った。モデルケースの擁壁部の応力集計図を図18に示す。

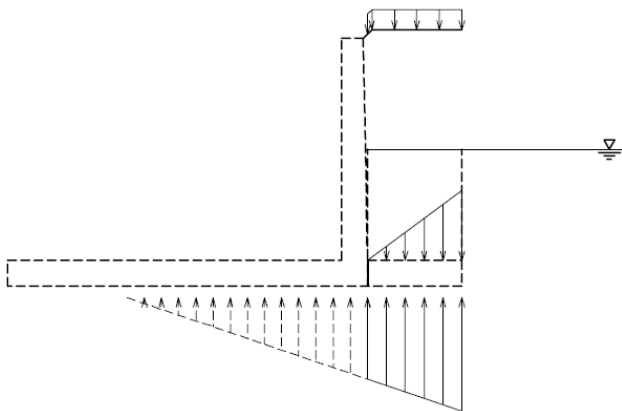


図18 冬期空虚時応力集計図（背面水位あり）

図18のとおり、擁壁部で最も大きなモーメントが発生するのは一体型の底版上側ではなく、フーチング付け根の下側となる。またその値が最大となるのはフーチングがある断面で冬期空虚の背面地下水がない場合となる。

(3) 小括

以上述べたとおり、幅が広い断面の水路においては床版と擁壁部に構造を分離し、各構造体で安定計算及び構造計算を行うことで、一体型で発生した水路底版中央部の非常に大きな曲げモーメントを発生させることなく経済的な設計とすることができた。

北海幹線用水路では一体型と分離型の経済性が均衡するのが水路幅約10mの断面であり、それよりも幅の広い上流は分離型を、狭い下流は一体型を基礎として各詳細設計を行うこととした。

5. 設計の検証

3及び4で述べたとおり、北海幹線用水路では用水路幅約10mを境に一体型と分離型で設計を行うこととした。それぞれの設計はいずれも設計基準による適正なものである。

しかし、設計基準ではいくつかの仮定のもとに構造計算を行っている。その仮定が北海幹線用水路のような大断面の水路でも成立するかという点について検証する必要がある。

また、一体型はラーメン構造として各部材の応力計算を行い、分離型はコンクリート擁壁として各部材の応力計算を行っている。理論上は正しいものの、実際の部材にはどのような応力が係っているのかという点も実際に計測した例が無く不明である。

このことから、本年度施工した一体型と分離型の各1スパンを試験スパンとし、図19のような機材を設置した。

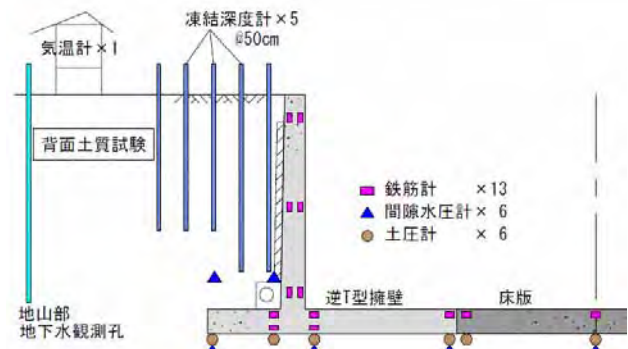


図19 試験スパン観測機器配置図

鉄筋計で各部材にかかる応力を把握し、土圧計、間隙水圧計、凍結深度計の各測定結果を合わせて水路全体にどのような力がかかり、水路の各部材にどのような応力が作用しているかについて把握し、設計の考え方にフィードバックさせていきたい。

謝辞：本論文は、北海地区実施にあたり、北海幹線用水路全体整備計画を策定する中で行った議論や結果をとりまとめたものである。業務を担当したフロンティア技研（株）の鈴木技術部次長から非常に有益で多くの知見を頂いたことに深謝の意を表す。また、設計の考え方の妥当性及び検証方法については、独立法人寒地土木研究所の中村上席研究員、小野寺総括主任研究員、佐藤主任研究員、石垣研究員から非常に有益な助言を頂いた。ここに深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 農業農村工学会：土地改良事業計画設計基準設計「水路工」基準書 技術書
- 2) 農業農村工学会：土地改良事業計画設計基準設計「農道」基準書 技術書