# 報文集

平成25年度



# 報文集 第25号 目 次

農業	用パイ	゚プラ〜	インにま	おける鉄	調系管	路の腐	食と要	因調	査の₹	事例·			• • • • • • •						1
							植	屋	段	祐	• 柿	下		大	• 『可	部	良	平	
北海	道大空口	町一級	可川網走	川黒瀬村	通門排才	<浄化試题	験施設は	こおけ	る20r	nお。			列水路 寛						11
ファ	イバー	-スコ-	ープによ	こるコン	<i>⁄</i> クリー	-卜内部	の調査												17
頭首	工の而	大震設語	十につい	ヽて								• • • • • •	• • • • • •	••••			······ 宏		25
別海	地域に	こおける	3貯留夕	ソンク基	<b>-</b> 礎の改	(善検討	~要	求性的	能に三	主眼	をおり	いた	没計例	$ij{\sim}\cdot$			健-		35
簡易	空撮シ	/ステ』	ムの有効	が利用に	こついて	······			•••••	••••	•••••	•••••		••••					45
貯水	池建設	と工事に	こともな	いう環境	保全指	青置の効	果検証												51

# 農業用パイプラインにおける鉄鋼系管路の腐食と要因調査の事例

# 植屋 賢祐・柿下 大・阿部 良平

# はじめに

パイプラインを構成する構造物の多くは土中に埋設 され、施設の状態を直接目視することが困難な場合 が多い。このことがパイプラインの機能診断を難し くしている最大の理由といえる。

パイプラインの機能低下の顕著な現象に漏水があるが、漏水に至らないまでも、放置しておくと漏水の発生につながるような劣化が、目に見えないところで進行していることがある。例えば、鉄鋼系管路の「腐食」である。

本報告は、これまで当社が経験したパイプラインの機能診断調査の中で、漏水が確認された鉄鋼系管路における自然腐食、とくに、コンクリート構造物との接続や地下水変動などの構造・環境条件を遠因とした「外面腐食」、加えて、塗装劣化に起因すると考えられた「内面腐食」について調査事例を報告する。

# 1. 鉄鋼系管路の腐食について

# 1-1 腐食の分類

土中に埋設された鉄鋼系管路の腐食は、土地改良 事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」(以下「設計基準」という。)によると、図ー 1(a)に示すとおり「自然腐食」と「電食」に大別 される。さらに、自然腐食は「ミクロセル腐食」と 「マクロセル腐食」に分類され、前者は2種類、後 者は3種類の腐食形態に分類される。また、社団法 人日本水道協会の水道施設設計指針によれば、ミクロセル腐食に"バクテリア腐食"の形態が加わる (図-1(b))。

本報告は、外面腐食についてコンクリート/土壌 マクロセル腐食(以下、「C/Sマクロセル腐食」と いう) および通気差マクロセル腐食が疑われた事例 を、また、内面腐食についてミクロセル腐食 (バクテリア腐食) が疑われた事例を紹介する。

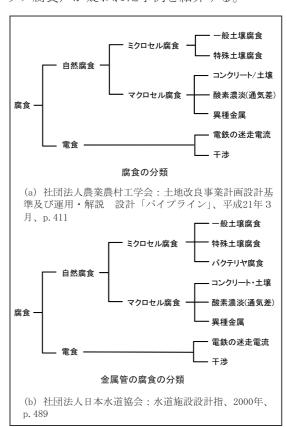


図-1 鉄鋼系管路の腐食の分類

# 1-2 腐食(防食)に関する設計基準の変遷

国営土地改良事業により造成される農業水利施設は、通常、設計基準に準拠して計画・設計が行われる。次頁の表-1 に、パイプラインの設計基準の変遷と、各々の"腐食(防食)"に関する記載の概要を示した。

パイプラインの設計基準が水路工から別れて単独で制定されたのは、昭和48年のことである。制定当初から管材の腐食(防食)に関する項目が設けられており、そこでは、酸性やアルカリ性などの特殊土

	20 1 00012	- ' '		00 - 7 - 0		1247 7 0 1	10-1741 г. н.	~~	
					腐	食			
				自然	腐食			雷	<b>A</b>
設計基準の	記載頁	3	ミクロセル腐食	ŧ	-	アクロセル腐食	電 食		
制定等年次		一般土壌腐食	特殊土壌 腐食	バクテリア	コンクリート /土壌 (C/S)	酸素濃淡 (通気差)	異種金属	電鉄の 迷走電流	干涉
昭和48年 3月	pp.115~116	=	•	=	=	=	=	•	=
昭和52年10月	pp.93~94	=	•	=	=	=	=	•	=
昭和63年 3月	pp.131~132	-	•	-	-	-	-	•	-
平成10年 3月	pp.336~346	•	•	-	•	•	•	•	•
平成21年 3月	pp.410~420	•	•	-	•	•	•	•	•

表-1 設計基準「パイプライン」における腐食(防食)に関する記載内容の変遷

壌および電食に関する記述があり、記載頁は2頁で あった。その後、昭和63年の改定まで同様の内容と 頁数となっている。

当初制定から25年を経た平成10年3月の改定により、前掲した埋設管における腐食の分類が示され、「自然腐食」「ミクロセル腐食」「マクロセル腐食」といった概念が加わり、腐食(防食)に関する項目は一気に10頁に増加している。現行の平成21年3月改定の設計基準も、ほぼこの内容が踏襲されている。

# 2. 外面腐食と調査事例

地中埋設される管水路の外面は、通常、土壌と接 している。土壌は、イオンを含む化学物質といえ、 電解質である。加えて、土壌は不均一系の代表格で あり、これに起因して土中の各所でマクロスケール やミクロスケールの環境差を生じる。これにより腐 食電池が形成され、その中に在る金属に対して腐食 環境になる。

# 2-1 マクロセル腐食が疑われた事例

# (1) 鋼製直管の腐食と漏水

写真-1は、外面腐食により漏水を生じた事例である。当該箇所は、造成から20年余りを経過した斜面部に敷設される鋼製直管( $\phi$ 250mm)である。

腐食は、法尻のスラストブロック(無筋)から下流約3mの鋼製管の範囲で発生しており、上流側のダクタイル鋳鉄管(DCIP)に腐食は見られなかった。

また、下流約20mに位置する法肩部のスラストブロック接続部付近に腐食は見られなかった(図-2)。

漏水箇所は、静水圧で0.7MPaの内水圧がかかる位置で、毎秒1リットル程の漏水があった。



写真-1 漏水を生じた貫通孔

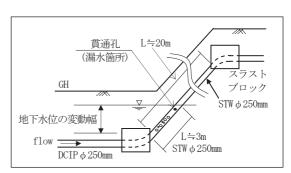


図-2 鋼製直管の腐食位置概念図

当該箇所は、外面の防食対策として施工当初にアスファルトビニロンクロスによる被覆が施されていた。写真-1は、スラストブロックから2.85m下流の斜面部に生じた貫通孔であり、これより法尻スラストブロック側では、外観上、被覆に損傷などが見られない部分を剥がしたところ、次頁の写真-2のような孔食が確認された。



写真-2 被覆下の腐食状況

# (2) ダクタイル鋳鉄管の腐食

写真-3は、貫通(漏水)には至らないものの、 鉄筋コンクリート製(RC)の弁室から1mほど下流 のダクタイル鋳鉄管(短管)に生じた孔食の事例で ある。腐食深さは5mmほどである(塗装含む)。



写真-3 ダクタイル鋳鉄管(短管)の孔食

写真-4は、これとは別の箇所でRC弁室に接続するダクタイル鋳鉄管のソケット継手に見られた孔食である。腐食の深さは5mmほどである。



写真-4 ソケット継手部の腐食

なお、上記の2箇所は、いずれも造成から25年を 経過していた。

# (3)空気弁工鋼管の腐食と漏水

写真-5~写真-7は、造成から20年余りを経過した空気弁工の腐食事例である。

本管からの立上げ部に用いられた鋼管 ( $\phi$ 80mm) に貫通孔を生じていた (写真-5)。立上げ鋼管は、全周に塗装の劣化が見られ、赤錆の付着も見られた (写真-6)。とくに、溶接部では、錆がこぶ状に生じていた (写真-7)。

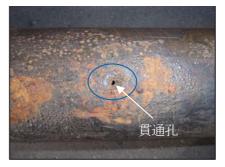


写真-5 立上げ鋼管の貫通孔



写真-6 塗装劣化と赤錆



写真-7 溶接部の腐食(こぶ状)

# (4)継手のボルト・ナットの腐食

次頁に示す写真-8は、前掲した写真-3に隣接する継輪とフランジの継手部のボルト・ナットに生じた腐食である。本施設は、造成から20~25年を経過していた。

ボルト・ナットの材質は、鋼製あるいはダクタイル鋳鉄製である。ボルト・ナットにこのような腐食

を生じる理由としては、加工による電位の低下、塗膜のムラ、施工時の塗装の傷みなどに起因したマクロセル腐食が言われる。1)

継手部のボルト・ナットに写真のような腐食が生じると、ボルトの締め付けに緩みを生じて漏水に至る可能性がある。







写真-8 継手部のボルト・ナットの減肉

# 2-2 外面腐食の要因調査

管水路の腐食要因調査について、現行の設計基準に表-2のとおり記載される。この中で、自然腐食に係る調査項目は、主として赤枠の①~⑤が該当し、前掲した外面腐食について、腐食要因特定のため、

当該調査を行った。

な評価となる。

①~⑤のうち、③、④は一つの調査項目にもとづき土壌の腐食性を評価する方法である。⑤も同様に、主としてC/Sマクロセル腐食の可能性を評価する。一方、①および②は、複数の調査項目から土壌腐食性やマクロセル腐食などの腐食形態を総合的に評価する方法である。評価方法は、DIN(ドイツ規格協会)およびANSI(アメリカ規格協会)の基準を適用する。この場合の具体的な調査項目は、表一3に

表-3 DINおよびANSIの調査項目

示す内容であり、③~⑤の調査項目を含めた総合的

調査項目	該当する	調査項目
	DIN	ANSI
粘土含有率(粒度)	0	
含水率	0	0
土壤pH	0	0
アルカリ度	0	
酸度	0	
硫化物	0	0
塩類	0	
硫酸塩	0	
土壌抵抗率	0	0
管対地電位	0	
酸化還元電位		0
地下水の有無	0	0

表-2 腐食要因の調査項目

	調査項目	新設管	既 設 管	評 価 方 法
_		初以下		
1	土質・地下水調査	特に腐食性が強い	と思われる場所で	DIN 50929 part3 及び
2	土壌採取・分析	行う	1	ANSI A21. 5 を参照
3	土壌抵抗率	200~500m ごと	200~500m ごと	   新版電食・土壌腐食ハンドブッ
				ク参照
4	土壌 pH	600~1,000m ごと	600∼1,000m ごと	金属防食技術便覧参照。酸性土
				壞:pH<4
6	管対地電位(P/S)	_	200~500m ごと	水道用鋼管腐食調査及び電気防
				食調査・設計マニュアル参照
<b>6</b>	地表面電位勾配(S/S)	電鉄から 1km 以内の数	_	新版電食・土壌腐食ハンドブッ
•	- C-><   L-   C-   C-   C-   C-   C-   C-   C-	箇所で行う		ク参照
7	レール対地電位(R/S)	電鉄横断平行部で行う	電鉄平行部で行う	新版電食防止対策の手びき参照
_				同 上
8	レール対管電位差(R/P)	_	電鉄横断部で行う	水道用鋼管腐食調査及び電気図
9	仮通電テスト	_	1~2 箇所	食調査・設計マニュアル参照
0	仮排流テスト	_	必要に応じ電鉄横断部	新版電気防食の手びき参照
			で行う	
(II)	他構造物の電位	   近接地点で行う	近接地点で行う	⑤、⑩参照
02	干涉調查	必要に応じて行う	必要に応じて行う	新版電食防止対策の手びき参照

社団法人農業農村工学会:土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」、平成21年3月、p. 417

# (1)土質調査

土壌の腐食性を評価するため、配管の腐食部と健全部に接する土壌を採取し、前頁表-3に示す調査項目の分析を行った。

写真-9は、土壌サンプリングの様子であり、配管と接している土壌を15cm $\times 15$ cm $\times 15$ cm角に切り取ってポリエチレン袋に入れて持ち帰り、室内試験に供した。 $^{2}$ 

土壌の腐食性評価の代表的な指標として、土壌pH値はが挙げられる。土壌pH値は、pH4程度以下の場合に腐食性が高く、これより酸性が強くなるにしたがって腐食は激しくなって

いく (表-4)。



写真-9 土壌サンプリング

表一4 土壌の腐食性と土壌 p Hの関係

pH 値		腐食の程度
4.5 以下	酸性	非常に腐食性
4.5 ~ 6.5	弱酸性	腐食性
6.5 ~ 8.5	中性または弱アルカリ性	非腐食性
8.5 以上	アルカリ性	不明

 不明とは、場合によって非腐食性のときと腐食性のときがあり、一概に 決められないことをいう。

日本ダクタイル鋳鉄管協会:埋設管路の腐食原因とその防食について (JDPA T 11)、平成22年3月、p.17

事例に示した腐食箇所の土壌pH値は、いずれもpH 5~7の範囲にあり、腐食性~非腐食性の範囲であった。

# (2)地下水調査

地下水は、土壌の腐食性(湿潤状態)、マクロセル腐食(通気差)に係る土中の酸素濃度差への影響、および水の腐食性の面から、その存在状態の把握が

重要である。

写真-10 (a) は、外観調査のための試掘に併せて地下水位観測孔を設置し、自記式水圧計(ロガー式)による長期観測を行った状況である。事例に示した腐食箇所は、いずれも地下水位の変動域にあった。

一方、水の腐食性評価の代表的な指標としてpH値 や溶存酸素量が挙げられる。写真-10 (b) は、地 下水の腐食性評価に用いるためのサンプリングの状 況である。溶存酸素の測定にあたり、運搬中の濃度 変化を防止するため、薬液による固定を行っている。

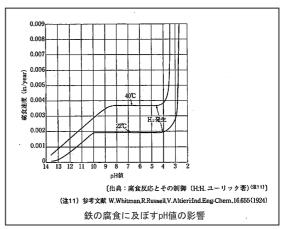




(b) 地下水の採水 (a) 地下水位観測 (溶存酸素測定用)

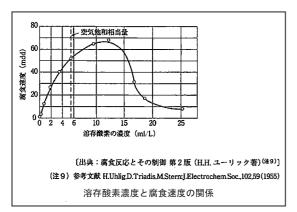
写真-10 地下水調査の様子

pH値と溶存酸素量については、鉄の腐食との関係が示される。pH値は、水温により区分されるが、いずれもpH4より酸性が強くなるにしたがって腐食は激しくなっていく(図-3)。一方、溶存酸素量は、 $10\sim15$ ml/Lの間で最大の腐食速度を示す(図-4)。



日本ダクタイル鋳鉄管協会:埋設管路の腐食原因とその防食について(JDPA T 11)、平成22年3月、p. 17

図-3 水のpH値と腐食速度の関係



日本ダクタイル鋳鉄協会:埋設管路の腐食原因とその防食について (JDPA T 11)、平成22年3月、p.16

図-4 水の溶存酸素量と腐食速度の関係

事例に示した腐食箇所の地下水は、いずれも溶存酸素量が $6\sim7\,\text{ml/L}$ で腐食速度はやや高めであるものの、 $pH値はpH6\sim7$ の中性を示し腐食性は強くない範囲にあった。

# (3)土壌抵抗率調査

土壌中の鉄鋼系管路の腐食は、電気化学反応によって進行する。その大きさは、管材に生じる電位差と、電気回路の一部を形成する土壌の抵抗率に影響される。すなわち、管材に電位差を生じても、土壌抵抗率が大きい場合は腐食電流が小さくなり、腐食が生じにくくなる。このように、土壌抵抗率は埋設管の腐食に係る重要な指標である。

土壌抵抗率の測定方法には、現地計測の「4極法」、「土壌杖法」およびサンプリング試料を用いる「土壌箱法」がある。写真-11は、地上部からの4極法および試掘時の土壌杖法の状況である。



4 極法



土壌杖法

写真-11 土壌抵抗率調査の様子

土壌抵抗率は、表-5に示すように腐食性との関係が示される。腐食性の程度の境界値は研究者によってやや異なるものの、概 $a1,000\Omega$ ・cmより低い場合に腐食性が激しいと分類される。

事例に示した腐食箇所の土壌抵抗率は、いずれも  $3,000\sim5,000\Omega$ ・cmを示し、腐食性は「中」程度であった。

表-5 土壌の腐食性と土壌抵抗率との関係

腐食性の程度									
<b>映良性の住皮</b>	F.O.Waters1)	L.M.Applegate <sup>2)</sup>	V.A.Pritula3)	E.R.Shepard <sup>4)</sup>	Romanoff <sup>5)</sup>				
激しい	0~ 900	0~ 1,000	0 ~ 500	0 ~ 500	< 700				
やや激しい	. 900 ~ 2,300	1,000 ~ 5,000	500 ~ 1,000	500 ~ 1,000	700 ~ 2,000				
中	2,300 ~ 5,000	5,000 ~ 10,000	1,000 ~ 2,000	h	2,000 ~ 5,000				
小	5,000 ~ 10,000	10,000 ~ 100,000	2,000 ~ 10,000	定め難い	> 5,000				
きわめて小	> 10,000	> 100,000	> 10,000	J					
			[出典: 領	『食・土壌腐食ハン	ドブック (1977)				
17	引用文献 F.O.W	aters : Corrosion, 8	, No.407 (1952)						
2)	> L.M.A₁	oplegate : Cathodic	Protection (1960)						
3		itula : Cathodic Pro	otection of Pipeline	e and Storage Tan	ks (1953)				
4)	/ E.R.Sh	epard : Journal of I	Res. of NBS, 6, 683	(1931)					
5	M.Romanoff: NBS Circular 450 and 579								

日本ダクタイル鋳鉄管協会:埋設管路の腐食原因とその防食について (JDPA T 11)、平成22年3月、p.17

# (4)管体地電位調査

管対地電位調査の目的は、土壌の腐食性の判定、 C/Sマクロセル腐食の可能性の判定、迷走電流の 流入出の判別および電気防食効果の確認である。

写真-12は、管路の腐食状況確認のための試掘 (外観調査)に併せて、主として土壌の腐食性とC/S マクロセル腐食の可能性の判定を目的に、管対地電 位調査を行った状況である。



写真-12 管対地電位調査の様子

管対地電位の計測にもとづく土壌の腐食性の評価 の指標として、次頁の表-6がある。

表-6 土壌の腐食性と管対地電位との関係

土壌の腐食物	生と鋼材	の対地電位(Applegate)
腐食性程	の 度	鋼の対地電位(-V 飽和硫酸銅)最小値
激し	い	>0.55
やや激し	い	0.45~0.55
中		0.30~0.45
小		0.15~0.30
きわめて	小	<0.15

電気学会:新版 電食・土壌腐食ハンドブック昭和61年10月15日、p. 33

また、C/Sマクロセル腐食の可能性の評価の指標として、「農林水産省関東農政局:農業水利施設ストックマネジメントマニュアル,参考資料編、平成19年3月」に、管対地電位が-0.4Vより貴(高い)のとき、C/Sマクロセル腐食が形成されていると判断するとされる。

事例に示した腐食箇所の管対地電位は、いずれも $-0.4\sim-0.5$ Vであり、土壌の腐食性はやや激しい $\sim$ 中の範囲で、C/Sマクロセル腐食は形成されていないと判定できる範囲であった。

#### (5)酸化還元(Redox)電位調査

酸化還元電位は、ある物質が酸化あるいは還元しやすい状態にあるのかを表す指標である。土壌中の鉄鋼系管路における腐食との関係では、嫌気性腐食および前出の表-2①の評価方法に示される"ANSI A21.5"において、土壌pHや硫化物と併せて硫酸塩還元バクテリア等による腐食性評価の指標となる。

写真-13は、管水路の腐食状況を目視調査するための試掘に併せて行った酸化還元電位調査の状況である。



写真-13 酸化還元 (Redox) 電位調査の様子

酸化還元電位は、嫌気性腐食との関係が表-7のとおり示されている。

表-7 酸化還元電位(E<sub>h</sub>)と嫌気性腐食との関係

E,と嫌気f	生腐食の私	呈度	
E <sub>h</sub> 範囲[mV]	嫌気性	生腐食(	の程度
<100	激		烈
100~200	中	程	度
200~400	軽		微
>400	無	腐	食

電気学会:新版 電食・土壌腐食ハンドブック昭 和61年10月15日、p. 197

先の事例に示した腐食箇所の酸化還元電位は、いずれも200~400mVであり、嫌気性腐食の程度は中~軽微の範囲であった。

# 2-3 外面腐食の評価

前項に記した各々の計測にもとづく評価は、いずれの事例も土壌および地下水の腐食性は高くない結果となった。土壌抵抗率、管対地電位および酸化還元電位による評価でも腐食性は中~低となり、腐食要因の特定には至らなかった。

本事例では、前項の各種調査を併せて、総合的に腐食形態の評価を行うDIN(ドイツ規格協会)およびANSI(アメリカ規格協会)の基準による評価を行った。これらの基準は、各種調査から得られた値に評点を与え、その評点を腐食形態による特徴を踏まえて累計し、土壌の腐食性やマクロセル腐食等の腐食形態を判定するものである。DINは、土壌の腐食性およびマクロセル腐食(通気差マクロセル腐食、C/Sマクロセル腐食、異種金属接触腐食)の可能性について評価し、ANSIは、土壌の腐食性として、微生物(硫酸塩還元バクテリア)の影響などを考慮したミクロセル腐食の可能性を評価する。

腐食事例の各箇所について、DINによる評価を次 頁の図-5に示す。なお、関係する調査項目につい ては、前掲の表-3を参照されたい。

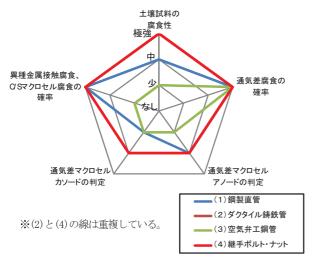


図-5 DINによる評価事例

事例の「(1)鋼製直管」における腐食要因は、 C/Sマクロセル腐食および通気差マクロセル腐食 の可能性が「極強」と判定された。これは、コンク リート(スラストブロック)との接続や腐食箇所付 近の地下水位変動の状況など、主として構造・環境 条件が影響した結果と推察される。

事例の(2) ダクタイル鋳鉄管と(4) 継手ボルト・ナットは隣接する箇所であり、腐食要因は土壌の腐食性、C/Sマクロセル腐食および通気差マクロセル腐食の可能性が「極強」と判定された。これは、コンクリート(RC弁室)との接続や腐食箇所付近の地下水位変動の状況など、主として構造・環境条件が影響した結果と推察される。

事例の「(3) 空気弁工鋼管」における腐食要因は、通気差マクロセル腐食の可能性が「極強」と判定された。これは、コンクリート接続はなく、鉛直方向に配管される構造条件が影響した結果と推察される。

一方、ANSIによる評価は、評点が10点を超える場合に腐食性と評価されるが、いずれの事例も評点は2~4点となり、土壌の腐食性は弱く、ミクロセル腐食の可能性は低いと判断した。

なお、各基準における調査項目別の評点方法や腐食形態別の評点の累計方法等の詳細については、「日本水道鋼管協会:マクロセル腐食防食指針WSP045-2008」などを参照されたい。

# 3. 内面腐食と調査事例

# 3-1 ミクロセル腐食が疑われた事例

写真-14は、管水路途中の調圧スタンドに接続する水輸送用塗覆装鋼管(φ1500mm。以下「塗覆装鋼管」という。)の内面に生じた腐食であり、造成から25年余りを経過した時点の現地調査で確認した。

当該施設は、水田かんがい用であり、かんがい期は河川より取水して通水される。非かんがい期は通水停止により落水されるが、この際、当該パイプラインの上流に接続する函渠からドレーン排水が流入するため非満流の流水を生じていた。

腐食は、底部から側部に集中し、上部にはほとん ど見られず、こぶ状に隆起していた。



写真-14 鋼製管の側面の腐食

#### 3-2 内面腐食の要因調査

管内面の腐食要因として、第1に通水する水の腐食性を考え、前述した「溶存酸素濃度」および「pH値」等の影響を調査したところ、河川水および非かんがい期の管内流水(函渠のドレーン排水)のいずれについても腐食性は少ない評価となった。

本事例では、非かんがい期に好気性となる管内面の環境条件や、こぶ状に盛上った腐食の形状などに着目し、腐食要因として「微生物」の影響を考え、腐食生成物の成分分析および微生物判定の簡易調査を加えた。

# (1) 腐食生成物の成分分析

腐食生成物は、発生要因によってその成分に特徴が見られる。さびの成分分析の方法の一つに「蛍光 X線分析」がある。この方法は、さびに含まれる元素の同定とその定量が可能である。

図-6は、現地より採取した腐食生成物と、元の 塗覆装鋼管 (JIS G 3443 規格) との化学成分の 比較である。

JIS規格によれば、塗覆装鋼管の化学成分は、鉄 (Fe) のほか、リン (P)、硫黄 (S) および炭素 (C) である。圧力配管用炭素鋼鋼管とは異なり、ケイ素 (Si) とマンガン (Mn) を含まない。

一般に、さびの成分は水和酸化物が主体であり、これには大気由来の二酸化炭素や二酸化硫黄なども含まれるため、さびの進行によってFeの減少とO、C、Sの増加が予想され、同図にもその傾向が現れている。一方、塗覆装鋼管の成分に元々含まれていないMnやSiも同定された。

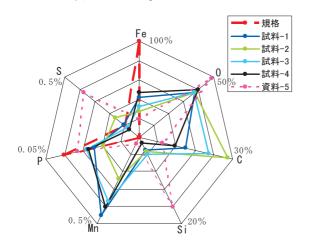


図-6 塗覆装鋼管の規格値とさびの成分比較

# (2) 微生物調査

金属の腐食に係る代表的なバクテリアとして、好 気性の鉄バクテリアと嫌気性の硫酸塩還元バクテリ アが挙げられる。

写真-15は、現地より採取した試料による微生物 培養試験の状況である。本管水路は、好気性の環境 にあること、および上流に接続する函渠区間からド レーン排水(地下水)の流入があることから、錆の 成長に関与する好気性細菌として、鉄バクテリアの 関与が考えられた。

調査方法は、微生物腐食の実験・解析法の簡便法とされる「寒天培地平板法」<sup>3)</sup>である。市販の寒天培地(ペたんチェック:栄研器材社)を用いて、現地でさび部(被検体)に寒天培地を付着(写真-15(a))させた後、36℃で48時間の恒温培養を行い、コロニーの発生状況を確認した。この際、比較のため、健全部を被検体(塗装下の金属面)とした試験を併せて行った(写真-15(b))。

さび部では明らかなコロニー形成が確認できた (写真-15 (c))。一方、健全部はコロニーの形成 はほとんど確認できなかった (写真-19 (d))。

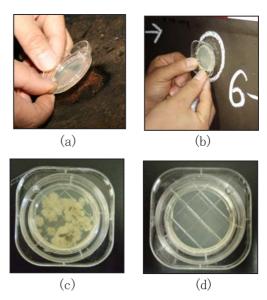


写真-15 管内撮影状況(鋼管)

# 3-3 内面腐食の評価

微生物の培養試験から、管内面の腐食部における 微生物の存在、および健全部との相違が確認された。 これは、腐食生成物の成分分析によるMnの同定を併せると、鉄バクテリアによる水中のマンガンイオン の酸化・集積の働き<sup>3)</sup>の可能性を示唆する。ただし、 今回行った培養試験は、微生物の存在の有無を確認 するための簡便手法であり、当該試験のみから細菌 の種類を特定できるものではない。

内面腐食の要因は、上記の結果に、水の腐食性が 低いことや、こぶ状の隆起が未だ小さい箇所で塗膜 に傷痕のようなものが見られることなどを勘案して、 塗装の損傷に起因し、腐食の進行に微生物が関与す るミクロセル腐食 (バクテリア腐食) の可能性が高 いと判定した。

# 4. まとめ

鉄鋼系管路の内外面は、水および土壌の物理・化 学性や電気的特性などを調べると、多様な腐食環境 に晒されていることが理解される。腐食は、これら の条件が単独ではなく、影響の強弱はあるものの、 複合して発生している場合が多いと考えられる。

管路における腐食は、進行により漏水に至るケースもあり、施設の重要度などを勘案のうえ適切な対策を必要とする。この際、対策の有効性を確実とするには、腐食要因の把握が重要となる。

本報に載せた調査事例等を踏まえ、鉄鋼系管路の 腐食要因の特定にあたっての留意事項として、下記 を挙げる。

- 鉄鋼系管路の腐食は、土壌・水の条件および構造・材質条件などが複合して発生しており、その要因特定には、各条件にもとづく総合的な評価(DIN、ANSI等)が有効である。
- 腐食の遠因として、設計・施工年代や塗覆装の 損傷に係る施工条件、さらに、通水の状況など施 設の使用される条件の把握が重要となる。
- 腐食生成物が採取可能な場合は、その成分を調べることにより腐食要因の推定に有効となる。

#### おわりに

現在、パイプラインのコンクリート構造物周りに おけるC/Sマクロセル腐食など、点構造物の腐食 評価については、多くの調査・研究の成果により体 系的な技術が確立されつつある。一方、パイプライ ンは線構造物であり、その全体の腐食状況を知る術 は、現在未確立といえる。

線構造物である管路の全線を開削して直接確認することは、立地環境や経済的な側面から現実的では

なく、今後、非開削で地上部などから行う電気的調査等の間接的な調査により、埋設管路の損傷や腐食の状態を精度良く評価可能とする技術の確立が求められる。それには、多くの調査・研究の成果を蓄積・集積し、その結果を体系的に整理・分析していくことが重要と考える。本報告が、このような試みの一助となれば幸いに思います。

今回は、図らずも、本報文集において弊社の調査 実績について発表の機会を頂いたことに、感謝申し 上げます。また、末筆ながら、今回の発表に係る調 査の機会を与えていただきました関係機関および関 係各位に対し厚く御礼申し上げます。

(㈱アルファ技研)

#### 参考文献

- 1) 日本ダクタイル鋳鉄管協会:埋設管路の腐食原 因とその防食について(JDPA T 11)、平成22年 3月、pp. 33~34
- 2)日本水道鋼管協会:マクロセル腐食防食指針 (WSP 045-2008)、平成20年3月14日改正
- 3) 防食腐食協会:エンジニアのための微生物腐食 入門、平成16年2月25日

# 北海道大空町一級河川網走川黒瀬樋門排水浄化試験 施設における20mおよび40m直列水路試験の比較

前田 寛之・常松 哲

# 1. はじめに

北海道オホーツク地方の網走湖では、青潮やアオコの影響はワカサギ、シラウオなどの斃死による水産資源の減少、プランクトンの死骸や硫化水素の悪臭による観光イメージダウン、水産資源に対する風評被害を与え、社会問題となっている。特に、アオコの増殖にはリンや窒素が不可欠であるが、網走湖ではアオコ発生時にリン濃度が低下してリンが枯渇する状況が確認されている<sup>11</sup>。網走湖の湖水はN/P比≒17であり、通常、窒素過剰になっているので、アオコの発生においてはリン濃度が最も影響を与えていると考えられている<sup>11</sup>。そこで、本研究では、網走湖流入河川中のリンを削減することを目標として、好気的微生物による酸化などを利用した生物的浄化法である礫間接触酸化法に取り組んだ。

閉鎖性水域の富栄養化防止対策、特に流入河川対 策としての可能性を探るため、2002年(平成14年) 11月14日~12月5日に、北海道北見市一級河川常呂 川水系二級河川小石川流域の河川用地において、好 気性雰囲気における並列水路試験(以下、「2002年 試験」と記す。)が12回おこなわれた20。各水路は 共に長さ9,000mm、幅900mm、高さ300mmで、水質浄 化材を厚さ200mmに敷き詰めた。水質浄化材は、河 川の直接浄化として代表的な礫間接触酸化法で一般 に使われる砕石よりも前田・佐々木3)およびMaeda et al. 4) によって明らかにNH<sub>4</sub>-N (アンモニア態室 素)、T-N(全窒素) およびT-Fe(全鉄)の水質浄化 機能が高いことが知られているゼオライト岩(以下、 「"ゼオライト"」と記す。) およびクリノタイロ ライト(斜プチロル沸石)やスメクタイトを伴う貝 化石を含む砕屑岩(以下、「"貝化石"」と記す。) と、流木、建築廃材や建設発生材の木質バイオマス

チップ(以下、「"バイオマス"」と記す。)を選 び、いずれも地元産鉱物資源や木質バイオマスの有 効利用と水質浄化の一石二鳥をねらった。なお、 Maeda et al. 4) では、1994年(平成6年) 1月20日 に、冬季における1回の小規模な屋外水路(長さ 16,000mm、幅200mm、高さ200mm) 試験によってクリ ノタイロライトを主成分とする北海道遠軽町生田原 産ゼオライト岩 (陽イオン交換容量:172meq/100g、 真比重:2.358、ショアー硬度:31.3 (25.0~36.0)) と北海道北見地方の基盤岩である仁頃層群緑色岩と の水質浄化能が比較され、小石川の河川水(原水) に4.3mg/L含まれるNH<sub>4</sub>-Nがゼオライト岩処理水で は1.1mg/L、緑色岩処理水では3.3mg/Lと削減され たが、2002年試験でのゼオライト岩の再検討の理由 は、より規模の大きな試験施設での比較的長期間に おける水質浄化能の持続性を知るためである。これ らの水質浄化材は河川の窒素やリンなどを削減する とともに、一般に水質汚濁物質濃度が低い方が浄化 率が高くなることが明らかにされた20。

2003年(平成15年)8月26日~11月19日に,2002年試験と同じ場所および雰囲気においてより大きな四つの水槽(長さ4,600mm、幅1,500mm、高さ1,500mm)が連結した直列水路試験(以下、「2003年試験」と記す。)が14回おこなわれた<sup>5)</sup>。2002年試験の結果を踏まえ、この直列水路試験における第1槽は人工湿地での植生利用浄化を想定して水草とし、第2槽以降の各水質浄化材が高い浄化率を発揮できる順序とされた<sup>5)</sup>。第2槽以降の水質浄化材の順序は、第2槽が有機物の"バイオマス"、第3槽および第4槽がそれぞれ無機物の"貝化石"および"ゼオライト"とされた。すなわち、小石川よりポンプで取水した原水を第1槽(水生植物)、第2槽("バイ

オマス")(2003年11月3日から曝気あり"貝化石"に変更)、第3槽("貝化石")、第4槽("ゼオライト")の順に流下させ、水路試験がおこなわれた。この2003年試験によって、この河川水質浄化システムは、 $PO_4-P$ (オルトリン酸態リン)、 $NH_4-N$ 、 $NO_2-N$ (亜硝酸態窒素)、 $NO_3-N$ (硝酸態窒素)、T-N、BOD(生物化学的酸素要求量)、COD(化学的酸素要求量)および大腸菌群数の削減において効果が大いに期待できることが明らかにされた $^{50}$ 。

これらの結果を踏まえ、2004年(平成16年)9月10日~11月26日に、2003年試験と同じ場所、水槽および雰囲気において、水草を除き、水質浄化材の順を2003年試験の逆にした三つの水槽が"ゼオライト"ー"貝化石"ー"バイオマス"の順の曝気あり系統および曝気なし系統直列水路試験の比較が12回おこなわれ、親水河川環境を目指すとともに、省エネルギーを重視すると、曝気ありより曝気なしとするのがよいとされた<sup>6)</sup>。

一方、2004年(平成16年)6月に、網走湖環境保 全対策推進協議会は網走川水系網走川水環境改善緊 急行動計画(清流ルネッサンスⅡ)を発表した<sup>7)</sup>。 この計画は、本来の水環境が損なわれている網走川 水系の網走湖を対象に、湖域を利用する地域経済の 発展、多様な生態系の保全および積極的な親水利用 を目標として、水質の改善を図るために策定された。 また、この計画は、2014年(平成26年)度までに、 塩淡境界層水深や全リン濃度を制御し、現在、2~ 3年に1度の割合で発生している青潮を7年に1回 程度まで抑制すること、また、ほぼ毎年発生してい るアオコを5年に1回まで低減することをめざして いる。さらに、湖水が滞留し、より水質が悪化して いる呼人浦や女満別湾の水質改善にも取り組まれる。 具体的な施策は、これまでもおこなってきた湖内の 水草刈り取り、底質の浚渫などの強化に加え、網走 川や網走湖に流れ込む工場排水の監視強化、 NO<sub>3</sub>-N汚染防止にむけた畑地の施肥管理指導などで ある。閉鎖性水域での水質保全のためには、汚濁物 質をその発生源で削減することが最良であるが、流

入河川から汚濁物質を削減することも必要である<sup>5)</sup>。 そこで、小規模直列水路試験の成果<sup>6)</sup>を踏まえ、 "ゼオライト"ー"貝化石"ー"バイオマス"の順 の長さ20m水路および40m水路における実施設に近 い大型試験施設での好気性雰囲気における直列水路 試験をおこなった。

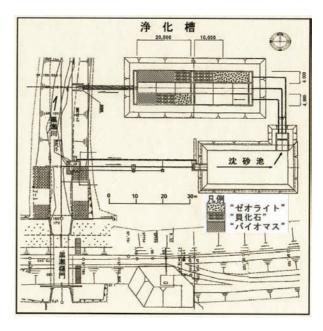
本研究の目的は、網走川清流ルネッサンスIIにおける流域対策の一環として、"ゼオライト"、"貝化石"および"バイオマス"を用いた河川水質浄化システム構築上、特に水質浄化施設の規模選定上の基礎データを得ることである。

# 2. 試験方法

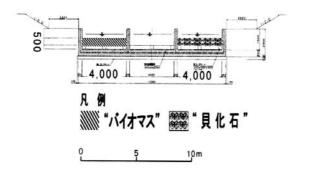
#### 2. 1. 水路試験

水質調査は、網走川中流域で本川に合流する黒瀬川の黒瀬樋門個所に建設された排水浄化試験施設<sup>8)</sup>において、2006年(平成18年)12月15日および12月18日の2回おこなった。

排水浄化試験施設は、長さ40,000mm、幅4,000mm、 高さ1,500mmの3水路のうち、2水路を使用した (第1図)。水質浄化材は水路の底から300mm上に約 500mmの厚さに網袋に入れて設置した(第2図)。水 路試験は、黒瀬川からポンプで取水した原水を、沈 砂池を経由して、20m直列水路試験では、40m水路



第1図 黒瀬樋門排水浄化試験施設の平面図8)



第2図 黒瀬樋門排水浄化試験施設の浄化槽断面図8)

後半の20mを使い、第1槽"ゼオライト"約6.6m、第2槽"貝化石"約6.6mおよび第3槽"バイオマス"約6.6mの順に流下させ、3種類の水質浄化材を用いた直列水路とした(第1図および第3図)。40m直列水路試験はこの20m直列水路試験を倍の規模にしたものである(第1図)。

原水と、20m直列水路流出口および40m直列水路 流出口との3箇所において、水試料のサンプリング と、堀場製作所製マルチ水質モニタリングシステム U-21XDによる水温、pH、導電率、濁度、DO(溶存酸 素量)および塩分濃度を測定した。塩分濃度は導電 率からの換算値である。また、原水は、前述のよう に、黒瀬川からポンプで取水するため、流量はポン プの能力によって決まる。なお、流量は、流出口に おいて簡易的に試験水がバケツに15L溜まる時間を ストップウオッチで3回測定し、平均値を求めた。

水質分析は、CODがJIS KO102 17、BODがJIS KO102 21および32.3、PO<sub>4</sub>-PがJIS KO102 46.1.1、NH<sub>4</sub>-NがJIS K 0102 42.2、NO<sub>2</sub>-NがJIS K 0102 43.1.2、NO<sub>3</sub>-NがJIS K 0102 43.2、大腸菌群数が昭和46年環境庁告示第59号別表2最確数による定量法にしたがって環境コンサルタント株式会社によっておこなわれた。なお、水試料は、濾過せず、採水当日中に分析された。したがって、CODやBODはSS(浮遊懸濁物質量)を含む。分析結果は濃度(mg/L)で表した。各水質浄化材の浄化効果は、それぞれの浄化材通過前後の分析値の差から、浄化率(除去率)%=(1ー浄化材通過後の濃度/浄化材通過前の濃度)×100として表した。



第3図 黒瀬樋門排水浄化試験施設の空中写真

# 2. 2. 水質浄化材

# 2. 2. 1. "ゼオライト"

"ゼオライト"とは、前述のように、ゼオライト 岩のことである。ゼオライト岩とは、陽イオン交換 容量が80meq/100g 以上のゼオライトを多く含む堆 積岩やその熱水変質岩のことである<sup>2)、9)</sup>。使用し た"ゼオライト"は北海道北見市端野町豊美産の "ゼオライトロック" (商品名) である。このゼオ ライト鉱床は新第三系上部中新統登以加層10 中の軽 石凝灰岩や凝灰岩である。これらの岩類はヒューラ ンダイト(輝沸石)-クリノタイロライト(斜プチ ロル沸石)系鉱物を主とし、少量の石英、斜長石、 オパールCTなどを伴う。特に、多量のヒューラン ダイトークリノタイロライト系鉱物のみからなる (他の鉱物が粉末X線回折試験の検出限界未満であ る。) 軽石凝灰岩の陽イオン交換容量は170~176meg/ 100g、間隙率は36.61~39.31%(平均38.01%)、 かさ密度は1.280~1.307g/cm³ (平均1.295g/cm³) である。

第1表 原水 (流入水) の水質測定および水質分析結果

試 験 回 数 :月日	水温℃	pН	導電率 mS/cm	DO mg/L	COD mg/L	BOD mg/L	PO <sub>4</sub> -P mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L	NO2-N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L	T-N mg/L	大腸菌群数 MPN/mL
1 : Dec. 15	4.5	6.67	0.287	14.2	7.1	2.7	0.048	0.08	< 0.05	2.2	2.6	3,500
2 : Dec. 18	4.0	6.68	0.300	14.0	5.8	1.8	0.052	0.09	< 0.05	2.2	2.6	4,900

第2表 20m直列水路処理水の水質測定および水質分析結果

試験回数:月日	水 温 ℃	pН	導電率 mS/cm	DO mg/L	COD mg/L	BOD mg/L	PO <sub>4</sub> -P mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L	NO <sub>2</sub> -N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L	T-N mg/L	大腸菌群数 MPN/mL
1 : Dec. 15	1.9	6.60	0.287	11.4	7.7	1.9	0.030	0.16	< 0.05	1.5	2.0	790
2 : Dec. 18	2.4	6.78	0.300	13.0	6.0	1.7	0.052	0.12	< 0.05	2.0	2.3	2,300

第3表 40m直列水路処理水の水質測定および水質分析結果

試験回数:月日	水温℃	pН	導電率 mS/cm	DO mg/L	COD mg/L	BOD mg/L	PO <sub>4</sub> -P mg/L	NH <sub>4</sub> -N mg/L	NO2-N mg/L	NO <sub>3</sub> -N mg/L	T-N mg/L	大腸菌群数 MPN/mL
1 : Dec. 15	1.1	6.50	0.287	9.3	7.9	1.6	0.020	0.18	< 0.05	1.3	2.0	1,300
2 : Dec. 18	1.4	6.57	0.300	11.9	6.0	1.8	0.046	0.14	< 0.05	1.9	2.3	2,300

第4表 20mおよび40m直列水路試験における主な水質分析項目の平均浄化率 (%)

分析項目	COD	BOD	PO <sub>4</sub> -P	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N	T-N	大腸菌群数
20 m 水路	-6.0	17.6	18.8	-66.7	20.5	17.3	65.3
40 m 水路	-7.4	20.4	34.9	-90.3	27.3	17.3	58.0

# 2. 2. 2. "貝化石"

"貝化石"とは、北海道シェル鉱山(北海道シェル工業株式会社)阿寒鉱業所産の貝化石を含む砕屑岩のことである「」。この鉱山は北海道釧路市阿寒町徹別に位置し、新第三系鮮新統阿寒層群古潭累層オクヨクンナイ砂礫岩層「2)砕屑岩を稼行対象としている「」。"貝化石"は、海生貝類、特にFortipectentakahashii(YOKOYAMA)などの二枚貝類や巻貝類などを含む凝灰質礫岩などからなる軟岩であり、多量のカルサイト(方解石)と少量のスメクタイト、クリノタイロライト、石英、斜長石などからなる石灰質資材で、陽イオン交換容量は39meq/100gである「」。

# 2. 2. 3. "バイオマス"

"バイオマス"とは、前述のように、木質バイオマスチップのことである。これは流木、建築廃材や建設発生材から東興産業株式会社製ビーストリサイクラー(木質系破砕機)3680型で作った<sup>2)</sup>。

# 3. 結果および考察

2006年(平成18年)12月15日および12月18日の原 水と20 mおよび40 m直列水路処理水の水質測定およ び水質分析結果を第1表~第3表、また、主な水質 分析項目の平均浄化率を第4表に示す。水質分析項 目ごとに原水に対する各処理水の濃度の低減値や増 加値が両日で異なっているが、この差異はフィール ドにおける水路試験の持つ揺らぎであると考えられ る。

流量は両日ともに0.02m³/sである。

水温は、冬季の12月中旬における2回の各調査日において、原水より各処理水の方が数度低く、各処理水では1.1~2.4 $^{\circ}$ と非常に低温である(第1表~第3表)。

原水のpHは、6.67および6.68とほぼ同じであり (第1表)、弱酸性を示すとともに、環境基準 (6.5 ~8.5)を満足している。20mおよび40m水路処理 水についてもpHの環境基準を満足している(第2表 および第3表)。

導電率は、原水および各処理水ともに、同日では 同じである(第1表~第3表)。

原水のDOは、14.0および14.2mg/Lであり (第1表)、また、各処理水も9.3~13.0mg/Lの範囲にあり (第2表および第3表)、環境基準 (5 mg/L以上)を満足している。

原水のCODは、5.8および7.1mg/L(平均6.45mg/L)であり(第1表)、平均値で環境基準(2mg/L下)を約3.2倍超過している。流出口におけるCODは、平均浄化率が20m水路で-6.0%、40m水路で-7.4%であり(第4表)、両直列水路システムによって低減されなかった。前田ほか²)によれば、北海道北見市常呂川水系小石川流域の河川用地において、平成14年11月14日~12月5日の間に小規模並列水路試験を12回実施した結果、CODは"ゼオライト"では5回、"貝化石"では7回、"バイオマス"では3回しか浄化されず、しかもわずかしか削減されなかったので、今回の結果は、規模を大きくして直列にしても、CODの削減が期待できないことを確認できた。

原水のBODは、1.8および2.7mg/L (平均2.25mg/L)であり (第1表)、平均値で環境基準 (1 mg/L以下)を2.25倍超過している。流出口におけるBODの平均浄化率は、20m水路で17.6%、40m水路で20.4%であり (第4表)、後者が前者の約1.2倍であった。

原水の $P0_4$ -Pは、0.048および0.052mg/L (平均0.050mg/L) であり (第1表)、平均値で環境基準 (0.02mg/L以下)を2.5倍超過している。流出口における $P0_4$ -Pの平均浄化率は、20m水路で18.8%、40m水路で34.9%と (第4表)、後者が前者の約1.9倍で、浄化施設の規模による有意な差が見られ、浄化施設の大きさを決めるうえでも、また、網走湖におけるアオコ対策のうえでも有益なデータが得られた。

原水のNH<sub>4</sub>-Nは、0.08および0.09mg/L(平均0.085 mg/L)であり(第1表)、平均値で環境基準(0.05 mg/L以下)を1.7倍超過している。流出口におけるNH<sub>4</sub>-Nは、平均浄化率が20m水路で-66.7%、40m水路で-90.3%であり(第4表)、両直列水路システムによって低減されなかった。前田ほか<sup>2)</sup>によれば、北海道北見市常呂川水系小石川流域の河川用地において、平成14年11月14日~12月5日の間に小規模並列水路試験を12回実施した結果、NH<sub>4</sub>-Nは"ゼオライト"では10回、"貝化石"でも10回、"バイ

オマス"では8回浄化されたものの、今回の結果は、 規模を大きくして直列にしても、NH<sub>4</sub>-Nが削減でき ないこともあることを確認できた。

原水および各処理水のNO<sub>2</sub>-Nは、0.05mg/L以下であり(第1表~第3表)、環境基準(0.05mg/L以下)を満足している。

原水の $NO_3$ -Nは、2.2 mg/Lであり(第 1 表)、環境基準(0.2 mg/L以下)を11倍超過している。流出口における $NO_3$ -Nの平均浄化率は、20 m水路で20.5 %、40 m水路で27.3 %であり(第 4 表)、後者が前者の約1.3倍である。

原水のT-Nは、2.6mg/Lであり(第1表)、環境基準(0.2mg/L以下)を13倍超過している。流出口でのT-Nの平均浄化率は、20m水路および40m水路ともに17.3%であった(第4表)。

大腸菌群数は、3,500および4,900MPN/mL (平均4,200MPN/mL)であり(第1表)、平均値で環境基準(1,000MPN/mL以下)を4.2倍超過している。流出口における大腸菌群数の平均浄化率は、20m水路で65.3%、40m水路で58.0%であり(第4表)、唯一50%を超え、積極的な親水利用を目標とする網走湖にとって役立つデータが得られた。

# 4. おわりに

冬季の12月中旬における各処理水の水温が1.1~2.4℃と非常に低温であるときの網走川支川黒瀬川における好気性雰囲気での20mおよび40m直列水路システムの特徴をまとめると次のとおりである。

- (1) 両直列水路システムは、規模が倍も違うにも拘わらず、BOD、NO<sub>3</sub>-N、T-Nおよび大腸菌群数の低減において同程度に効果が期待できる。
- (2) PO<sub>4</sub>-Pの平均浄化率は、20m水路で18.8%、40 m水路で34.9%と、後者が前者の約1.9倍で、唯一浄化施設の規模による有意な差が見られ、浄化施設の大きさを決めるうえでも、また、網走湖におけるアオコ対策のうえでも有益なデータが得られた。
- (3) 大腸菌群数の平均浄化率は、20m水路で65.3%、

40m水路で58.0%と、唯一50%を超え、積極的な 親水利用を目標とする網走湖にとって役立つデー タが得られた。

# 謝 辞

国土交通省北海道開発局網走開発建設部治水課および同北見河川事務所の関係各位には黒瀬川の黒瀬樋門個所に建設された排水浄化試験施設における水路試験をご許可いただいた。株式会社池知建設進藤治美氏には水質浄化材のセット、水試料のサンプリング、水質測定などにご協力いただいた。安全運送株式会社吉住昭一氏には水質浄化材をご提供いただいた。環境コンサルタント株式会社の関係各位には水質分析をしていただいた。国立大学法人北見工業大学工学部土木開発工学科卒業生風早央嗣氏、小山甫氏および田中構平氏には水質測定などにご協力いただいた。記して、以上の方々に厚くお礼申し上げる。

(㈱イーエス総合研究所)

# 引用文献

- 1)網走開発建設部:最近の網走湖の水質について、 網走湖水質保全対策検討委員会第10回水質部会資料、149p. (2001)
- 2)前田寛之・進藤治美・長谷部賀宣・桑原 連・ 吉住昭一:北海道北見市一級河川常呂川水系小石 川における並列水路試験-ゼオライト岩, 貝化石 を含む砕屑岩および発酵菌添加木質バイオマスチッ プの河川水質浄化能-、資源地質、55、149~156p. (2005)
- 3) 前田寛之・佐々木 悟:北海道北東部、生田原産ゼオライト岩の性質と利用ーより良い河川環境をめざして一、資源・素材学会北海道支部平成6年度春季講演会講演要旨集、63~64p. (1994)
- 4) Maeda, H., Sasaki, S., Mima, H., Yano, S., Suzuki, T. and Marumoto, M.: Potential water-improvement by zeolite rocks from the Ikutahara district in northeastern Hokkaido, Japan:

- Significance for the prevention of water bloom in Lake Abashiri. Resource Geol. Special Issue, 20, 151-160p. (1999)
- 5) 前田寛之・進藤治美・桑原 連・吉住昭一・神 保貴彦・松木義則:北海道北見市一級河川常呂川 水系小石川における直列水路試験、資源地質、56、 27~34p. (2006)
- 6)前田寛之・進藤治美・桑原 連・吉住昭一:北 海道北見市一級河川常呂川水系小石川における曝 気ありおよび曝気なし直列水路試験の比較、資源 地質、57、95~102p. (2007)
- 7)網走湖環境保全対策推進協議会:網走川水系網 走川水環境改善緊急行動計画(清流ルネッサンス II)、51p. (2004)
- 8)網走開発建設部:接触酸化浄化試験施設概要 (黒瀬樋門個所)、北海道開発局網走開発建設部、 5p. (2000)
- 9) 前田寛之・進藤治美・吉住昭一: ゼオライト岩 の性質と利用、開発技報、45、21~24p. (2002)
- 10) 石田正夫・平山 健・黒田和男・番場猛夫:5 万分の1地質図幅「端野」および同説明書、北海 道開発庁、34p. (1968)
- 11) 前田寛之・桑原 連・吉住昭一・大和三彦・柴 木富幸・吉住眞一・吉住洋一・進藤治美・若山 崇:北海道シェル鉱山貝化石鉱床の概要、開発技 術研究会平成14年度研究発表会講演要旨集、34~ 35p. (2002)
- 12) 水野篤行・百石 浩:5万分の1地質図幅「湧 別」および同説明書、北海道開発庁、78+7p. (1960)

# ファイバースコープによるコンクリート内部の調査

中川 慎司

# 1. はじめに

北海道は殆どの地域が積雪寒冷地であり、現場打ち鉄筋コンクリートフルーム水路をはじめ暴露状態にある多くのコンクリート構造物は、気候の影響を大きく受け、また、劣化の主たる機構は凍害である。

凍害に係る調査は、目視および非破壊調査に加え、 ここ数年、より詳細に構造物内部の劣化状況を確認 するため、コアを採取し、目視による劣化機構の確 認・判定、破壊試験による強度の判定などが行われ ている。

本報告は、簡便な調査方法により開水路側壁コンクリートの内部を直接目視する方法として、ファイバースコープを活用した調査方法を紹介するとともに、道北地方に建設された国営農業水利施設において調査した結果を報告するものである。

# 2. 用水路側壁における凍害のメカニズム

コンクリートフルーム水路の側壁や擁壁等、暴露 状態にある垂直方向の構造物における凍害は、側壁 天端に堆積した雪庇が春先に解け出し、融雪水が天 端からコンクリート内部に浸透し、夜間に温度降下 して0℃以下になった時に凍結膨張することにより 発生する。



図1 用水路側壁における堆雪、融雪、劣化状況

そして、この長年にわたる凍結と融解の繰り返しによってコンクリート組織が徐々に劣化し、微細ひび割れ、ポップアウト等の形状で表面に発生し、更に凍害が進行するとスケーリングによる断面欠損、層状の劣化等に発展する。層状に断面内部に進行する凍害劣化は、内部に配置されている鉄筋が腐食環境になることにより、鉄筋が腐食し構造物の耐久性低下に発展する。

# 3. 開水路側壁の調査方法

開水路側壁の凍害は、一般的に表面の変状に特徴がある。ひび割れ(亀甲状ひび割れ、微細ひび割れ、水平ひび割れ、エフロレッセンスを伴ったひび割れ)の発生の有無、ポップアウト、スケーリング、断面欠損等の変状が確認された場合に、凍害の可能性を判断する。



図2 断面欠損・水平ひび割れによる劣化状況



図3 スケーリングによる劣化状況

凍害による変状であると判断した後の調査は、軽 微な場合はテストハンマーにより表面の脆弱化や浮 き等を判定し、断面欠損、鉄筋露出、エフロレッセ ンスやサビ汁を伴った水平ひび割れ等が生じている 場合は、劣化の範囲、深さ等を確認するため、より 詳細な調査を行う。

詳細調査として、非破壊調査および破壊試験がある。非破壊調査は、表面から調査する方法であり、劣化は進行するに従って変状が異なるため自ずから評価の内容に限界があり、また、耐久性の判定の確実性に難がある。破壊試験はコアを採取することにより、中性化等の各種の試験、圧縮強度算定、劣化範囲の特定等が可能となるが、コア孔 φ 75mm~100mmの埋め戻し後の漏水やエフロレッセンスの発生等、構造物の耐久性低下の可能性が生じること、コア採取に必要な機械(コア採取機、発電機、ドリル、送り出しポンプ、水タンク等)、埋め戻し材料等が必要なため、採取、埋め戻し、運搬等の作業に多くの時間と経費を要する。

従って、具体の調査では非破壊調査および破壊試験の欠点を相互に補完する調査方法を選定し実施することが重要である。

# 4. ファイバースコープによるコンクリート内部の 調査方法

# (1)調査までの経緯及び想定される利点・欠点

コンクリート内部における凍害による層状劣化は、 表面からの目視調査や非破壊調査だけでは、劣化状 況を充分判定することは難しい。しかし、コア採取 して実物を確認する方法は時間、経費、構造物への 影響等を考慮すると多くの箇所で実施することは難 しい。

そこで、近年、土木分野において、主に人体内部を観察することを目的とした医療機器である内視鏡による診察方法を応用した調査が行われるようになってきていることに鑑み、コンクリートフルーム水路の側壁等の断面内部においても、鉛直方向の層状に進行する凍害劣化の状況を簡易に調査する方法とし

て、ファイバースコープを活用することを試みることとした。具体的には、側壁にドリルを用いて小口径の調査孔を開削し、その孔内にファイバースコープを挿入することにより、コンクリート内部の目視の可能性及び精度等を検証することした。

本方法は、以下の利点、欠点が想定された。

- ア) ドリルで開削する調査孔はφ20mm~30mm程度であり、コア採取の場合のように大口径の孔を開削する必要が無く、構造物の耐久性に大きな影響を与えない。
- イ) ドリルはコードレスタイプ (充電電動式) を使用することにより発電機等を使用しないため、作業の効率化が図れるとともに、運搬車等の侵入が困難な場所でも調査可能である。
- ウ)ファイバースコープは携帯性、操作性に優れた機種が市販されているが、本方法での使用事例が少ないため(報告実績が見あたらない)、機種を選定するにあたって、その性能、仕様等の判断が難しい。
- エ) 開削孔の内部がどの程度鮮明に目視できるか、 劣化機構の判断が可能か、等の不安がある。

# (2)調査箇所の選定

側壁の断面内部に縦の層状に進行する凍害劣化の 調査を目的としており、以下の順で調査地点を選点 する。

- ア) 目視調査により場所を概定する。
  - ・エフロレッセンスを伴った水平ひび割れが断面の下方に生じている場所を選定する。
  - ・所々にサビ汁が発生している場所を選定する。
- イ) 目視調査により概定した場所においてテストハ

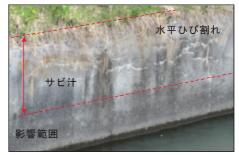


図4 凍害による層状劣化が想定される場所

ンマーを用いて劣化状況を把握する。

- ・凍害劣化によるコンクリート脆弱程度の把握、 浮き・剥離等の範囲を特定する。
- ・目視とテストハンマーの調査結果を踏まえて、 層状劣化の範囲、劣化部と健全部の境界線を設 定する。



図5 層状劣化の範囲

# (3)調査の手順

以下の順で調査する。

- **ア**) 選定された調査箇所をチョーク等で印を付け、 位置を記録する。
- イ) ドリルにより調査孔を開削する。

なお、開削する深さは、側壁の厚さとし、本調 査では20cmとする。

開削後の孔内はエアブロー及びワイヤーブラシ により粉塵等を除去する。

- **ウ**) 孔内にファイバースコープを挿入し、目視確認 を行うとともに、撮影する。
- **エ**) 調査後、調査孔をポリマーセメントモルタルで 閉塞する。

# (4) 劣化状況の精度を上げるための対策

層状劣化は、天端からの水の供給が主な原因であり、上部から下部に向かって進行するため、劣化の程度は逆に下部から上部に向かって大きくなる傾向がある。

劣化状況の精度を上げるため、選定した調査箇所において劣化部、健全部との境界線、健全部を分別し①層状劣化大の場所、②劣化部と健全部との境界線付近、③健全部の場所、の3測定点において調査

し、劣化の傾向を把握する。また、この結果は周辺 の劣化傾向を判断するための参考として活用する。



図6 調査場所の選定

# 5. ファイバースコープによるコンクリート内部の 調査結果

# (1)対象施設及び部位等

対象施設の概要は、以下のとおりである。

- ア)場所:上川総合振興局管内(凍害危険度4(凍害の予想程度が大きい)(日本建築学会:建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5、鉄筋コンクリート工事、1997)の地域
- イ) 施行主体:国営
- ウ)構造:現場打ちコンクリートフルーム水路
- エ) 規模: H2000mm×B5600mm
- オ) 部位:側壁(側壁厚さ200mm)
- カ)方向:南向き
- **キ**) 築後年数:約38年

# (2) 用いた機器

# 1)ファイバースコープ

携帯性や操作性に優れていること、建設関係で使用実績があること、挿入部はφ4mm~5mmで手元にモニタが装備されていること、撮影記録はSDカード等に保存出来ること、等を考慮し、市販されている下記の機種を選定した。

使用機種: φ9.8mmCMOSカメラ内視鏡

ファイバースコープのコードの挿入部には、挿入 位置を確認するため、10mm毎にマーキングテープを 貼付した。





図7 ファイバースコープ

# 2) ドリル

ドリルは、ハンディタイプのコードレスタイプとし、下記を選定した。ドリル孔は、ファイバースコープの挿入及び写真撮影が可能な o 24mmとした。

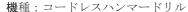




図8 ドリル

# (3)調査方法

調査は、事前調査を行い、測定間隔を20mmとして 行った。

また、ファイバースコープによる調査の有効性を確認するため、本調査場所と水平方向に約50cm離れた場所でコア (φ75mm)を採取した。図9にファイバースコープによる調査状況を示す。



図9 ファイバースコープによる調査状況

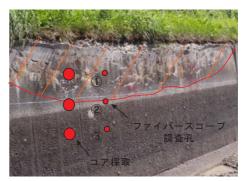


図10 ファイバースコープ調査孔とコア採取位置

# (4) 劣化部(①測定点)における調査結果 1)劣化の状況

図11、図12に、劣化部(①測定点)において調査 した、ファイバースコープによる結果とコアを採取 した結果を対比して示す。写真は、最深部から調査 孔表面部に向けて示してある。

劣化部(①測定点)におけるファイバースコープによる調査結果は以下のとおりである。

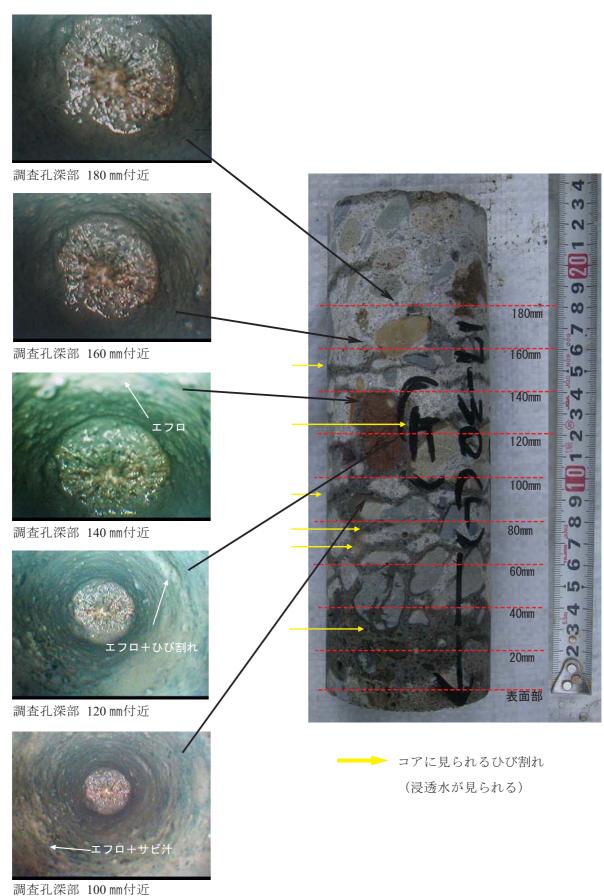
- ア) 測定深度毎にエフロレッセンスが見られる。
- **イ)** 100mmから表面部付近は、エフロレッセンスと ともにサビ汁が見られる。
- **ウ**) 120mm及び80mm付近にひび割れが見られる。

# 2)評価

外観目視での評価は、凍害に起因する剥落、エフロレッセンスを伴う水平ひび割れ、サビ汁程度であるため健全度は「S-3」と評価したが、ファイバースコープによる内部観察調査結果を踏まえた劣化に対する評価は以下のとおりである。

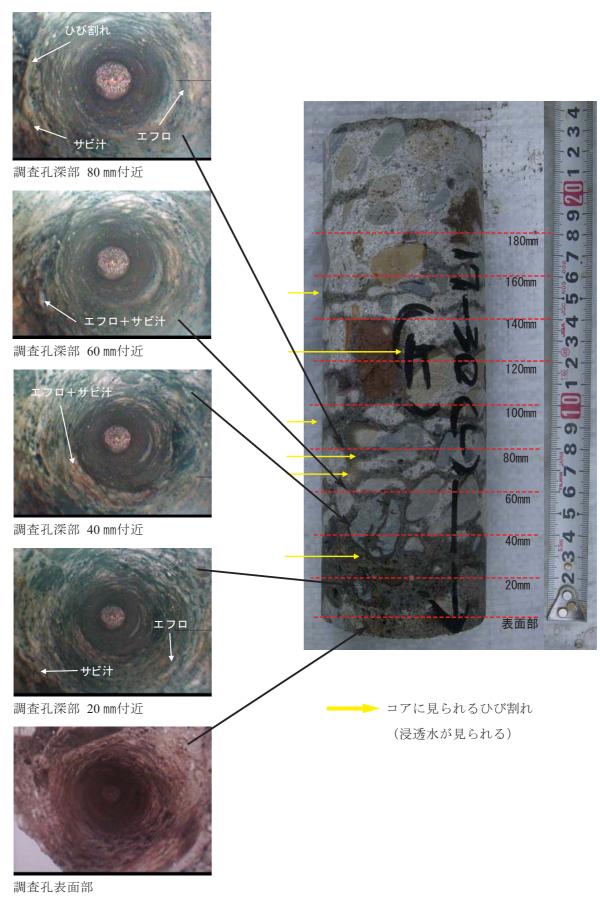
- **ア**) 断面内全般にエフロレッセンスが生じているため、凍害による層状ひび割れが進展している。
- **イ)**エフロレッセンスとともにサビ汁が見られる場所は、鉄筋が配置されており、鉄筋が腐食環境下に置かれているためであり、劣化が急速に進展する可能性が大きい。
- **ウ**) 凍害によるエフロレッセンスの発生が各断面に 生じているため、凍害深さは鉄筋被り深さ以上に 進展している。

以上を総合的に評価すると、劣化過程は加速期から劣化期に移行する段階であり、本施設の健全度は、「S-2」と評価する。



※エフロ:エフロレッセンス
図11-1 ファイバースコープによる調査結果

図12-1 コアの状況



※エフロ:エフロレッセンス 図11-2 ファイバースコープによる調査結果

図12-2 コアの状況

(5) 劣化部と健全部との境界線(②測定点)及び 健全部(③測定点)における調査結果

#### 1) 劣化の状況

ファイバースコープによる調査結果は以下のとおりである。

- ア)②測定点では、50mmから表面部付近はエフロレッセンスが僅かに見られるが、サビ汁の発生は見られない。なお、採取コアには、部分的に浸透水が見られる。
- **イ**) ③測定点では、エフロレッセンス、ひび割れ等は見られない。また、採取コアにおいても水分の浸透、エフロレッセンス、ひび割れ等は見られず断面内の変状は見られない。

#### 2)評価

ア)②測定点における外観目視の結果は、微細なひび割れの発生がしており「S-3」と評価する。ファイバースコープによる調査結果は、エフロレッセンスの発生があるが、層状ひび割れ幅が小さく、また、サビ汁が発生していないため、鉄筋腐食がない段階と評価する。なお、部分的に水分の浸透が見られるため、凍害による劣化が今後進行する可能性は大きい。

以上を総合的に評価すると、「進展期」から「加速期」に移行する段階であり健全度は「S-3」と評価する。

**イ**) ③測定点における外観目視及びファイバースコープによる調査結果は、断面内の変状が見られないが、日射を受ける面であるため凍結融解作用は受けている。

築後年数が38年であることを考慮し、「進展期」であり健全度は「S-4」と評価する。

# 6. 考 察

- **ア**)ファイバースコープによる静止画像と採取コア の目視結果は、概ね同程度に評価できる程度であ り、本調査の有効性が期待できる。
- **イ**)ファイバースコープによる静止画像は、若干鮮明さを欠く場合があったが、劣化状況を概ね判断

できる程度であり、本調査の有効性が期待できる。

- ウ)事前に、目視による凍害層状劣化の判定、及び、 テストハンマーによる劣化部と健全部との境界線 の判定、を踏まえて調査場所を設定することにな るため、経験を積重ねて適正な判定をすることが 重要となる。
- **エ)**限られたスペースの中で、エフロレッセンス、 サビ汁、ひび割れ等の劣化機構を判定することと なるため、経験を積重ねて適正な判定をすること が重要となる。
- **オ**) 1 孔当たりの調査時間は10分程度であること、 使用する機器類は発電機を必要としないハンディ タイプであり取扱いが容易である。
- カ)本診断で用いるファイバースコープによる技術 開発は進行し、リース物件も豊富になっている。 高価なタイプは必要としないため、コア採取に係 る日程及び機器の搬入等による費用を考慮した場 合には安価となる等の利点があり、簡易な調査や 補足的な調査を行う場合はその有効性が期待でき る。
- キ) 現状の外観目視調査では、凍害による劣化状況を評価するには精度に限界がある。ファイバースコープによる内部観察調査により、凍害に対する劣化の傾向を表面のみならず内部まで把握することが可能になり、健全度評価及び性能低下予測の精度の向上、補修・補強範囲の特定に貢献することが期待できる。

#### 7. おわりに

凍害劣化の状況をデジタル的に把握することや将来予測することは、現状では困難である。凍害劣化の深さに影響する要因は、凍害危険度、構造物の向き、積雪の状況、コンクリートの配合、建設後の経過年数等が考えられる。

本文で示したような調査の継続とデータの蓄積・ 解析を行うことにより、凍害劣化の予測が可能とな ることを期待する。

(サンスイコンサルタント(株))

# 頭首工の耐震設計について

見目 宏文

# 1. はじめに

近年、1993年の北海道南西沖地震、1995年の兵庫 県南部地震、2004年の新潟県中越地震、さらに2011 年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震など、 大規模な地震により、頭首工においても、他の土木 構造物と同様に地震被害を受けることが確認されて おり、新潟県中越地震では、戸当りの変形や門柱部 のかぶりコンクリートが剥離するなどの被災が報告 されている。

このような背景のもと、基幹的農業水利施設である頭首工については、耐震性を確保することの重要性が高まっている状況にある。また、農林水産省では、2012年に「新たな土地改良長期計画」を策定し、国土を「守る」ことを政策課題とし、頭首工を含む国営造成施設の重要構造物の耐震照査を実施することを掲げており、今後、既存の頭首工に対する耐震性能照査を実施することが急務となっている。

これまで、頭首工の耐震設計手法については、主にレベル1地震動に対して行われ、震度法により設計地震動を与え、許容応力度法により応力度を照査する手法がとられていた。しかし、河川内構造物として所要の耐震性能を保持する観点から、国土交通省から平成19年に示された『河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説』により、耐震設計の必要性が示され、平成20年3月に、『土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」』が改定され、この中で、レベル2地震動に対する耐震設計手法について明記された。これらの基準及び指針は、類似構造物として道路橋下部工を想定し、日本道路協会の『道路橋示方書・同解説V耐震設計』を基本に作成されている。

しかしながら、頭首工は、土木構造物である堰柱

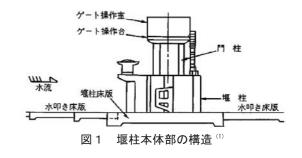
の他に、管理橋、ゲート、ゲート操作室といった複数の構成要素から成り、ゲート操作状況に応じた検討ケースや荷重条件の設定が必要となり、道路橋下部工とは異なる特徴を有する施設である。また、道路橋脚のように、必ずしもトップへビーとはならないことも特徴の一つと言える。

本稿では、今後本格的に実施されるレベル2地震動に対する頭首工の耐震設計について、耐震設計における頭首工の特徴、基本的な設計手法、耐震性能照査における留意事項を概説する。なお、頭首工は、様々な構成要素から成り、構成要素ごとに耐震設計の考え方は異なるが、本稿においては、堰柱の耐震設計を中心に述べるものとする。

# 2. 頭首工の構造的な特徴

# (1) 構造的特徵

堰柱は、道路橋下部工のように、その最上部に上部工反力が作用するような完全なトップへビー構造ではなく、管理橋は、中間的な位置の堰柱上部に作用し、門柱部上部にはゲート操作室・操作台による荷重が作用している構造となっている。また、ゲートの開度に応じてゲート荷重が作用するといった複雑な構造(図1)となっている。



門柱部は、維持管理性の向上のため、2本柱、3 本柱、4本柱といった柱構造を成す構造が多く採用 されており、下部の堰柱と上部の門柱で、大きく断 面性能が変化することから、大規模な地震の際には、 門柱部が先行して破壊する可能性が考えられる。

#### (2) 配筋計画における特徴

堰柱の厚さ(部材厚)は、経験式により目安を設定し、河川管理施設等構造令に示す河積阻害率などを勘案しながら設定している。従って、これまでに築造された堰柱は、作用する荷重に対し、比較的鉄筋量が少ない構造物であると考えられる。

#### (3)検討ケースの特徴

堰柱は、ゲート・巻上機・操作室・管理橋等の大きな荷重が様々な位置に作用する構造物である。さらに、ゲートの開閉状態によって、作用する荷重や、その作用位置が異なることから、様々なケースを想定した設計が必要となる。また、取水形態によって想定されるケースも異なることから、施設の管理実態を踏まえた検討ケースの設定が必要となる。必ずしも、ゲートを全開とした荷重条件が最も厳しいとは言えず、ゲート全閉時に動水圧が作用した場合の方が、厳しい条件になることもあるため、施設に応じた検討ケースの設定が必要である。

# 3. 基本的な設計手法

# 3-1 目標とする耐震性能

# (1) 地震動の定義と保持すべき耐震性能

頭首工の耐震設計の基本的な考え方は、頭首工の 重要度に応じて、地震動の大きさによる施設の機能 維持、構造物の崩壊及び人命への二次災害の防止、 さらに経済的損失を極力を抑えることにある。つま り、全ての施設に一様な安全性を担保するものでは なく、施設の重要度に応じて、想定する地震動や構 造物としての限界状態の設定がなされている。頭首 工の重要度は、以下の3種類に区分されている。

重要度AA種:被災により治水上・利用上・災害 リスク管理上重大な影響を及ぼす 施設 重要度A種:重要度AA種・B種以外の施設

重要度 B種:地震による被災の可能性が小さく、

また被災した場合でも治水上の影響

が極めて小さいと考えられるもの

重要度AA種・A種については、レベル1地震動・レベル2地震動を考慮するものであり、重要度B種は、レベル1地震動を考慮する施設となる。ここで、耐震設計の基本となる地震動は、以下のように定義されている。

レベル1地震動:供用期間内に1~2度発生する確

率を有する地震動

レベル2地震動:発生の確率は極めて低いが大き

な地震強度を持ち、一度発生す

れば大災害に成り得る地震動

そして、重要度区分に応じて保持すべき耐震性能 は、表1のとおりである。

表 1 重要度区分と耐震性能の関係

重要度区分	レベル1 地震動	レベル2 地震動
重要度AA種	健全性を損なわない	限定された損傷に留
		める (機能維持)
重要度A種	健全性を損なわない	限定された損傷に留
		める (修復容易)
重要度B種	健全性を損なわない	_

つまり、レベル1地震動に対しては、全ての施設に対して、従来の震度法のとおり、地震時に発生する応力を許容値内となる(健全性を損なわない)ようにするものである。一方、レベル2地震動に対しては、重要度AA種・A種の施設に対して、許容応力度を超過しても、塑性化を考慮する部材のみに塑性変形が生じ、その塑性変形は部材の修復を容易に行い得る状態程度に抑える(限定された損傷に留める)ものである。

# (2) 耐震性能の考え方

前述の耐震性能に関し、「限定された損傷に留める」という状態について詳述する。レベル2地震動は、発生する確率は極めて低いものであり、このような地震動に対して健全性を確保することは、合理的ではなく、ある程度の躯体の損傷を許容はするも

のの、被災後に補修を必要としない程度、または、 補修により容易に供用が可能となる状態に回復でき る程度の損傷とする、という考え方である。

頭首工の機能は、大略、利水上は計画取水位を確保するものであり、治水上は洪水時に流下断面を確保するものである。この機能を確保し続けるためには、ゲートの確実な開閉が確保されることが前提であり、レベル2地震動が作用しても、かぶりコンクリートの剥離といった躯体の表面的な損傷は許容するが、ゲートの開閉操作が不可能になるような残留変位が発生する事態を防ぐ必要がある。そこで、レベル2地震動に対しては、道路橋示方書等においても示されているように、構造物にひび割れが発生した後の塑性域(地震力によって部材に生じる変形が弾性限界を超えた領域)の変形性能(ねばり)について考慮する考え方が導入されており、頭首工における耐震設計も同様に設計するものである。

# 3-2 頭首工の耐震設計

# (1) 耐震設計法

頭首工のレベル 2 地震動に対する耐震設計は、固有周期、地盤種別、許容塑性率を考慮したタイプ I 、タイプ I の設計水平震度に対し静的解析である地震時保有水平耐力法により、破壊形態の判定、耐力(水平、せん断)の照査や残留変位量等を照査するものである。ここで、タイプ I 、タイプ I の地震動とは、以下のとおりとされている。

タイプ I 地震動:発生頻度が低いプレート境界に 生じる海洋性の大規模な地震動

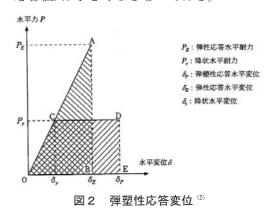
タイプⅡ地震動:発生頻度が極めて低いマグニチュー ド7級の内陸直下型地震による地 震動

「地震時保有水平耐力法」は、構造物の塑性域において地震力を繰返し受けた場合に構造部材が発揮し得る水平耐力(地震時保有水平耐力)や変形性能、エネルギー吸収を考慮して静的に耐震性能の照査を行う方法である。レベル2地震動は、レベル1地震動に比べ5~10倍(タイプIIの場合)の速度応答ス

ペクトルを想定するため、部材が弾性域を超えることを前提とした上で、部材にじん性を与えエネルギー吸収をさせる設計を行う必要がある。そこで、構造体としての弾塑性を明確にできる地震時保有水平耐力法を用い、部材が弾性域を超えて崩壊していく過程(ひび割れ耐力、降伏耐力、終局耐力)を適切に把握していくものである。

地震時保有水平耐力法による頭首工の耐震設計では、エネルギー一定則を適用し、終局限界状態時の許容残留変位  $\delta_{Ra}$  (m) で規定する。変位は曲げモーメント (M) と曲率 ( $\phi$ ) の関係から、許容応答塑性率  $\mu_R$ より残留変位を算定し、許容残留変位  $\delta_{Ra}$ との比較照査を行うものである。

ここで、エネルギー一定則は、弾塑性復元特性を有する1質点系構造物が地震動を受けた場合には、弾塑性応答と弾性応答の両者の入力エネルギーがほぼ同量になるという考え方に基づく近似的な解析法である。図2に示すように、構造物に水平力を作用させた場合、柱基部が塑性域に入った場合には、△OABと□OCDEの面積が等しくなるように弾塑性応答が生じることになる。従って、塑性域に入っても堰柱基部の水平耐力が急激に減少することなく変形できる領域が大きければ、塑性域に入る水平力Py(地震の応答値)は小さくなるものである。



このようなエネルギー一定則の考え方は、堰柱や 門柱・操作室及び管理橋などの複数の大きな質点が 存在する頭首工に対し、荷重増分法(プッシュオー バー解析)を用いて照査する場合でも適用できるも のである。

# (2) 地震時保有水平耐力法

地震時保有水平耐力法におけるレベル2地震動に 対する慣性力は、頭首工の堰柱等、地震の影響が支 配的となる構造部材では、塑性ヒンジ(塑性変形性 能を発揮する部位)の発生によるエネルギー吸収能 力(じん性:粘り強さ)を考慮した設計水平震度に 相当する慣性力を用いることになる。図3に、塑性 ヒンジの発生位置の例を示す。

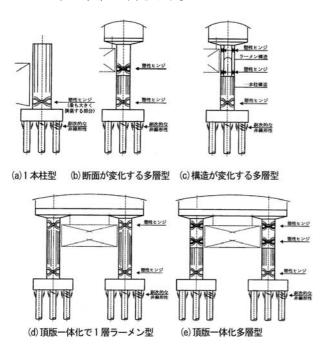


図3 塑性ヒンジの発生位置の例 ②

地震時保有水平耐力法は、主たる塑性ヒンジがどこに生じるかを想定し、主たる塑性ヒンジにおいて確実にエネルギー吸収を図り、構造物全体としての安全性を確保する設計法である。例えば、堰柱基部に主たる塑性ヒンジが生じる場合には、基礎やその他の部位は、堰柱基部を水平耐力以上に設計し、設計で想定した箇所に塑性ヒンジを誘導しながら構造物全体系の崩壊までに至らないようにする設計法である。

# 3-3 耐震設計の作業手順

# (1)作業フロー

本稿においては、一般的な可動堰の形状が、堰柱 及び断面が変化する門柱を有する多層型が多いこと を踏まえ、多層モデルにおけるレベル 2 地震動に対する耐震設計を中心に、その作業手順について述べるものとする。

多層モデルにおける地震時保有水平耐力法による 耐震設計のおおまかな作業手順を、図4のフローに て示す。

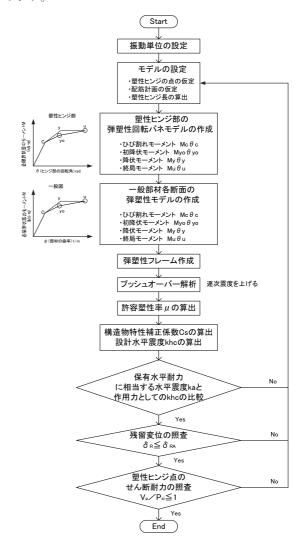


図4 多層モデルの作業フロー

なお、既設堰柱に対する耐震性能照査を実施する際においても同様のフローとなり、配筋計画の変更にフィードバックせずに、耐震補強対策工を検討することになる。

# (2) 振動単位の設定

耐震設計に当たっては、まず、対象となる堰柱の モデル化を行う必要があるが、通常、堰柱は多径間 にわたっていることから、相互の堰柱間の関連性を 確認しておく必要がある。従って、モデル化に当たっ ては、図5に示すような振動単位をもとに、一基の 堰柱全てをモデル化する必要がある。

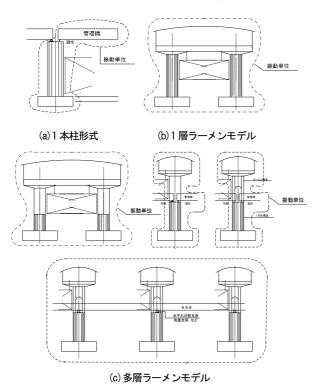


図5 堰柱におけるモデル化の振動単位 ②

頭首工の管理橋が、一般供用されている場合などでは、支承構造が水平方向分散支承や免震支承を使用している場合があり、このような場合は、地震時の応答が相互に影響し合うことになり、隣接する堰柱が結合された振動単位となるため、全ての堰柱をモデル化する必要がある。モデル化における振動単位には、1本柱モデル、1層ラーメンモデル、多層モデルがある。

1本柱モデルは、ゴム引布製起伏堰や転倒堰にように、1基の堰柱とこれが支持している管理橋又は操作室からなる構造系からなるモデルである。1層ラーメンモデル及び多層モデルは、堰柱・門柱など2層構造となる場合、操作室や管理橋がある場合、堰柱にラーメン構造を含む複雑な構造の場合で、全体系としてモデル化した構造系から成るモデルである。1層ラーメンモデルは、径間の短い土砂吐などで頂版を剛結・一体化する複合堰などで見られる構

造である。多層モデルは、一般的な頭首工で多く見られる構造であるほか、管理橋を一般供用する道路橋として使用する場合に見られる構造である。これらのモデルは、複数の箇所で塑性化が生じる可能性があり、その程度によって構造系内で断面力の再配分が生じる場合は、この影響を適切に考慮する必要がある。

# (3) 堰柱のモデル化

多層モデルの堰柱の耐震設計は、複数の箇所で塑性化が想定されることから、塑性ヒンジ発生箇所を適切に把握するため、荷重を除々に増加させて解析を行うプッシュオーバー解析による非線形静的解析を実施する。この解析を行うには、構造物のモデル化と非線形となる部材のモデル化が必要となる。

構造物のモデル化は、部材を質点と線材からなる 3次元又は2次元の集合体として骨組みフレームモ デルとする。図6に、一般的な堰柱と門柱を有する 堰柱のモデル化の例を示す。

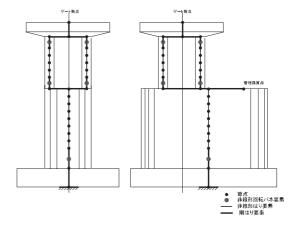


図6 骨組みフレームモデルの例 ②

骨組みフレームモデルは、塑性ヒンジ部及び一般 部に区分してモデル化する。部材のモデル化を整理 したものを表2に示す。

表2 部材モデル

位置	塑性ヒンジ部	一般梁要素部
部材モデル	曲げモーメント	曲げモーメント
	$M$ -回転角 $\theta$	M−曲率 φ
弾塑性モデル	トリリニア型	トリリニア型
	$M-\theta$	$M-\phi$

各要素のモデル化は、コンクリートの設計基準強度や使用鉄筋材質、および、部材厚とかぶり、配置鉄筋量などの物理諸量を基に行うものである。

# (4) プッシュオーバー解析

多層モデルの場合、塑性ヒンジが発生する箇所が 複数あることから、作成したモデルに対してプッシュ オーバー解析を行い、その損傷過程を把握する。プッ シュオーバー解析は、漸次、作用させる荷重を増加 させて、構造物の弾塑性関係(図7)を把握するも のである。

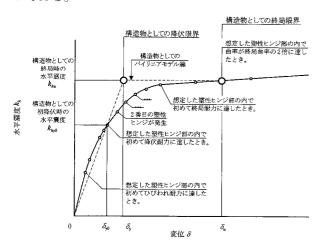


図7 全体系モデルにおける弾塑性関係(2)

プッシュオーバー解析により得られる全体系バイリニアモデルの降伏水平震度khyが、多層モデルにおける地震時保有水平耐力となる。また、構造物の初降伏時は、複数ある塑性ヒンジのうち最初に降伏した震度であり、終局時は、複数ある塑性ヒンジ部がすべて終局耐力に達した震度又は先に終局状態に達した塑性ヒンジ部の曲率が終局曲率の2倍となった震度と定義される。

#### (5) 許容塑性率の算定

作業フローで示したとおり、地震時保有水平耐力 法による照査は、実際に作用する水平力を算定する 設計水平震度kheと対象となる堰柱自体の保有水平耐力に相当する水平震度kaと比較することになる。従っ て、どの程度の設計水平震度になるかが重要である が、設計水平震度を算出するために必要となるのが 許容塑性率μ。である。

地震時保有水平耐力法において、設計水平震度を 算出するためには、構造物特性補正係数を算定する 必要があり、構造物特性補正係数を算定するために は、許容塑性率を算出する必要がある。ここでに、 許容塑性率は、堰柱の破壊形態に応じて、下式によ り算出される。 δω

曲げ破壊 :  $\mu_a = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\alpha \delta_y}$ 

曲げ損傷からせん断破壊移行: μ<sub>a</sub>=1.0

せん断破壊: μ<sub>a</sub>=1.0

ここに、µa: 許容塑性率

δ<sub>u</sub>:終局変位 (mm)

δ<sub>γ</sub>: 降伏変位 (mm)

α :安全係数

なお、安全係数は、地震動の種類と重要度区分に 応じて、表3のとおりとなっている。

表3 曲げ破壊時の許容塑性率算出の安全係数

重要度区分	タイプ [ 地震動の	タイプⅡ地震動の
	安全係数	安全係数
AA	3. 0	1. 5
A	2. 4	1. 2

プッシュオーバー解析により、構造系全体の初降 伏時の水平震度・水平変位、終局時の水平震度・水 平変位が算定される。これにより構造物全体系のバ イリニアモデルを算出することで、降伏変位  $\delta_y$ が 得られる。この値を基に、構造物の許容塑性率を算 出することになる。

また、構造物特性補正係数C。は、下式により算出される。

$$C_{s} = \frac{1}{\sqrt{2 \, \mu_{a} - 1}}$$

ここに、C。: 構造物特性補正係数

μ a: 構造系の許容塑性率

また、地震時保有水平耐力法における設計水平震 度は、下式により算出される。  $k_{hc} = C_s \cdot C_z \cdot k_{hco}$ 

ここに、khc: 設計水平震度

Cs: 構造物特性補正係数

Cz: 地域別補正係数

khco: 設計水平震度の標準値

従って、設計水平震度は、構造物特性補正係数に 正比例することから、この値を小さくなるように許 容塑性率を設定することが重要であり、そのために は、構造物特性補正係数算定式の分母にある許容塑 性率は、できるだけ大きな値をとるようにすること で、構造物に作用する設計水平震度は小さくなると 言える。

図8に、プッシュオーバー解析結果例を示す。

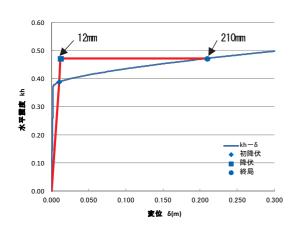


図8 プッシュオーバー解析結果の例

この結果から、降伏変位  $\delta_y$ =12mm、終局変位  $\delta_u$ =210mmが得られる。よって、許容塑性率は、重要度  $\mathbb{Z}$   $\mathbb$ 

$$\mu_a = 1 + \frac{210 - 12}{3.0 \times 12} = 6.5$$

となる。この場合の構造物特性補正係数は、

$$C_s = \frac{1}{\sqrt{2 \times 6.5 - 1}} = 0.289$$

よって、設計水平震度は、 $k_{hc}$ = $C_z \cdot C_z \cdot k_{hc}$ であることから、構造物特性補正係数により28.9%の水平力が軽減されることになる。このように、許容塑性率は、耐震設計上重要な値となる。すなわち、降伏変

位から終局変位までの変位量の差が大きいことが、 許容塑性率を大きくすることにつながり、このこと は、構造物自体にねばりを持たせることを意味する ものである。

一方、許容塑性率は、破壊形態によって算定式が 異なる。曲げ破壊型の場合は、解析結果から得られ る変位量を基に算定されるが、せん断破壊型又は曲 げ損傷からせん断破壊移行型となる場合は、 $\mu_s=1.0$ と固定値を使用することになる。曲げ破壊型におけ る許容塑性率は、通常、1.0よりも大きくなること から、耐震設計においては、曲げ破壊型となるよう に配慮することが重要となる。

せん断破壊型と判定された場合は、 $\mu$  =1.0、C = 1.0となり、設計水平震度は標準値のままである。 このように、地震時保有水平耐力法による耐震設計 は、堰柱のせん断破壊を回避することで安全性を確 保する手法であると言える。

ここで、許容塑性率の算定に大きく影響を与える 破壊型の判定式は以下のとおりとなっている。

P<sub>u</sub>≦P<sub>s</sub>:曲げ破壊型

P<sub>s</sub><P<sub>u</sub>≦P<sub>so</sub>:曲げ損傷からせん断破壊移行型

Pso<Pu: せん断破壊型

ここに、P<sub>u</sub>:堰柱の終局水平耐力(kN)

Ps: 堰柱のせん断耐力 (kN)

P<sub>so</sub>: 正負交番繰返し作用の影響に関する補 正係数を1.0として算出される堰柱の せん断耐力(kN)

従って、堰柱のせん断耐力がどの程度あるかで、 破壊型が定まることになる。せん断耐力の算定式は、 下式のとおりである。

 $P_s = S_c + S_s$  (kN)

ここに、Ps:堰柱のせん断耐力(kN)

S<sub>c</sub>: コンクリートが負担するせん断耐力(kN)

Ss: 帯鉄筋が負担するせん断耐力(kN)

S。は、部材厚、コンクリート強度、軸方向引張鉄筋比などから算定され、S。は帯鉄筋の断面積、配置間隔、鉄筋材質などにより算定される。一般に、堰柱の部材厚は、河積阻害率との関係からある程度の

制約があるため、いたずらに大きくとることはできない。従って、堰柱の耐震設計においては、主鉄筋及び帯鉄筋の配置によりせん断耐力を向上させ、曲げ破壊型の破壊形態となるように誘導することになる。

このように、堰柱の耐震性能の向上に当たっては、 曲げ破壊型の構造物となるような部材厚の設定と鉄 筋の配置計画が重要である。

# (6) 安全性の照査

地震時保有水平耐力法における安全性の照査は、

- ① 保有水平耐力の照査、② 残留変位の照査、③ せん断耐力の照査の3項目となる。
- ① 保有水平耐力の照査

保有水平耐力の照査は、耐震設計上のモデルによって照査手法が異なる。

1本柱モデル及び1層ラーメンモデルでは、堰柱 基部に発生する塑性ヒンジ部での照査となることか ら、下式により照査する。

 $P_a\!>\!k_{hc}\,\boldsymbol{\cdot}\,W$ 

ここに、Pa:保有水平耐力(kN)

k<sub>hc</sub>:設計水平震度W:等価重量(kN)

保有水平耐力は、曲げ破壊型又は曲げ損傷からせん断破壊移行型の破壊形態の場合は、 $P_a=P_u$ となり、終局水平耐力となるが、せん断破壊型の場合は、 $P_a=P_u$ となり、せん断耐力に相当する。せん断耐力 $P_a$ よりも終局耐力 $P_u$ の方が大きいことから、曲げ破壊型とするほうが、保有水平耐力の大きい構造物であると評価できる。

多層モデルでは、構造物全体系としての照査となることから、下式により照査する。

 $k_{\rm hc}\! \leqq\! k_{\rm hy}$ 

ここに、 $k_{hc}$ :設計水平震度(= $C_s \cdot C_z \cdot k_{hco}$ )

kw: 構造物全体の降伏設計水平震度

多層モデルの場合は、プッシュオーバー解析により求める全体系の降伏水平震度と設計水平震度との 比較により照査するものである。 以上、どちらのモデルであっても、曲げ破壊型の 破壊形態の方が、照査上有利なると判断できる。

② 残留変位の照査

残留変位の照査は、下式により照査する。

 $\delta \ {_{\text{\tiny R}}} {\leqq} \ \delta \ {_{\text{\tiny Ra}}}$ 

 $\delta_{R} = C_{R} (\mu_{r} - 1) (1 - \gamma) \delta_{y}$ 

ここに、δ<sub>R</sub>: 残留変位 (mm)

δ<sub>Ra</sub>: 許容残留変位 (mm)

C<sub>R</sub>: 残留変位補正係数

γ:堰柱の降伏剛性に対する降伏後の二次 剛性の比で、0とする。

δ<sub>v</sub>:堰柱の降伏変位 (mm)

μ : 最大応答塑性率

ここで、1本柱モデル、1層ラーメンモデルの場合の最大応答塑性率は、下式により算定する。

$$\mu_{r} = \frac{1}{2} \left\{ \left( \frac{C_{z} \cdot K_{hco} \cdot W}{P} \right)^{2} + 1 \right\}$$

ここに、Cz:地域別補正係数

Khoo:設計水平震度の標準値

W:等価重量(kN)

また、多層モデルの場合は、保有水平耐力ではな く、終局水平震度により最大応答塑性率を算定する ことになる。

$$\mu_{\rm r} = \frac{1}{2} \{ (\frac{-C_z \cdot K_{hco}}{k_{hu}})^2 + 1 \}$$

ここに、k<sub>hu</sub>:終局水平震度

許容残留変位は、H/100を超えない、又は戸当り余裕のうち小さい方の値以内としている。なお、 Hは堰柱高さ(m)としている。

このように、残留変位は、ゲートの開閉性を妨げないものとしている。

③ せん断耐力の照査

部材のせん断耐力が、発生するせん断力以下となるか照査する必要があり、下式により行う。

 $V_b/P_s \ge 1$ 

ここに、V<sub>b</sub>:作用するせん断力(kN)

Ps: せん断耐力 (kN)

# 4. 耐震性能照査の留意事項

#### 4-1 既設堰柱の耐震性能照査の留意事項

# (1) 部材定数の設定

新設される頭首工であれば、レベル2地震動に対し、地震時保有水平耐力法により耐震設計を実施するため、せん断破壊型とならないように部材厚の設定や主鉄筋量・帯鉄筋量を配置することが可能である。一方、既設頭首工の耐震性能照査を実施する場合、部材厚は経験式により算定されているため、比較的厚い部材となってはいるものの、部材厚に対する鉄筋量は比較的少ない量となっている。これは、築造当時はレベル2地震動による照査を想定していないことや、最小鉄筋量の規定も異なることなどが理由に挙げられる。このような場合は、降伏曲げモーメントよりもひび割れ曲げモーメントの方が大きくなることがあるため、バイリニアモデルに補正する方法やファイバーモデルによるモデル化を行うなど、モデル化に留意する必要がある。

# 4-2 解析手法

# (1) 地震時保有水平耐力法適用の留意点

地震時保有水平耐力法は、動的な現象を静的に置き換えて非線形地震応答を求める耐震設計法であり、 1質点系の振動を基本にしたエネルギー一定則を用いて弾性地震応答から非線形地震応答を求めるものである。従って、エネルギー一定則の適用が困難な構造物においては、その採用に留意する必要がある。すなわち、水平方向分散支承や免震支承を管理橋に用いることにより1自由度系とはならないことが分かっている場合や構造が複雑で固有値解析にて1次振動モードが支配モードにならない場合、1次振動モードが支配モードの場合でも有効質量比が小さい場合などにおいては、静的解析である地震時保有水平耐力法の適用が困難である。このような場合については、動的解析による照査を行う必要がある。

# (2)動的解析

動的解析は、地震時における構造物の動的な挙動を、地震力を実際と同様に時々刻々と動的に変化する波として入力し、振動力学に基づいた動力学にて解析して地震動に対する構造物各部位に生じる変位や断面力などの応答値にて構造物の安全性を照査する手法である。一般的に、レベル2地震動に対する耐震性照査のように、部材などに非線形挙動を想定する場合には、非線形動的解析である時刻歴応答解析法が用いられている。時刻歴応答解析法は、弾塑性域の堰柱の加速度、速度、変位、断面力などの時々刻々の応答を算出する方法である。

時刻歴応答解析法による動的解析を行うに当たっては、入力地震動の設定が重要であり、頭首工築造地点における想定地震動を求める必要がある。『土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」』においては、地盤種別に応じて、動的解析に用いる地震動波形例が示しており、これをもとに時刻歴応答解析が実施されている。一方、中央防災会議、地震調査研究推進本部、地方自治体等では、活断層の調査、断層を特定した上での地震動の評価等が進められ、その結果も公表されている。従って、十勝沖、南海トラフ、日向灘といった大規模地震が想定される地域においては、対象となる震源に対する想定地震動の設定が可能になっている。図9に、南海トラフ巨大地震を想定して作成した地震波の例を示す。

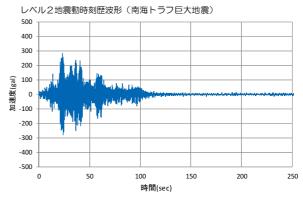


図9 作成した地震波の例

動的解析における照査は、①曲げに対する照査 (各部材の応答曲率 $\phi$ rが許容曲率 $\phi$ r。以下であること)、②せん断に対する照査(各部材の応答せん断力Srがせん断耐力S。以下となること)、③残留変位に対する照査(堰柱の残留変位 $\delta$ Rが許容残留変位 $\delta$ 8 以下であること)の3項目について照査を行うものである。

既設頭首工の耐震性能照査に当たっては、先に述べたように部材厚に対する鉄筋量は少ない傾向にあることから、地震時保有水平耐力法による照査を行った場合は、耐震性能を有していないという結果になりやすい傾向にある。一方、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震が発生した地域にある頭首工において、致命的な損傷を受けた堰柱事例については、多くは報告されていない。このような事実を鑑みると、動的解析により、想定地震動に対する応答値が許容値内であるかについて照査する手法を採用することも検討すべきと考えられる。

# (3) ゲート設備の耐震設計

『土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」』においては、ゲート設備に関する耐震設計手法は明記されておらず、関連する技術書等を参考に照査することとなっている。『河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説』によれば、原則としてゲートの部材に生じる応力度が許容応力度以下であることを照査するものとしている。

このような背景から、頭首工のゲート設備については、レベル2地震動相当の設計水平震度を静的に作用させる震度法により、発生応力が許容値内となるか照査する手法がとられている。しかし、大規模な頭首工ゲートの場合では、震度法による照査は簡便な手法ではあるものの、一方で、過大な設計となることも指摘されている。このような点を踏まえ、施設規模に応じて、『大規模地震に対するダムの耐震性能照査に関する資料』で示されている3次元有限要素モデルにより、部材の塑性化を考慮した非線動的解析にて設計・照査することも検討する必要が

ある。

# 5 おわりに

2012年3月に閣議決定した土地改良長期計画において、2011年3月の東日本大震災の教訓を踏まえ、土地改良施設の耐震強化を推進する方針が打ち出された。これに伴い、重要構造物である既存の頭首工についても耐震性能照査を実施することとなった。

頭首工の耐震設計については、既に、『土地改良 事業計画設計基準・設計「頭首工」』において、そ の手法が明記されてはいるものの、新設の堰柱を想 定したものである。従って、今後、増加することが 見込まれる既設の頭首工に対する耐震性能照査につ いては、今後も実績を蓄積し、より適切な手法を確 立することが重要であると考える。

(㈱三祐コンサルタンツ)

# 参考文献

- (1) 山内 彪:堰の設計、1990.1、山海堂
- (2)農林水産省農村振興局:土地改良事業計画設計基準・設計「頭首工」、2008.3
- (3) 国土交通省水管理・国土保全局:河川構造物の耐震性能照査指針(案)・同解説,2012.2
- (4)(社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2002.3
- (5) 国土交通省河川局:大規模地震に対するダム 耐震性能照査指針(案)・同解説,2005.3
- (6) 山内 彪:堰の設計,1990.1、山海堂
- (7)農林水産省農業工学研究所:農業工学研究所報告第35号、1996.3
- (8) 国土技術政策総合研究所: 平成16年(2004年) 新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要、2005.

# 別海地域における貯留タンク基礎の改善検討 ~要求性能に主眼をおいた設計例~

小河健一郎

#### 1. はじめに

農業では、口蹄疫、豚・鳥インフルエンザなど生産物である食料の安全性を根本から揺るがす出来事が続く一方、道内の酪農でも、従来から家畜排泄物の処理が環境に及ぼす悪影響が問題化している。食料の安全確保と環境保全のために、農業は従来の生産性と経済性優先のシステムから、循環型農業への転換が迫られている。

元来、農業は循環機能を有しており、周知のとおり家畜排泄物、稲わらなどのバイオマスがきゅう肥として昔から有効的に活用されてきている。本州に比べて広い土地条件の北海道では、かんがい用水を利用して家畜ふん尿を圃場に還元する肥培かんがいが、道内の酪農地帯にも広域的に普及している。

この肥培かんがい施設は、家畜ふん尿にかんがい 用水を加え液化する「流入口」、液化されたふん尿 に空気を加え好気性発酵を利用して腐熟化させる 「調整槽」、そしてこれを貯留しておく円筒形の「配 水調整槽」の3施設で構成される。特に配水調整槽 は鉄筋コンクリート製で規模が大きく、その規模は 採草地の散布ブロック面積に応じて大きさが設定され、最大のもので直径 φ 40 m深さ4.5 mを有するも のが建設されてきている。

配水調整槽は、規模が大きいため建設する場所の 選定においては、営農上の視点と構造物建設上の技 術的な視点を重視するが、これらは相反するものが あり、その調整には時間を要することがある。

また、火山国である日本には、第四紀以降の活発な火山活動によって火山噴出物が広域に堆積している。特に、全面積の約40%以上が未固結な火山噴出物で覆われている北海道は、火山灰質土の種類が多く、その性質は多様である。ここ別海地域も火山灰

質土の地盤が主体である。

別海地域は、地表から深度5m前後までは火山灰質の地質地盤で軟弱層となっており、その下層に沈下の恐れのない基盤層が存在していることが多く、肥培かんがい施設における配水調整槽の基礎工では、基盤層まで着底させる砂利置換による基礎工が広く採用されている。しかし、同工法では建設発生土とこれに伴う残土処理が増大し、現地条件によっては置換材の費用も増大することもあり、コストと環境の両面から改善が求められている。

本稿では、この改善策としてこれまでの設計手法 に加え、構造物から要求される性能に焦点を当てて 検討するに「性能設計(信頼設計)の考え方」を援 用して、建設コストの縮減と建設発生土の軽減を図っ た配水調整槽の建設事例を紹介する。

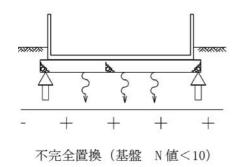
# 2. 現状の課題と検討方針

# 2. 1 現状の課題

提案する不完全基盤層での部分置換工と基盤層までの全層置換工の模式を図2.1に示した。ここで、便宜的に前者を「不完全置換」、後者を「完全置換」 と呼ぶことにする。

配水調整槽における基礎工の設計では、より安定性のある基礎工とするために表 2.1 に示す値以上の地盤を目標にして構造物の基礎を着底させる完全置換を一般的に行ってきた。

しかし、別海地域は図2.2に示すように、地表から深度5m前後までは軟弱層で、その下層に沈下のおそれのない基盤層が存在していることが多く、同工法では置換砂利の増大、建設発生土とこれに伴う残土処理が増大し、コストと環境の両面から改善が求められている。



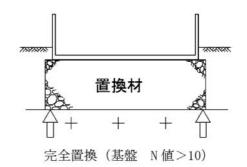


図2.1 砂質基盤のN値と置換工の区分

表2.1 軟弱地盤の判定の目安(用排水路の設計)

土 質	標準貫入試験 N	自然含水比	判 定
	4以上	40%以下	沈下、安定についてほとんど問題ない。
粘性土	2~4	40~100%程度	沈下について検討を要する。 安定についても盛土が高くなる場合は問題 となる。
	0~2	100%以上	沈下、安定に対し十分な検討が必要。
有機質土	-	100%以上	沈下、安定に対し十分な検討が必要。
and size to	10以上	_	沈下、安定についてほとんど問題はない。
砂質土*	5~10以下	_	沈下、安定について検討を要する。

(出典:土地改良事業計画設計基準「水路工」)

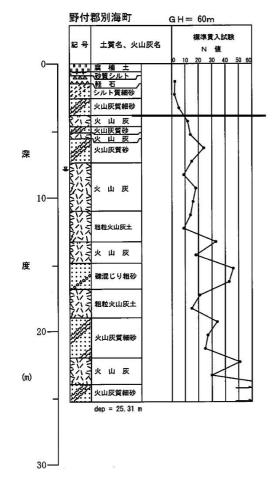


図2.2 別海地域の代表的なボーリング柱状図

(出典:実務家のための火山灰質土、

地盤工学会北海道支部)

# 2.2 検討方針

これまで、火山灰質土(砂質土)の地盤における 基礎工は、一般的に言われる軟弱層を避け、N値10 以上に定着させることを目標に行って来た。これは、 十分な支持力の確保と沈下を避け、より安定性のあ る基礎を構築すること優先したものである。

しかしながら、配水調整槽は面積が広いべた基礎であるため、基礎幅が支持力に関与する砂質地盤においては、配水調整槽の接地圧は60kN/㎡程度であり、N値が10未満であっても、ほとんどの場合十分な地盤支持力を得ることができ、軟弱層であっても建設する構造物が求める支持力と沈下に対する性能が満たされた基礎構造であれば問題ないと考え、以下の検討方針を立てた。

- ① 構造物が必要とする支持力の確保
- ② 沈下量は、構造物の安全が保たれる許容沈下量内に抑える軟弱な砂質地盤において問題となるのが即時沈下である。即時沈下は粘性土の圧密沈下に比べてコンクリートのクリープ効果が期待できないため、構造物に対して厳しい条件となる。
- ③ 均質性が保たれた基礎工

計算上、支持力や沈下量が確保されても着底 面は不均一な軟弱層である。

着底面の均質性が保たれて初めて、支持力の 発現効果や許容沈下量の有効性が確保される。

#### 3. 基礎の安定性

#### 3.1 地盤の許容支持力度

地盤の許容支持力度は、「土地改良事業計画設計 基準 ポンプ場」に準拠して、式3.1、式3.2の 支持力公式から算定する。

$$\begin{aligned} q_u &= \left(i_c \cdot \alpha \cdot C \cdot N_c + i_{\gamma} \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot \eta \cdot N_{\gamma} + i_{q} \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_q\right) \\ & \cdots \\ + \vec{\Xi} \ 3 \ . \ 1 \\ q_a &= \frac{1}{n} \cdot q_u \quad \cdots \quad \vec{\Xi} \ 3 \ . \ 2 \end{aligned}$$

ここに、

q。: 地盤の許容支持力度(kN/m²)

n:安全率(常時はn=3、 レベル1地震時はn=1.5)

qu: 地盤の極限支持力度 (kN/m²)

C:支持地盤の粘着力(kN/m²)

γ1: 支持地盤の土の平均単位重量 (kN/m²)

γ2: 根入れ部分の土の平均単位重量 (kN/m²)

γι、γ₂には、地下水位下の場合には水中単位重

量を用いる。

α、β:基礎の形状係数

ic、ir、i。: 傾斜に対する補正係数

Nc、Ny、Ng:支持力係数、内部摩擦角φの関数

B:基礎幅 (m)

D: 基礎の根入れ深さ (m)

n:基礎の寸法による補正係数で、常時

は n=1.0としてよい。

N値は地盤の支持力度と密接な関係があり、その大小が基本的に基礎構造を決定する。そこで、代表的なモデルを設定して、N値の変化に伴う地盤の支持力度を試算してみる。モデルとした配水調整槽の基礎寸法や地盤条件は表3.1のとおりであり、砂質土におけるべた基礎の特性(支持力公式の第2項)に着目するため、それと関与しない根入れ深さ(Df)はゼロに設定した。また、地下水位は基礎直下としている。

表3.1 計算モデル設定条件

基礎の直径	載荷重	根入れ深さ	土の単位重量 (水中土)
В	W	$\mathrm{D_{f}}$	γ 1
25m	$60 \mathrm{kN/m^2}$	Om	$10\mathrm{kN/m^3}$

なお、土の内部摩擦係数 ( $\phi$ ) は式3.3 (大崎の式) により算出する。

図3.1では、N値=1でも許容支持力度は100kN/m<sup>2</sup>強と載荷重(必要支持力度)を超えており、基礎幅が広い場合には、軟弱な砂地盤でも十分に支持力を確保できることが分かる。

ここで、砂地盤の支持力公式におけるNrは、基礎幅が大きくなると、支持力係数が低下する性質、いわゆる寸法効果がある。

ただし、当該基準では常時の支持力算出の場合に は、寸法効果の検討は不要とされているため、配水 調整槽基礎の設計では、寸法効果を考慮する必要はない。

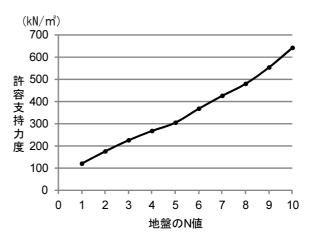


図3.1 N値と許容支持力度

しかしながら、寸法効果の原因は内部摩擦角 (φ) の応力依存性や進行性破壊など、土の力学的特性が 応力状態に依存することに起因しており、とくに進行性破壊を呈する軟弱な砂質土では発現しやすいた め、安全性の見地から、あえて寸法効果を考慮して許容支持力度を算定する。

ここで、寸法効果の補正係数  $(\eta)$  は、式 3.4 で求める。

$$\eta = (B/B_0)^{-1/3}$$
 .....式 3.4 ここに、

B:基礎幅 (=25m)

B<sub>0</sub>: 基準の基礎幅 (= 1 m)

図3.2に示すように寸法効果を考慮しても、N値が2以上であると十分な地盤支持力度が確保され、砂質地盤では、ほとんどが配水調整槽の地盤支持力度を確保できる。

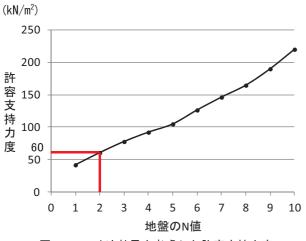


図3.2 寸法効果を考慮した許容支持力度

# 3.2 沈下量の検討

べた基礎は、軟弱な地盤でも必要な地盤支持力を 確保できる特徴がある反面、基礎幅が大きいことか ら地中深部まで圧力が伝達されるため、地中部の沈 下対象層に対する検討が重要である。

火山灰質土の砂質地盤での沈下は即時沈下である。 即時沈下は圧密沈下に比べて沈下量が小さい、施工 段階で所定の荷重が載荷されて一度沈下するとそれ 以後は沈下を生じない、などの理由から設計条件に よっては、即時沈下量を圧密沈下量に包含したり、 無視する場合もある。

しかし、以下の理由から配水調整槽の設計では即 時沈下を検討する。

- ① 沈下量は小さいものの、圧密沈下に比べてコンクリートのクリープ効果が期待できないため、 構造物に対して厳しい条件となる可能性がある。
- ② 配水調整槽の底版(基礎)は、スパンに対して部材厚が薄く剛性が低いため、変位に起因する小さな荷重でも応力超過になりやすい。
- ③ 通常、配水調整槽は供用開始後の貯留・満水になって、初めて最大荷重が載荷される。

即時沈下量の計算には、有限厚さの地盤上の基礎を想定しているシュタインブレンナー(Steinbrenner)の近似解を応用した式を用いる。

ここに、

S<sub>E</sub>:即時沈下量(m)

q:基礎の平均荷重度(kN/m²)

E: 地盤のヤング係数 (kN/m²)

μ<sub>||</sub>: 地盤のボアソン比、沈下対象層厚及び基 礎底面の形状によって決まる沈下係数

ν:地盤のボアソン比

A:基礎の底面積 (m²)

ここで、地盤のポアソン比( $\nu$ )と地盤のヤング率(E)は以下の通りとする。

地盤のポアソン比(ν)	0.3	砂
地盤のヤング率 (E)	1400 • N (kN/m²)	正規圧密された砂

次に、配水調整槽の許容沈下量であるが、べた基礎の許容沈下量は構造物の特性に依存するため現行の基準(ポンプ場)では、一律に許容沈下量が決定されていない。

しかし、旧基準や近接施工時の変位規制では許容 沈下量を「3cm」としているので、その許容値を採 用することにする。

即時沈下量は、沈下対象層のN値(ヤング率)と 層厚に対して相関性があるので、これらをパラメー タに、N値毎に許容沈下量(3cm)を超過する層厚、 ここでは仮に「限界層厚(Hmax)」と呼ぶ、を式3. 5から求め図3.4に示した。

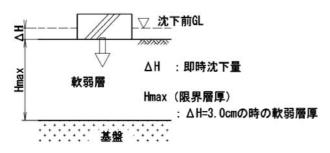


図3.3 限界層厚(Hmax)の概念図

当該地域では、概ねGL-10m未満の位置に沈下の恐れのない基盤が存在する。一方、配水調整槽の床付け位置  $(D_F)$  はGL-3m前後であるので、沈下対象層は 7m程度となる。図 3.4 より、沈下対象層の平均値が  $4\sim5$ 以上であると、沈下対象層の層厚 (H) が限界層厚に達せず、沈下量が問題になることはない。(図 3.5 参照)

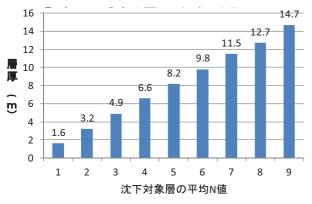


図3.4 沈下対象層の平均N値と限界層厚(Hmax)

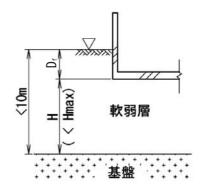


図3.5 基礎の根入れ(D<sub>f</sub>)と基盤深さ

# 4. 基礎地盤の安定化対策

べた基礎である配水調整槽については、N値が5 前後の軟弱な砂質地盤でも、許容地盤支持力、沈下 量に問題を生じることがなく、要求を満たした性能 が発揮されることが明らかになった。言い換えると、 基盤に基礎を着底させない不完全置換工でも安全性 を確保できるといえる。

ただし、これら一連の検討は、地盤を含む構造系を均質体モデルとしての解析結果である。地盤のような自然を対象にした調査では、試験精度も含む地盤特性のばらつきは必ず存在し、とくに軟弱な地盤ではその傾向が強い。この不確実性の存在を念頭に置いて慎重に検討することが重要である。

具体的な懸念事項に、「不確実性要素」としての 基礎の不同沈下や局所的な陥没などがあげられる。 貯留タンクの基礎の変状が大事故につながった有名

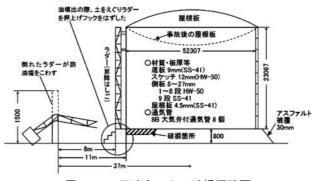


図4.1 石油タンクの破損概略図

(出典:水島のタンク破損による重油流出、赤塚広隆、小林英男、Web版)

な例に、1974年に発生した水島石油タンクの破損事 故がある。

同事故は、部分的に不適切であった基礎施工が局 所的な基礎の崩壊を招き、それがタンク破損、石油 流出に結びついた。

この事故は、構造物の安全性の確保には、工学モデルによる構造検討に加え、現地条件や施工状況に潜在する不確実性要素を確実に除去することが不可欠であるということを教えている。

基礎地盤の不確実性要素の除去することを一般的な製品の製造にたとえてみると、製品の品質管理と同じである。すなわち、形状、材料などの製品仕様は既に確定しており、あとは設計どおりの品質または機能をいかに確保するかということが問題となっているのである。

不確実性の把握が直接困難な場合に対応する方法 に、図4.2に示す「コード・キャリブレーション」 という手法がある。

信頼設計において適正な安全水準の目標値は、種々の不確実性要素の存在から、直接的に設定することが困難である。

そのようなときに、同手法では、現在存在する構造物は、社会が許容する安全性余裕の基に設計されていると仮定し、これによりそのレベルを逆算して安全性を評価するのである。

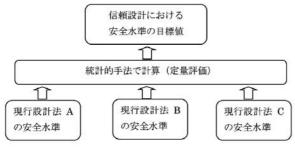


図4.2 コード・キャリブレーションの概念図

本検討ではそのコード・キャリブレーションの概念を借用して、様々な工種・施設の設計事例から、不確実性要素があっても安全性を確保できる方法を見出そうと試みた。(図4.3参照)

すなわち、表 4.1 に示すように用途や工種が違っても要求性能が類似している工法を3種類選択し、 それらの部材性能や品質など機能面に着目して対比 検討することにした。

そして検討結果から浮き出された安全水準(設計 法)は、これまでの実績や社会的容認から妥当であ ると判断し、当該設計に応用することにした。

以上の手順と表4.1の検討結果から、配水調整槽の基礎工の設計方針を以下のように決定した。

- ① 設計条件の厳しい石油タンクで砕石基礎を採用していることは、適切な砕石置換工は堅固で 安全な支持版となることを保障している。
- ② その場合の必要な敷設厚は、サンドマット工 や路盤工から概ね50cmと判断される。
- ③ また、この置換工を布設した場合には、基礎 周辺の均質性が向上するため地盤の有する不確 実性が低減するとみられる。
- ④ これらゆえ、支持力など地盤の安定性が確認 されている条件下では、先に述べた不完全置換 工でも十分な安全性と性能を確保できると判断 する。

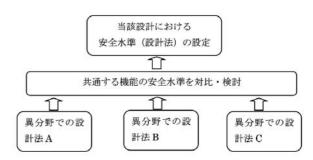


図4.3 本検討での安全水準の設定手順

表4.1 各種施設の要求性能と特徴

種別	要求性能・特徴
	用途、形状が配水調整槽に類似した円形鋼製タンク
	接地圧が大きい(200kN/m²前後)
石油タンク基礎	基礎幅が大きい (50~80m)
(リング基礎)	安全性の要求度が高い (危険物の貯留)
(リンク 基礎)	リング基礎には、コンクリート以外に砕石も使用されている
	底版は鋼板でたわみ性版
	基礎は沈下を許容し、沈下量の計算により安全性を確認する
軟弱地盤の表面処理工	トラフィカビリティの確保、せん断強度の増強
(サンドマット工)	地盤強度に応じて必要厚を決定
	サンドマットの最小厚=0.5m
	繰り返し荷重に対応、荷重の分散
道路の路盤工	路床の強度に応じて路盤厚を決定
(コンクリート舗装)	路盤厚=20~60 cm (クラシャラン)
	コンクリート版には目地を設置

#### 5. 設計事例

不完全置換を行った設計例をここで紹介する。

建設する配水調整槽は、プレキャストPCパネル形式の側壁と現場打ちRCコンクリート底版で構成される円筒形のPC槽で、その規模は直径29m、深さ4.50mである。

従来の仕様設計ではN値 10以上が目標値であること から計画すると、着底深度 は配水調整槽の場内面下 6.78mとなる。しかし、PC 槽の底版は構造上、地下水 位の揚圧力の影響を受けな い深度に建設することが条 件である。

これらの制約条件より、

図5.1のとおり、場内面下方の3m付近の「シルト質砂:N値5」の軟弱層を着底面とした不完全置

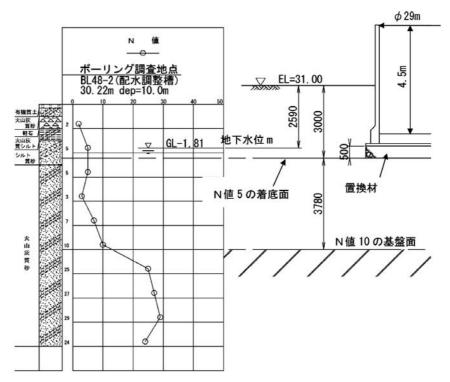


図 5.1 設計概要図

換の基礎工の検討を行った。

結果は、表 5.1 のとおりで、接地圧及び沈下量ともに配水調整槽が要求する性能を満たす結果を得ることができた。

また、机上の設計のみならず、実際建設された配 水調整槽は建設後2年経過しているが、構造物に変 状及び漏水は見られない。

したがって、軟弱砂質地盤に起因する即時沈下の 影響はなく、安定した状態を保っていると考える。

項目	数值	単位	備考
基礎の直径	29. 71	m	
置換の厚さ	0. 50	m	
接地圧(置換材含む)	65	kN/m²	
許容地盤支持力	200	kN/m²	OK
軟弱層の厚さ	3. 78	m	
軟弱層の厚さ平均N値	5		
沈下係数	0. 0779		
最大許容沈下量	3.0	cm	
沈下量	2. 4	cm	OK

表 5.1 不完全置換の検討結果

以上のとおり、机上設計及び現地の経過確認により、所定の成果を得ることができた。

しかし、現段階における設計手法では置換したサンドマットが均質化していることを前提としたものである。加えて、施工時においては、着底面の素地盤の支持力の確認と置換砂利の転圧密度管理より基礎工の品質を管理している状況である。

この現状を踏まえて、不完全置換の品質を確保するための改善策として、道路の平板載荷試験同様、 置換砂利上における平板載荷試験の実施を提案する。

道路の平板載荷試験は、道路のほかに、空港滑走路の設計あるいは施工管理や、鉄道の盛土地盤・空港滑走路地盤の品質管理、石油貯蔵タンクなどの基礎地盤の支持力確認にも多用されており、今後の不完全置換の合理的な置換厚の検証や性能の裏付けを

得る意味で重要な現地試験であると考える。

#### 6. おわりに

軟弱な地盤において安全確実に構造物を建設するには、掘込み形式が妥当な設置方法である。しかし、それにはいくつかの欠点があり、そのひとつが排土量の増加である。国内における建設副産物の再利用では、アスファルトやコンクリート塊の再資源化率が98%であるのに対し、建設発生土の再利用率は79%と低い。当該地域でも発生土の処理が課題となっており、コスト縮減と環境保全の両面から発生土の縮減が要請されている。

もうひとつの欠点が地下水への対処である。底面 積の広い配水調整槽では、とくに慎重な浮上対策が 要求されている。

これらの欠点を踏まえて、軟弱層であっても、比較的簡易な対策で安全に配水調整槽を設置できるとしたなら、設計の自由度は大きく広がり、課題が解決すると考え、先に述べた不完全置換工を検討した。検討の中で最も苦慮したのは、不確実な条件下での安全性の確保である。検討を進めていくうちに「コード・キャリブレーション」という手法があることを知った。

同手法は、現在存在する構造物は、社会が許容する安全性余裕の基に設計されていると仮定し、これによりそのレベルを逆算して安全性を評価する方法である。

高度な技術力に欠ける本検討で同手法を駆使する ことは不可能であったが、論点となる箇所では同手 法の概念を積極的に援用した。

今後、提案した不完全置換工の確実性を高めていくには、施工時に平板載荷試験を積極的に実施してデータを収集する一方、FEMなどを利用した高度な構造解析を行い、両者の結果から基礎の構造特性を的確に把握することが重要である。

(㈱ドボク管理)

# 参考文献

- 1)農林水産省構造改善局:土地改良計画設計基準 設計「ポンプ場」平成9年1月
- 2)農林水産省農村振興局:土地改良計画設計基準設計「ポンプ場」平成18年3月
- 3)農林水産省農村振興局:土地改良計画設計基準設計「水路工」平成13年2月
- 4)独立行政法人 土木研究所 寒地土木研究所:泥 炭性軟弱地盤対策エマニュアル平成23年3月
- 5) 公益社団法人 地盤工学会北海道支部:実務家 のための火山灰質土〜特徴と設計・施工、被災事 例〜
- 6)総務省消防庁:危険物の規制に関する技術上の 基準の細目を定める告示

# 簡易空撮システムの有効利用について

村上 和征

#### 1. はじめに

圃場内に発生する、降雨直後の湛水状況を把握するため、簡易空撮システムを使用した調査を行なった。

このシステムの導入にあたり、使用機材の検討お よび調査状況を事例として報告する。

#### 2. 調査経緯

畑地帯に排水路を新設する計画において、圃場内 の湛水を効率よく排除することが課題となっていた。

地形の変化は地形図 (1/5,000~1/1,000) で確認することが出来るが、表示されている標高が少なく、10mコンターのみでは圃場内の流水方向まで判断できない。このため、圃場内の流水状況を把握するには、圃場内 (圃場1区画:540m×540m) を約150m間隔でメッシュ測量を行い、傾斜方向や低み等の地形の状況を把握し、地表水の流れや湛水位置を想定していた。

しかし、メッシュ測量の結果と、地権者や耕作者 からの聞き取った湛水位置が合致しない範囲が多々 見られた。

この要因は、河道を埋め立てて圃場としている場所もあり、地表水の浸透状況は場所により違っている事と判明した。埋め立てた河道の位置は、過去の航空写真や地形図からおおよその想定できたが、施工した年度や施工状況、埋め立てた土質材料等が不明であり、旧河道はすべて同じ状況にはなっていないと推定された。

よって、降雨直後に湛水の実態調査を行うことに したが、踏査では、圃場全体を見渡せないことと、 降雨直後は圃場内へ立ち入ることができないことか ら、空撮システムを用いて調査できないか検討を行った。

#### 3. 空撮システム

# 3-1 撮影方法

セスナ機やヘリコプターによる有人飛行撮影は、 広範囲を迅速に撮影することができる反面、専門の 会社に撮影を依頼する必要がある。また、撮影時の 天候により撮影成果が左右され、場合によっては撮 影が中止となる。

今回の調査においては、降雨直後の湛水の実態調査であることから、撮影する会社との日程調整が難しいと思われるため、自社で撮影が出来る簡易空撮システムを検討した。

#### 3-2 簡易空撮システムの種類

自社で撮影できる方法の検討にあたり、撮影機械 の維持・管理や操作性等から、使用可能な方法とし て、以下の方法を検討した。

- ① 全自動ロボット型空撮システム
- ② 特殊バルーンによる空撮システム
- ③ ラジコンヘリによる空撮システム

各撮影方法の特徴を機械メーカーHPやカタログから抜粋し、表-1、表-2に示した。

検討した方法の③は、デジタルカメラを搭載した ラジコンへリコプターを操作し、撮影を行う方法で あるが、ラジコンへリコプターの操作が極めて難し いことから、検討から除外した。

比較検討の結果、以下の理由により②特殊バルーンによる方法を採用した。

#### 採用理由

- ・全自動ロボット型は、操作も簡単で耐風性もあり、 安定した撮影が行えるものの、機材一式が1,000 万円以上と高価である。
- ・特殊バルーン型は耐風性が弱く、気象条件が制約 されるものの、機体を膨らませた状態でライトバ ンに収納可能であり、数日に渡って撮影が可能で ある。また、機材費及び撮影準備費用が一番安価 である。

表-1 空撮システム特徴① ~全自動ロボット型~

種類	(A)	(B)
参考機種	ScoutSystem	Gatewing X100
形状	クワッドコプター	飛行機型
寸法	$80\mathrm{cm} \times 80\mathrm{cm} \times 20\mathrm{cm}$	翼長 100cm
.117	Sociii × Sociii × Zociii	100cm×60cm×100cm
最高高度	500m	750m
耐風性	風速 13.8m/s 以内、突風時 22.2m/s 以内	最高風速 6bft(10.8~13.8m/s)まで
機体写真	機械本体  収納状態  ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・	収納状態
特徵	に行える。 ・夜間など、視界がきかない状況でも自動が できる。	から、操縦の必要はなく、人為的な錯覚やでも呼び出し、広い面積の定点観測が高精度 でも呼び出し、広い面積の定点観測が高精度 飛行により目的地まで飛行、撮影することが 専用トランクに収納ができ、専用の移動車両

表-2 空撮システム特徴② ~特殊バルーン型~

表 - 2 空撮システム特徴② ~特殊バルーン型~ 			
種 類	(A)	(B)	
参考機種	スカイキャッチャー	ひばりは見た	
	長さ : 約 5m	長さ : 約 3m	
寸法	直径:約60cm	直径:約70cm	
	容量:約1.6m³	容量:約0.9m³	
最高高度	250m以下	150m以下	
双间间次	(接続ケーブル長により 250m以上も可能)	(接続ケーブル長により 150m以上も可能)	
耐風性	風速 15m/ s 以下	風速 2m/ s 以下	
機体写真	操作機材	操作機材	
特徵	し、被写体を捉えて撮影する。 ・地上のモニターでリアルタイムに確認したいくつもの画像の中からベストショットを・気球内にはヘリウムガスを充填しており、かつ滞空時間が長く一回の浮揚により数時・操作は凧揚げの要領でケーブル1本で行い。 ・晴天や曇天で光量が十分であること(雨天を	爆発や墜落の恐れが少なく安全性が高い。 間の連続撮影が可能です。 い、エンジンなどの動力を全く必要としな や夜間での空撮は不可)。 ペースが必要。周りに電線、建造物、木々な	

#### 4. 飛行制限

#### 4-1 管制空域

特殊バルーンを飛行させるにあたり、飛行制限を 航空法で確認を行った。

日本気球連盟ホームページ内で示されているパイロットハンドブックでは、航空法がわかりやすく示されており、これを参考とした。

空域は管制区域で分けられており、航空交通規制 業務が実施される管制空域と、それ以外の非管制空 域に分けらる。

管制空域の概要と、管制空域の概念図を以下に示した。

- · 航空交通管制区(Controlled area)
  - 地表又は水面から200メートル以上で、航空 交通の安全のために国土交通大臣が告示で指定 する空域。
- ・進入管制区(Approach Control area) 計器飛行方式により離陸に引き続く上昇飛行、 着陸に先行する降下飛行を行う航空機に対して 航空交通管制を行う空域。
- · 航空交通管制圈(Control zone)

飛行場の標点から半径9kmの円で囲まれる空域の上空で、地表面から公示で指定された高度までの空間。

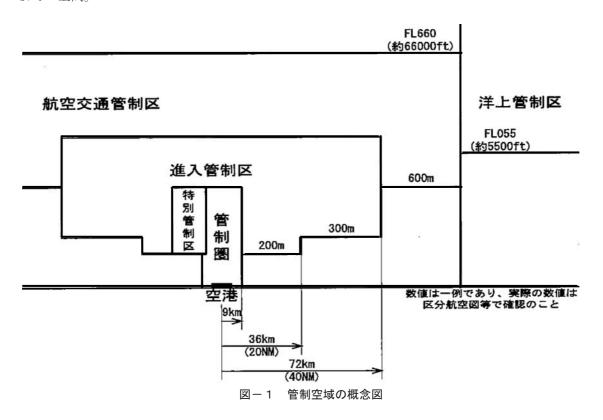
- 特別管制区(Positive Control area)
   航空交通の混雑する空域のうち主に特定の飛行場の周辺。
- ・洋上管制区(Ooeanio Control area) 洋上管制区とは目本が航空交通業務を担当す る東京および那覇飛行情報区(FIR)の洋上区域。

#### 4-2 飛行できる空域

航空法に基づいて気球を飛行させる場合、大きく 分けると次の3種類の空域に分類できる。

- ① 原則として飛行できない空域 航空交通管制圏のうちの、地表または水面か ら150m以上の空域。
- ② 通報が必要な空域 航空路内の地表又は水面から150m以上の高 さの空域及び、航空路外の地表又は水面から250 m以上の高さの空域。
- ③ 無条件に飛行できる空域 航空路内の地表又は水面から150m以下の高 さの空域及び、航空路外の地表又は水面から250 m以下の高さの空域。

以上より、飛行範囲は地上から150mまでの範囲で操作することとした。



# 5. 調査事例

# 5-1 調査状況及び結果

簡易空撮気球による調査状況及び結果を以下に示す。

- ① 調查場所:湧別町
- ② 調査状況:測量調査時の状況や、気象庁の過去の気象データから、風速が安定する午後から調査を行った。調査中は風速1 m/s 程度であり、支障なく撮影することが出来た。

湛水面は光に反射し、はっきりと確認できた。

(写真-1)

③ メッシュ測量との比較:

撮影した写真は、鳥瞰図のような構図となる ため、航空写真のように測量平面図と重ね合わ せることが出来ない。

道路や待避場等を目印として、湛水位置とメッシュ測量平面図の対比を行った結果、地形の窪地よりも、旧河道沿いに湛水している状況が確認できた。(図-2)

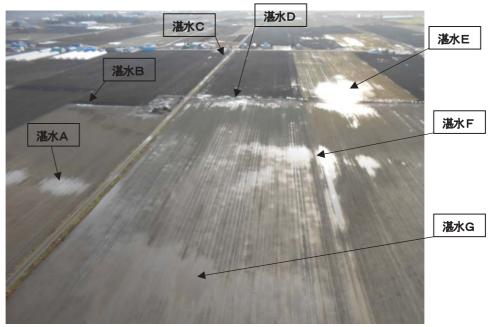


写真-1 撮影写真 撮影範囲 撮影範囲 湛水C 湛水D E O 旧河道 湛水E 9.61 湛水B 湛水F 旧河道 凡例 メッシュ測量で 観測した窪地 空撮により確認した た湛水範囲 湛水G 湛水A 撮影場所 図-2 湛水位置平面図

# 5-2 使用上の課題

今回の調査で感じた課題を以下にまとめた。

#### 1) 準備

① 気象状況の把握

調査地区や季節により、風速や風向が変化するため、気象庁HP等で過去の気象データから 状況を確認する必要がある。

② ヘリウムガスの入手

気球に注入するヘリウムガスは、医療機器の「MRI」や半導体や薄型パネルの製造過程にも使われており、医療や製造工場等に優先して供給されているため、小売で入手するには余裕をもった納期が必要となる。

③ 作業地点の選定

撮影時には移動車両を停める場所の確保と、作業半径(半径150m)内に住宅や電柱等の支障物を避ける必要がある。

#### 2) 撮影時

① 撮影時の操作

気球からカメラをぶら下げた状態となっていることから、撮りたいアングルにカメラを操作するためには操作の慣れが必要である。

搭載しているのはデジタルカメラなので、記録媒体(SDカード)の容量を大きくし、撮影枚数を多くするのが良いと思われる。

② 撮影方向

気球の高度や撮影位置が風の影響により変化するため、つなぎ写真を作るには不向きと思われる。 鳥瞰図的に全体を撮影するのが良いと感じた。

③ 撮影時の移動

トヨタのハイエースバンで、気球を膨らませたまま収納し、調査地点の移動を行った。したがって、気球で車内はいっぱいとなるため、後部座席に乗車することが出来ない状態での移動となった。

# 3) 管理

① 気球内のガスの取り扱い気球内のヘリウムガスは少しずつ抜けていく

ため、数日間で使用するには状態を見ながらへ リウムガスを補充する必要がある。

また、ヘリウムガスが自然に抜け切るまでは 時間がかかるが、気球内のヘリウムガスは変質 するため、長期間使用していないときは、気球 内のヘリウムガスを全部入れ替える必要がある。

#### 6. 終わりに

今回の調査では、調査範囲を網羅する観測期間を 確保できなかったため、試験的な調査となったが、 地表からの調査では確認できない範囲を調査記録と して保存できた。

また、メッシュ測量結果と対比することにより、 地形の要因以外の湛水がわかり、計画に反映することが出来た。

簡易空撮気球の使用は、撮影の準備に時間がかからないため、突発的な障害(洪水による湛水、土砂崩れ等)の状況把握等にも有効と思われた。

(㈱フロンティア技研)

# 参考文献

- ① 全自動空撮システム
  - ScoutSystem~株式会社システム・ケイ http://scout.systemk.co.jp/
  - ・GatewingX100~ジオサーフ株式会社 http://www.geosurf.net/index.html
- ② 特殊バルーン型空撮システム
  - ・スカイキャッチャー〜MHIプラント エンジニアリング株式会社

http://www.mhipec.co.jp/products/sky\_sky.html

NETIS 登録No. QS-060016-V

- ・ひばりは見た $\sim$ アイテック株式会社 http://ひばりは見た. jp/
- ③ 日本気球連盟

http://www.jballoon.jp/パイロットハンドブック

http://www.jballoon.jp/safety/ handbook/handbook.html

# 貯水池建設工事にともなう環境保全措置の効果検証

曽我部浩二

#### 1. はじめに

近年、国民の環境保全についての認識が高まるなか、事業実施に際しては、環境との調和や自然環境の再生等に対する社会的要請が増大している。また、農業水利施設がつくりだす水辺は、生物生息空間としての自然生態系の保全、あるいは農村空間の景観的要素、身近な水辺等として多面的な役割を担っている。

このため、平成13年に土地改良法が改正され、土地改良事業の実施に際しては、環境への負担や影響を緩和軽減するために環境保全措置を検討し、「環境との調和へ配慮」することが事業実施の原則となっている。

環境保全措置とは、「ミティゲーション (Mitigation)」とも呼ばれ、工事による影響を緩和軽減するために講じる5つの手法である。

ミティゲーションの選定にあたっては、第一に「①. 回避」を検討し、これが困難な場合には「②. 最小化」「③. 修正」「④. 低減・軽減」の順に検討を行う。それでも工事の実施が環境に大きな影響を与えてしまう場合には「⑤. 代償」の検討を行うも

のである (図-1)。

本報では、農業用貯水池工事区域で行われた環境 調査結果や確認された動植物、設計・工事で施した 環境保全措置の効果について報告する。

#### 2. 事業概要

生田原(二期)地区は道東の山間部に拓けた畑作 や酪農を主体とした農業地帯である。農業経営規模 は近隣地域と比較して小さいため、ブロッコリー等 の野菜や花き等の収益性の高い作物を栽培しているが、かんがい期間の降水量が少ないため、用水不足 となり営農上の支障となっていた。

このため、国営かんがい排水事業を実施し、取水施設、農業用貯水池、用水施設等の建設によって農業用水を安定供給し、作物の安定生産・酪農経営の安定化を図ることを目的としている。

# 【事業概要】

・受益面積 : 約1,100ha

• 主要工事概要:取水施設/1箇所

貯水池/1箇所 用水路/4条

#### ①回避

事業の全部または一部を行わないことにより、影響 を回避する→計画段階で検討 ・事業中止、施設位置を変更

・水路の一部を保全区間として不施工

#### ②最小化

事業実施規模の制限や構造変更等により、影響を最 小化する→設計段階で検討 ・3 面張護岸から2 面護岸や片側護岸等へ変更・コンクリートから自然石等による護岸へ変更

#### ③修正

影響を受けた環境を修復・復元することにより、影響を修正する→環境回復を目的とした工事

・魚の移動路確保のため落差工に魚道を設置

・水路底部や法面の土を一時保存し、工事後に復元

#### ④低減·軽減

保護または維持活動を行うことにより、影響を低減 する→工事期間中の環境配慮

#### ・生態系拠点近傍を工事するにあたり低騒音機械を選択

・工事期間中の濁水処理対策を実施・動植物の一時移動・移植を実施

#### ⑤代償

代用的な資源や環境で置換えたり、提供することにより、影響を代償する→代替施設の工事

#### ・生態系拠点を別の場所に確保、造成

・産卵場環境を造成

図-1 一般的なミティゲーション手法(農業水利施設の場合)

# 3. 本地区の環境特性

本地区の環境特性としては、山間部を流れる清冽な河川や周辺の湿地環境、緑豊かな山林が代表的であり、豊かな自然環境のなかで、動植物が数多く生息していた(写真-1)。

事前環境調査で確認された動植物を以下に示す。



写真-1 山間部を流れる清冽な河川

#### (1)植物

貯水池建設地点としては、樹木の伐採を極力抑えるために牧草地跡が利用され、クマイザサ、シロツメクサ、アキタブキ、イネ科草本等が確認された。河畔林としては、ハルニレ、ヤチダモ、ケヤマハンノキ、ドロノキ等の高木が生育していたほか、周囲の山腹斜面は国有林となっているため、トドマツ、カラマツの大規模植林地が分布していた。

#### (2)昆虫類

コウチュウ目 (クワガタムシ、カミキリムシ)、ハエ目 (ガガンボ、アブ)、チョウ目 (セセリチョウ、アゲハチョウ)、カメムシ目 (セミ、カメムシ)、バッタ目 (キリギリス、イナゴ) 等が多く確認され、全体で200種以上の昆虫類が生息していた。

重要種としては、貯水池建設地点のプレハブ小屋 に静止していたチョウ目オオイチモンジが確認され た。

#### (3) 両生類・爬虫類

貯水池建設地点では、両生類のエゾアカガエルや 重要種のエゾサンショウウオが産卵に利用している 池が数箇所確認された(写真-2)。

なお、爬虫類は確認されなかった。



写真-2 道内では最もポピュラーなエゾアカガエル

#### (4) 魚類

取水施設を設置する河川は、サクラマス幼魚(ヤマメ)の生息河川として有名であり、秋にはサクラマス親魚が多数遡上し、自然産卵が行われている。その他、清冽な渓流を生息域とするオショロコマ、ハナカジカ等が確認された(写真-3)。



写真-3 清冽な河川に生息するオショロコマ

# (5)鳥類

森林性のヤマゲラ、アカゲラ、キビタキ、センダイムシクイ、ミヤマカケス、草原性のモズ、水辺性のキセキレイ、ミソサザイ、オオルリ等が確認された。

貯水池建設地点では、キツツキ類が利用していた と推測される巣跡が数箇所確認された。

# (6)哺乳類

山間部から平野部にかけて一般的に生息している エゾシカ、キタキツネ、エゾタヌキ、エゾユキウサ ギ、エゾヒグマ、エゾリス、イタチ類、ネズミ類が 確認された(写真-4)。

いずれの種も貯水池建設地点及び周辺の広範囲に おいて、食痕、足跡、糞等による生息痕跡が確認さ れた。



写真-4 エゾリス

以上に示したとおり、本地区には数多くの動植物が生息しており、環境省や北海道レッドデータブック等により重要種に選定されているものも含まれていた(表-1)。

表-1 事前環境調査で確認された重要種

	•
調査項目	重要種
植物	エソ゛ハリスケ゛、ヘ゛ニハ゛ナヒョウタンホ゛ク
昆虫類	オオイチモンシ゛
両生類·爬虫類	エソ゛サンショウウオ
魚類	オショロコマ、サクラマス、ハナカシ゛カ等
鳥類	エソ゛ライチョウ、オオシ゛シキ゛
哺乳類	エソ゛クロテン

# 4. 環境保全措置の内容・効果

貯水池及び関連施設を建設するためには、建設地 点の自然環境に手を加えることになる。

そこで、河川水質や生息する動植物への影響を極力抑えるとともに、影響が予測された場合には生息環境の回復のために様々な環境保全措置を施した(図-2)。

主な環境配慮としては、

- (1) 昆虫類の生息環境の保全(樹林環境を極力保 全する)
- (2) エゾサンショウウオの産卵代替池の造成
- (3) 魚類の生息環境・産卵環境の保全(移動に配 慮した河川取水施設・水質の保全)
- (4) 鳥獣の生息環境の創出(巣箱の設置) 等である。以下に各項目の環境保全措置の内容と効果について示す。

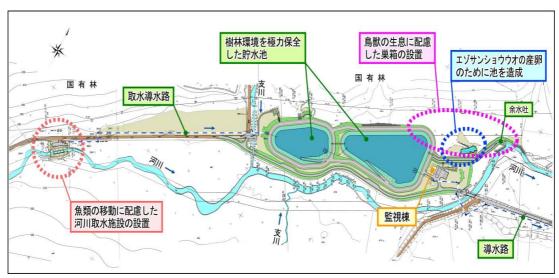


図-2 貯水池関連施設と環境配慮

# (1) 昆虫類の生息環境の保全(最小化)

貯水池建設地点には、事前調査においてチョウ類 のオオイチモンジの生息が確認されていた。

オオイチモンジは、北海道では南西部を除く山地 帯に分布しており、本州では奥日光、八ヶ岳、中部 山岳地帯に生息する珍しいチョウである。

本種は環境省レッドリストにおいて、重要種(絶滅危惧 $\Pi$ 類)に選定されている(写真-5)。



写真-5 オオイチモンジ

幼虫時代には、ヤナギ科ドロノキ等の葉を食草と し、越冬の際には食樹の枝上、幹上に食草の葉を食 い切って特異な越冬巣をつくり、この中に潜んで冬 を越す。ドロノキはオオイチモンジが生息していく 上で、とても重要な役割を担っている。

このため、貯水池設計にあたっては、ドロノキをはじめとする樹木の伐採を最小限に抑えるために、曲線を多用した地形なりの平面線形とし、影響を最小化した。また、施設や工事ヤードの配置等にも配慮した。

その結果、ドロノキの生育地は工事前には28箇所、 工事後には24箇所が確認され、若干の減少にとどめ ることができた。

オオイチモンジの生息環境を保全するためには、 本種の食草であるドロノキの保全が有効であるが、 ドロノキだけを孤立させて残すのではなく、連続し ている河畔林や樹林等の林縁部に他の樹木と混在し ていることが望ましい。このため、本地区のように ドロノキの混在した山地樹林や農耕地に接した林縁 部、河川沿いの河畔林はオオイチモンジにとって生 息や繁殖に必要な環境を提供していると考える(写 真-6)。

また、現存している生育地は概ね良好な生育状況にあり、樹高30m、胸高直径50cmほどの大径木も多く含まれていることから、シンボルツリーとして河畔のよき景観を構成している(写真-7)。

# 貯水池建設工事で保全されたドロノキ



写真-6 ドロノキ群落と山地樹林の連続性 ※明るい黄緑色の葉をつけているのがドロノキである。



写真-7 樹高30m以上の大木(中央)

# (2) エゾサンショウウオの産卵代替池造成(代償)

貯水池建設地点には、山裾の湧水を起源とした湿地や小さな池が分布していた。このような環境を生息圏としている両生類のエゾサンショウウオが事前調査で確認されているため、工事を進める場合には、湿地や池等の環境を極力残すように配慮した。

本種は環境省レッドリストにおいて、重要種(情報不足)に選定されている(写真-8)。



写真-8 エゾサンショウウオ (成体)

しかし、工事のために数箇所の産卵池が消失する ため、代償措置としてエゾサンショウウオの産卵代 替池を造成した。

代替池の水源は、湧水や沢地の流下水を利用した。 また、産卵は水辺に植生しているササや落枝等に付着させて行われるため、水辺植生の早期回復を促すために代替池の工事では水際に植生土のう積設置や枝付丸太の投入等を行い、産卵環境を創出した(図ー3、写真-9~10)。



図-3 産卵代替池概略図



写真-9 産卵代替池



写真-10 産卵代替池への枝付丸太の投入



図-4 エゾサンショウウオの成長過程

代替池工事は秋に実施し、翌年の春には産卵場と しての利用が確認された。卵塊は全て投入木に産み 付けられたものであり、工事直後の水辺植生の乏し い時期の産卵場としての有効性が確認された。

卵塊は5月上旬に約30対が産み付けられており、6月上旬には孵化が始まり、8月下旬には前肢及び後肢ともに生えそろい、間もなく陸上生活に移行する状態であった(図-4)。

# (3) 魚類の生息環境・産卵環境の保全

# ① 取水施設の構造(最小化)

河川を代表する魚種は、サクラマス幼魚(ヤマメ)であり、秋にはサクラマス親魚が多数遡上し、自然 産卵が行われていた。

河川取水施設の建設にあたっては、遡上降海の移動を妨げないために、集水管を地下に埋設する集水埋渠方式を採用し、影響を最小化した。

また、河川を横断する帯工や隔壁には、渇水期に おいても魚類の遡上に影響がないように切欠きを設 けた。さらに、護岸工には水際における魚類の生息 環境に配慮するとともに、周辺景観との調和に配慮 して自然石を利用した(図-5、写真-11)。



写真-11 取水施設

# ② 河川水質の保全(低減・軽減)

無類の生息環境に配慮するためには、河川水質を保全することも重要である。このため、貯水池掘削工事の際には、濁った水を直接河川に流さないように濁水処理施設を設置し、影響を低減した。

また、貯水池建設工事前・工事中・工事後には水質調査を定期的に実施し、工事の進捗による河川水質の変化を把握した。

「水産用水基準(社)日本水産資源保護協会」では、河川におけるサケマス類の自然繁殖・生息条件の水質を定めているため、分析結果と基準を比較した(図-6~9)。

水質調査結果から、分析項目によっては調査年度 により多少の変動は見られるが、工事前の水質が工

項目	集 水 埋 渠 方 式		
構造及び特徴	・河床下に集水管を埋設し、集水管の周辺にフィルター層を配置する。		
	・河床上に施設が現れないため、魚類の生息環境に与える影響が少ない。		
	・上下流河川断面との連続性が保たれる。		
取水方式	・河床からの浸透水を、集水管より取水する。		
環境配慮	・河床上に施設が現れないため、魚類の遡上降海に影響は少ない。		
	・帯工や隔壁に切欠きを設け、魚類の遡上降海を促す。		
	・護岸に自然石を利用した。		
概観	#I		

図-5 取水施設

事中・工事後も維持されていた。また、水産用水基 準から見た場合も、工事進捗や工事完了に影響を受 けることなく、良好な水質が維持されていることが 分かった。

# [BOD]

生物化学的酸素要求量のことであり、微生物によっ て水中の有機物が分解されたときに消費される酸素 量を指す。サケマス類の自然繁殖条件としては、2 mg/L以下が良いとされている。

調査結果から、工事前・工事中・工事後は、0.5 ~1.1mg/Lの値を示しており、基準を満たしていた。

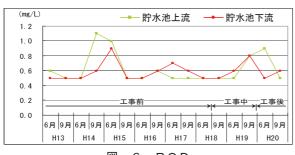
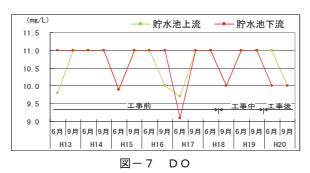


図-6 BOD

#### [DO]

水中に溶けている溶存酸素量を指す。サケマス類 の生息条件としては、7mg/L以上が良いとされて いる。

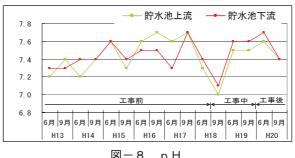
調査結果から、工事前・工事中・工事後は、9.1 ~11.0mg/Lの値を示しており、基準を満たしていた。



#### [Hq]

酸性かアルカリ性かを表す水素イオン濃度を指す。 魚類の生息条件としては、6.5以上~8.5以下が良い とされている。

調査結果から、工事前・工事中・工事後は、7.0 ~7.7の値を示しており、基準を満たしていた。



Ha 8 - 図

#### [SS]

水中に浮遊している懸濁物質量を指す。魚類の生 息条件としては、忌避行動等の反応を起こさせる原 因とならないように、25mg/L以下が良いとされて

調査結果から、工事前・工事中・工事後は、1.0 ~3.0mg/Lを示しており、基準を満たしていた。

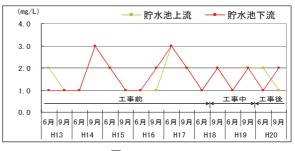
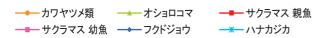


図-9 SS

### ③ 魚類調査

貯水池下流(余水吐付近)と貯水池上流(河川取 水施設付近)で行った魚類調査結果から、工事前・ 工事中・工事後を問わず、サクラマス幼魚が優占的 に生息していた。生息密度も全期間を通じて0.7~ 1.0尾/㎡程度あり、非常に高い値を示していた。そ の他、サクラマス親魚、オショロコマ、フクドジョ ウ、ハナカジカ等の清冽な流れの渓流を生息域とし、 砂礫底に産卵を行う魚類が多く生息していた(図ー 10~11、写真-12)。

また、水質調査の結果からもサケマス類の自然繁 殖・生息条件に適合した水質が維持されており、本 河川はサクラマスをはじめとした、サケ科魚類の再 生産場として良好な環境が保たれていた。



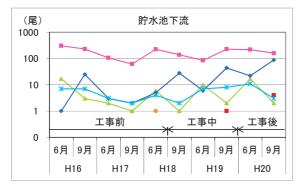


図-10 魚類採捕数の推移(貯水池下流)



図-11 魚類採捕数の推移(貯水池上流)

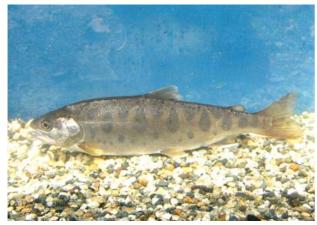


写真-12 優占的に生息していたサクラマス幼魚

#### ④ サクラマスの産卵床調査

河川取水施設上流から貯水池下流までの約2km区間において、工事前・工事後のサクラマス産卵床調査を行った。

サクラマス親魚は $5\sim6$ 月に海から川に遡上し、 秋まで河川内で過ごして成熟し、産卵期を迎える。 この頃は、婚姻色の紅斑が鮮やかになる(写真-13)。



写真-13 婚姻色鮮やかなサクラマス親魚(雄)

本種の産卵床は、長さ $1.2\sim2$  m、幅 $0.6\sim1$  mの大きさで、水深は $0.1\sim0.45$  m、流速は $0.15\sim0.6$  m / s、底質は礫4 c m m の範囲にあり、河川水が良く浸透する淵から瀬に移る淵尻に造られることが多い(図-12、写真-14)。

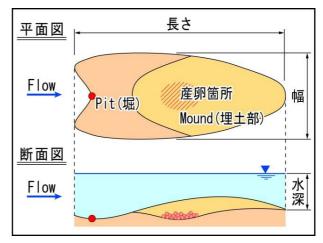


図-12 産卵床概略図

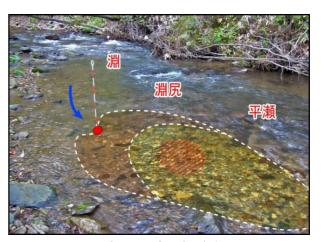


写真-14 産卵床の概観

産卵床調査結果から、工事前・工事後の産卵床数は多少の変動が見られるが、工事進捗や工事完了に影響を受けることなく、40~50箇所の産卵床が確認された(図-13~15)。

また、工事後の調査では河川取水施設の上流域に も産卵床が分布していることから、取水施設の設置 によって魚類の遡上降海に影響を与えていないこと が分かった(図-15)。

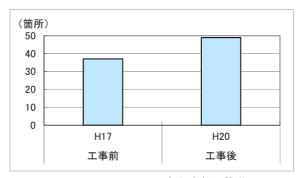


図-13 サクラマス産卵床数の推移



図-14 工事前のサクラマス産卵床分布位置



図-15 工事後のサクラマス産卵床分布位置

#### (4) 鳥獣の生息環境の創出(代償)

貯水池建設地点には、豊かな森林環境が分布して おり、このような環境を主な生活圏としている鳥獣 が確認されている。このため、工事を進める場合に は、樹木の伐採を最小限に抑えるように配慮した。

しかし、伐採が避けられない樹木の中にキツツキ 類の古巣が数箇所確認された。キツツキ類の古巣は、 樹洞で繁殖を行う樹洞営巣性鳥類のシジュウカラ、 ヤマガラ等の鳥類のほか、アオダイショウ等の爬虫 類、エゾモモンガ等の哺乳類が、ねぐらや営巣のた



写真-15 巣箱の設置

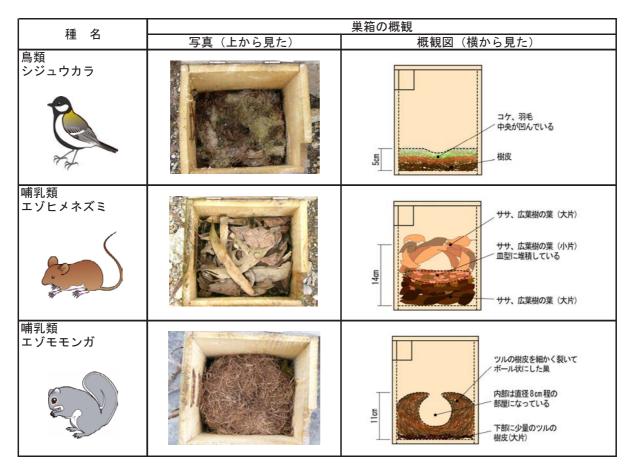


図-16 巣箱の利用状況

めに二次利用することが知られているため、代償措置として巣箱を設置した(写真-15)。

工事完了直後の調査であったが、7箇所に取付けた巣箱のうち約半数の3箇所が利用されており、巣箱設置の有効性が確認された(図-16)。

シジュウカラの巣材として利用されていた主な材料はコケ類であり、下部から産座まで積み上げられていた。厚さは約5cmで標準的な大きさであった。

エゾヒメネズミの巣材にはササや広葉樹の葉が利用されており、皿形の巣が造られていた。

エゾモモンガのねぐらは、ツル植物の樹皮を糸状に切り裂いた後、球状に組んだものであり、内部は直径8cm程度の部屋になっていた。また、巣箱の穴にはエゾモモンガの噛み跡が残されており、巣箱への出入りがし易いように穴が広げられていた。

#### 5. おわりに

今回報告した樹林環境の保全、エゾサンショウウオの産卵代替池、魚類の移動に配慮した河川取水施設、巣箱の設置等の環境配慮は、当初想定していた効果を発揮しており、「環境との調和へ配慮した農業農村整備事業」が実現できたと考える。

ただし、自然生態系の成り立ちは複雑であるため、 予期しない生態系の変化や減退が引き起こる可能性 もある。このため、経年変化の状況を適宜観察して いく必要があると考える。

最後に、本報の報告にあたり、発表の機会を与えていただくとともに、多大なるご協力をいただいた関係各位に深くお礼を申し上げる。

(北王コンサルタント㈱)

# 報 文 集 第25号

平成25年9月30日

編 集 (一社)北海道土地改良設計技術協会

広報委員会 明田川洪志・松﨑 吉昭・館野 健悦・福田 正信 林 嘉章・古田 彰・平山ちぐさ・山岸 晴見 源 秀夫

発 行 (一社)北海道土地改良設計技術協会 〒060-0807 札幌市北区北7条西6丁目NDビル8階

電 話 (011)726-6038 FAX (011)717-6111

印刷 ㈱三誠社 電話 (011)622-9211



# ●表紙写真●

第27回「豊かな農村づくり」写真展 北の農村フォトコンテスト応募作品

# 「厳冬期の石狩川頭首工」 - 月形町-

山平 一夫 氏 作品

# AECA

Agricultural Engineering Consultants Association