

大雪頭首工の改修工事に伴う 耐震設計と施工について —工法検討から施工まで—

旭川開発建設部 旭川農業事務所 第1工事課 ○笠野 良太
中川 耕一
前田 昌則

石狩川上流部の愛別町に築造された大雪頭首工は、昭和46年の建設以来40年以上が経過し、施設の老朽化に伴って耐震性能の低下が確認されている。

このため、国営かんがい排水事業「当麻永山用水地区」において平成26年度より補修及び耐震補強を目的とした改修工事を実施しており、耐震補強工事は令和元年度までに完了した。

本稿は、大雪頭首工の補修・補強工法と施工計画を報告するものである。

キーワード：自然災害、危機管理、防災

1. はじめに

大雪頭首工は、一級河川石狩川水系石狩川から取水する基幹的農業水利施設として、国営当麻永山土地改良事業（昭和43年度～昭和54年度）により上川郡愛別町に建設され、昭和46年に竣工した。石狩川上流には水源として大雪ダムが昭和52年に竣工し、大雪頭首工から幹線用水路を介して上川郡当麻町及び旭川市の3,591haの農地に用水を供給している。

国営当麻永山土地改良事業により造成された施設は完成から40年以上が経過し、老朽化等により用水の安定供給に支障を来している。特に大雪頭首工においては、流水による摩耗や河床の低下、凍害による断面欠損やひび割れが発生しており、また耐震性能の不足も確認されている。このため、平成25年より国営かんがい排水事業「当麻永山用水地区」を実施し、頭首工及び用水路の改修・補修が行われている。

本稿では、当麻永山用水地区で実施した一連の工事のうち、大雪頭首工の耐震補強工事についての、工法の検討、施工計画及び施工状況について報告する。なお、本地区は令和4年度の完了を予定しているが大雪頭首工の耐震補強工事は令和元年度までに完了している。

表-1 大雪頭首工の主な諸元

項目	諸元
堰型式	フィックスドタイプ全可動堰（直接基礎）
洪水吐	鋼製ローラーゲート、28.00m×3.04m×2門
土砂吐	鋼製ローラーゲート、20.00m×3.54m×1門
堤長	268.00m（うち堰長86.00m）



図-1 大雪頭首工の全景

2. 耐震性能照査

(1) 照査の方針

はじめに、耐震性能照査により、大雪頭首工がどの程度の耐震性能を有しているかを確認した。耐震性能照査及び耐震設計については、「土地改良事業計画設計基準設計『頭首工』」¹⁾に準拠して実施した。

頭首工の重要度区分において、本頭首工は、重要度AA種の大規模（支配面積5,000ha以上）な頭首工ではなく、重要度B種の固定堰や床止工等でもないため、重要度A種に該当する。重要度A種の頭首工が保持すべき耐震性能は、レベル1地震動に対して健全性を損なわないこと、またレベル2地震動に対して致命的な損傷を防止すること、となっている。また構成要素ごとの耐震性能の考え方としては、堰柱（一体となっている門柱を含む）、堰柱基礎工、ゲートについてレベル2地震動に対する耐震性能を保持する必要がある¹⁾。

レベル2地震動に対する耐震照査は、堰柱では地震時保有水平耐力法（静的解析）によることを基本とし、ゲートでは耐震性能に応じた照査を行う必要がある。また堰柱基礎工については、本頭首工は直接基礎形式であり、レベル2地震動による照査は行わなくてよい¹⁾ため、照査及び耐震補強工事は実施しないこととした¹⁾。

(2) 堰柱の耐震性能照査

先述した照査の方法を踏まえ、地区調査の段階である平成21年度に、中間堰柱について地震時保有水平耐力法（静的解析）による耐震性能照査を実施した。この照査では、堰柱基部及び門柱基部の耐震性能が不足しているという結果が得られた。

レベル2地震動に対する耐震照査については、先述のとおり地震時保有水平耐力法によることを基本とする一方、構造が複雑で固有値解析において1次振動モードが支配モードとならない場合は動的解析による照査を行わなければならない。このため、平成24年度に堰柱の振動特性を把握するために固有値解析を行った。固有値解析は、単純な振動特性である1次振動モードが支配モードとなっているのか、複雑な振動モードが支配モードとなっているのかを判定するものである。解析の結果、いずれの振動モードも有効質量比が小さく、複雑な振動モードが支配モードとなっていることが確認された²⁾。堰軸方向における有効質量比の比較的大きいモード図を図-2に示す。

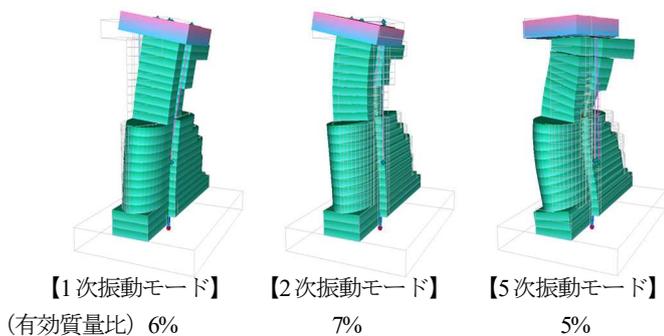


図-2 P3堰柱の固有値解析結果によるモード図

この結果を踏まえ動的解析による耐震照査を実施し、その後更新する洪水吐ゲート及び土砂吐ゲートの重量が変更となったことから、平成29年度に再度動的解析による耐震照査を実施した。

平成29年度の耐震照査は、微少時間間隔に離散化した地震動データを用いて、項目ごとの運動方程式を微少時間間隔ごとに数値的に積分して時々刻々の応答を算出する、非線形時刻歴応答解析法により実施した。タイプI（プレート境界型地震）及びタイプII（内陸直下型地震）のそれぞれ3波形を入力地震動とし（表-2）、照査項目は曲げ、せん断、変位の3項目とした¹⁾。動的解析の結果、堰柱4本（P1～P4）のうち、P1、P4の堰柱基部のせん断

耐力が、P3の門柱基部及び堰柱基部のせん断耐力が、それぞれ不足していることが確認された（表-3、図-3）。各堰柱で不足しているせん断耐力は、P1堰柱の堰柱基部が829.9kN、P3堰柱の門柱基部が60.7kN、P3堰柱の堰柱基部が237.7kN、P4堰柱の堰柱基部が608.3kNであった。P2堰柱は、土圧が作用するP1及びP4、洪水吐ゲート2門を吊り下げているP3と比較してかかる荷重が小さいため、レベル2地震動に対する耐震性能を有しているという結果になった。

表-2 動的解析で用いた入力地震動

地震波	地盤種別	地震名	規模(M)	記録場所
タイプI	I種地盤	1978年 宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上 LG
		1978年 宮城県沖地震	7.4	開北橋周辺地盤上 TR
		1993年 北海道南西沖地震	7.8	七峰橋周辺地盤上 LG
タイプII	I種地盤	1995年 兵庫県南部地震	7.2	神戸海洋気象台地盤上 N-S
		"	7.2	神戸海洋気象台地盤上 E-W
		"	7.2	猪名川架橋予定地点 周辺地盤上 N-S

表-3 耐震性能照査結果（せん断耐力を超過した要素数）

	ゲート	地震動	照査項目	P1	P2	P3	P4
				堰柱	堰柱	堰柱	堰柱
堰軸方向	開扉	タイプI	許容曲率	0/0	0/0	0/0	0/0
			せん断耐力	0/0	0/0	0/0	0/0
		タイプII	許容曲率	0/0	0/0	0/0	0/0
			せん断耐力	0/2	0/0	4/1	0/3
	閉扉	タイプI	許容曲率	0/0	0/0	0/0	0/0
			せん断耐力	0/1	0/0	0/0	0/0
タイプII	許容曲率	0/0	0/0	0/0	0/0		
	せん断耐力	0/3	0/0	1/1	0/2		

※表中の数字は、（門柱部で超過した要素数） / （堰柱部で超過した要素数）を示している。また、全ての条件で、降伏部材が発生しなかったため、残留変位は発生しなかった。

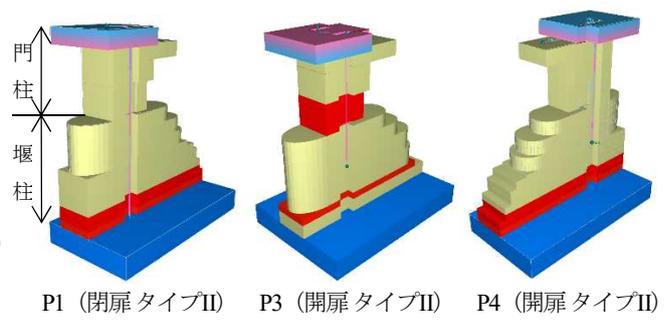


図-3 せん断耐力超過箇所（各堰柱で超過範囲が最大るとき）

(3) ゲートの耐震性能照査

ゲートの耐震性能照査については、関連する技術書等を参考に照査を行ってもよいことから、国土交通省の指針である「河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説—IV.水門・樋門及び堰編」³⁾により行った。タイプI及びタイプII地震動について、それぞれ堰柱の固有周期を基に決定した設計水平震度を用いて、地震による波浪高を考慮した静水圧、地震時動水圧、地震時慣性力を求め、その他の荷重と合計して各点にかかる荷重を算出した。照査の結果、洪水吐ゲート、土砂吐ゲートともにサイドローラ及び戸当りローラレールの応力が不足していることが確認された。不足している応力は、最も不足している点で、洪水吐ゲートでは1,618.3N/mm²、土砂吐ゲートでは1,295.6N/mm²であった。

3. 補強工法の検討

耐震性能照査の結果を踏まえ、補強工法の検討を行った。

(1) 堰柱の工法の検討

堰柱の工法の検討では、技術的に蓄積のある道路橋の耐震補強工等を参考にした。本頭首工の場合、流下断面やゲートの開閉に支障が生じるため、鉄筋コンクリートによる増厚や巻き立てを行う工法は検討から除外した。

堰柱基部は流水部であるため土砂礫等に対する耐衝撃性を有する工法とするのが望ましいことなどを踏まえ、検討した結果、躯体を鋼板で巻き立てる鋼板巻立法、既設鉄筋コンクリート表面を主鉄筋位置まではつり出し既設配力鉄筋の間に補強鉄筋を配置する帯鉄筋補強工法、

躯体をボーリングマシン等で削孔し鉄筋を挿入する鉄筋挿入工法の3つが採用可能であることが分かった。この3工法を比較したところ(表4)、中間堰柱(P3)の堰柱基部は鋼板巻立法を採用することとし、中間堰柱の門柱基部は流心方向の部材延長が短く鋼板巻き立てによる拘束長がとりにくいため、両端の堰柱(P1、P4)は河岸に隣接しており鋼板を全周巻き立てることができないため、いずれも鉄筋挿入工法を採用することとした。

(2) 堰柱の補強材の検討

東・中・西日本高速道路株式会社「設計要領第二集橋梁保全編」⁴⁾によると、鋼板巻き立て工法に用いる鋼板の厚さは、原則として6mm、9mm、12mmのいずれかから選定する、とされている。板厚の決定のため、最小の6mmを採用した場合のせん断耐力を算定する。コンクリートが負担するせん断耐力は変わらないため、帯鉄筋の負担するせん断耐力のうち鋼板巻き立てによる増加分を算定し、不足している耐力と比較する⁵⁾。

$$S_s = \frac{Aw \cdot \sigma_{sy} \cdot d(\sin \theta + \cos \theta)}{1.15a}$$

$$= \frac{(6 \times 300) \times 235 \times 2450 \times (\sin 90^\circ + \cos 90^\circ)}{1.15 \times 300}$$

$$= 3003.9(\text{kN})$$

ここに、 S_s : 帯鉄筋が負担するせん断耐力 (N)

d : せん断耐力を算定する方向に平行な方向の有効幅 (mm)

Aw : 間隔 a 及び角度 θ で配筋される帯鉄筋の断面積 (mm²)

σ_{sy} : 帯鉄筋の降伏点 (N/mm²)

θ : 帯鉄筋と鉛直軸のなす角度 (°)

a : 帯鉄筋の間隔 (mm)

表4 堰柱の補強工法の比較

	鋼板巻立法	帯鉄筋補強工法	鉄筋挿入工法
概要図			
工事概要	躯体を鋼板で巻き立ててアンカーボルト等で固定するとともに、その間隙を充填剤などにより密実させることで、部材のじん性を向上させる工法。	既設鉄筋コンクリート表面を主鉄筋位置まではつりだし、既設配力鉄筋の間に補強鉄筋を配置することで、せん断耐力の向上を図る工法。	躯体をボーリングマシン等で削孔し鉄筋を挿入するとともに、孔内をグラウト等で充填し既設コンクリートとの一体化を図る。躯体表面は支保等で固定する。
構造特性	鋼板厚がそのまません断耐力として寄与するため、補強箇所のせん断耐力が向上する。外周の巻き立てにより横拘束効果も得られる。	補強した配力鉄筋が、そのまま部材内の配力筋(帯鉄筋)として機能することにより、せん断耐力の向上が図れる。	補強(挿入)した鉄筋が、そのまま部材内の中間帯鉄筋として機能することにより、せん断耐力の向上が図れる。
留意事項	躯体外周全てを鋼板で巻き込む場合は、せん断補強に対して効果的に機能するが、戸当り等により巻き込みない場合は、加齢等に鋼板が摩耗するなどの耐久性に支障が生じる恐れがあるため、拘束効果を見込まないものとする。接着工法に留意が必要。	躯体のはつり作業時、既存の鉄筋を損傷しないようにするほか、主鉄筋との結束が可能な範囲をはつる必要があるため、はつり作業には注意が必要。表面を復旧するポリマーセメント等の施工も躯体との確実な一体化を図るなどの配慮が必要。	躯体の削孔時、既存の鉄筋を損傷させないように、事前に入念な調査・確認を行う必要がある。また、グラウト充填や表面の定着具の設置などが良好でないと、所要の効果が得られないことなどに留意する必要がある。
施工性	既存の躯体の外側に、補強材を追加する工法のため、施工性の面では最も優れる。	補強対象箇所をはつる作業となることから、施工性及び施工期間ともに劣る。	堰柱部は部材厚が大きいことから、削孔作業等を考慮すると、施工性の面で劣る。
適応性	戸当り部との干渉等に留意すれば、適用は可能。	躯体内での補強工事であることから適用は可能である。	削孔作業などに留意すれば適用は可能と考えられる。
施工費(比率)	1.00	3.50	1.00
評価	○	△	○
適用箇所	P3 堰柱基部	(なし)	P1 堰柱基部、P3 門柱基部、P4 堰柱基部

計算結果より、 S_s がP3堰柱基部で不足しているせん断耐力237.7kNを上回るため、補強鋼板の厚さは6mmとした。

鉄筋挿入工法では、背面に河岸の地盤が隣接していても施工が可能なポストヘッドバー（以下、「PHb」という。）工法を採用することとした。PHb工法は、コンクリートに有効に定着しやすいように両端にプレートが圧接された鉄筋（ポストヘッドバー：後施工プレート定着型せん断補強鉄筋）を補強鉄筋として挿入する工法である。

堰柱部のPHb工法に用いる補強材としてD16@300（SD345）を採用すると、1部材につき最低3本以上の補強鉄筋が配置されることから、せん断耐力は以下の通り増加する¹⁵⁾。

$$V_{awd} = \frac{Aw \cdot \sigma_{sy} \cdot d(\sin \theta + \cos \theta)}{1.15a \cdot 1.1}$$

$$= \frac{(198.6 \times 3) \times 345 \times 2450 \times (\sin 90^\circ + \cos 90^\circ)}{1.15 \times 300 \times 1.1}$$

$$= 1327.01(\text{kN})$$

$V_{phb} = \beta_{aw} \cdot V_{awd} = 0.85 \times 1327.01 = 1128.0(\text{kN})$
ここに、 V_{phb} ：PHbが負担するせん断耐力（N）

V_{awd} ：PHbを通常のせん断補強鋼材とみなした場合のせん断耐力（mm）

β_{aw} ：PHb工法によるせん断耐力向上の有効性を示す係数

計算結果より、 V_{phb} がP1堰柱基部で不足している耐力829.9kN及びP4堰柱基部で不足している耐力608.3kNを上回るため、補強材はD16@300（SD345）とした。

門柱部も同様に計算すると、 $V_{phb} = 291.6(\text{kN})$ となり、P3門柱基部で不足している耐力60.7kNを上回るため、補強材はD16@300（SD345）とした。

補強材をD16@300（SD345）としたときの挿入位置と既設の鉄筋の位置関係を図-4に示す。

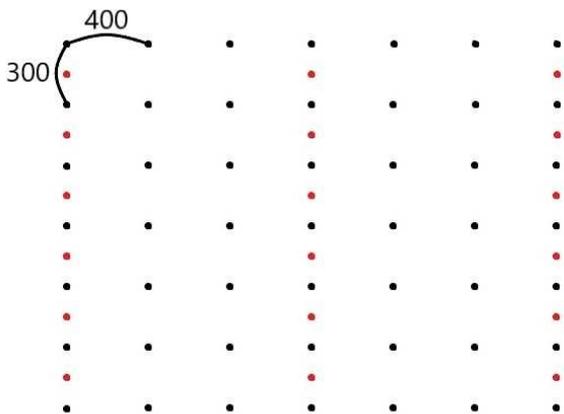


図4 既設配力筋(黒)とせん断補強筋(赤)の配置イメージ

(3) ゲートの工法の検討

ゲートについては、応力が不足しているサイドローラ及び戸当りローラレールを更新することとした。サイドローラは鋼材をステンレスに変更し、戸当りローラレールはH型鋼の厚さを既存のフランジ16mm・ウェブ9mmから、洪水吐ゲートはフランジ・ウェブとも28mm、土砂吐ゲートはフランジ・ウェブとも25mmとすることで、レベル2地震動に耐えられる降伏応力の確保を図った。

4. 施工計画の概要

大雪頭首工の改修工事のうち、耐震補強工事を含む土木構造物の工事は河川の流水がある中では施工ができないため、河川内に仮締切及び進入路を設置して工事を実施する。実際に河川内を仮締切した際の様子を図-5に示す。非出水期である10月から翌3月までの6か月間を単年度工期とし、施工量を踏まえて4か年の工期とした。第1期・第3期工事では右岸側を、第2期・第4期工事では左岸側をそれぞれ締め切り、施工する。なお、劣化が進んでいる護床工などを優先して実施することとしたため耐震補強工事は第3期・第4期で実施することとなり、それぞれの施工時期は表-5のようになった。



図-5 第4期工事の河川内仮締切の様子

表-5 各施工箇所施工時期

施工箇所	位置	施工時期
P1堰柱	左岸側	第4期
P3堰柱	右岸側	第3期
P4堰柱	右岸側	第3期
1号洪水吐ゲート	中央	第4期
2号洪水吐ゲート	右岸側	第3期
土砂吐ゲート	左岸側	第4期

5. 施工

(1) 鋼板巻立工法

鋼板巻立工法では、はじめにワイヤーブラシ等により下地処理を行い、クレーン等を用いて鋼板を取り付けた。鋼板の取り付けには皿ボルトを用いた。次に被覆アーク溶接により溶接を行い、最後にモルタルの漏れを防ぐために皿ボルト周辺及び鋼板下端部にシーラ剤を塗布した後、堰柱と鋼板の間に無収縮モルタルを注入し躯体と鋼板の一体化を図った。

(2) 鉄筋挿入工法

鉄筋挿入工法では、はじめに電磁波を用いた探査機で既設の鉄筋の位置を確認し、PHbの挿入位置を決定した。次にPHbドリルを用いて削孔し、孔内の清掃・湿潤噴霧の後、モルタルを充填し、PHbをモルタルと馴染ませながら挿入した。最後に、施工側のかぶりが計画値以上であることを確認し、モルタルで孔口仕上げを行った。

(3) ゲート

ゲートの耐震補強は、経年劣化した部材の更新工事と一体的に実施した。工場で部材を製作後、頭首工まで運搬し、溶接・据付を行った。施工後の出来形を図-6に示す。



図-6 ゲートの施工後写真

6. 施工による効果

せん断耐力が不足していた各部位の応答せん断力（地震時にかかるせん断力）と補強前後のせん断耐力を表-6に示す。全ての部位で補強後のせん断耐力が応答せん断力を上回り、レベル2地震動に耐えられるようになった。

表-6 各部位の応答せん断力と補強前後のせん断耐力

堰柱	扉体	部位	要素番号	応答せん断力 S (kN)	補強前のせん断耐力 Ps (kN)	補強後のせん断耐力 Ps' (kN)
P1	閉扉	堰柱	2	3,234.6	3,148.3	4,276.3
			3	4,353.8	3,914.8	5,042.8
	開扉	堰柱	2	3,974.7	3,914.8	5,042.8
			3	4,744.7	3,914.8	5,042.8
			4	4,327.0	3,914.8	5,042.8
			4	3,954.6	3,778.8	4,906.8
P3	閉扉	堰柱	4	3,437.3	3,318.1	6,322.0
			22	1,683.2	1,622.5	1,914.1
			40	1,659.8	1,622.5	1,914.1
			41	1,661.7	1,622.5	1,914.1
	開扉	門柱	42	1,625.9	1,622.5	1,914.1
			4	3,555.8	3,318.1	6,322.0
			22	1,633.4	1,622.5	1,914.1
			2	4,534.5	3,955.4	5,083.4
P4	閉扉	堰柱	3	4,217.3	3,955.4	5,083.4
			4	3,824.8	3,778.8	4,906.8
			2	4,563.7	3,955.4	5,083.4
	開扉	堰柱	3	4,139.2	3,955.4	5,083.4

7. おわりに

本稿では、頭首工の耐震補強工事の事例の一つとして、大雪頭首工の工法検討から施工までを報告した。頭首工の耐震設計の考え方は、それまでの想定を遙かに超える強さの地震であった兵庫県南部地震が平成7年に発生したのを境に大きく基準が改訂されたため、これ以前に完成した施設は耐震補強工事が必要な場合があると考えられる。頭首工の耐震補強工事を実施する際に本稿がその一助となれば幸いである。

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「頭首工」
- 2) 皆川 創、小野 隆司、佐竹 達也：大雪頭首工の補修・補強工法について — (既設頭首工の耐震補強工法検討の報告) —
- 3) 国土交通省水管理・国土保全局治水課：河川構造物の耐震性能照査指針・解説—IV. 水門・樋門及び堰編—
- 4) 東・中・西日本高速道路株式会社：「設計要領第二集 橋梁保全編」
- 5) PHb 工法研究会：せん断耐力の計算法
<http://phb-koho.jp/calculation/>