

報文集

平成23年度

第23号

社団法人 北海道土地改良設計技術協会

報文集 第23号 目次

パイプライン附帯施設（弁室）における結露現象について.....	1
	藤本嘉三・伊東啓人
用水路の基礎杭破損に対する原因特定調査検討.....	13
	源田和隆
偏光顕微鏡によるコンクリート内部の劣化状況の調査.....	19
	榎克晴・中川慎司
雪を利用した農産物貯蔵システムの研究（その2）.....	25
	川瀬智久
頭首工における魚道施設の機能評価.....	35
	田中宏征
連結ブロックの健全度評価手法.....	43
	菅睦三

パイプライン附帯施設（弁室）における結露現象について

藤本 嘉三・伊東 啓人

はじめに

パイプライン施設において、附帯施設の弁室に滞水していることがある。弁室の滞水は、維持管理上の支障となり、弁類の性能低下を早める恐れがあり、その要因解明と保全対策検討が必要である。本調査は、ストックマネジメント高度化事業の一環として、オホーツク地方のパイプラインの機能診断調査により、弁室の一部で確認された滞水について、特に結露による滞水の可能性について調査を行い、滞水の要因解明と調査手法の有効性及び対策提案を行った事例を紹介する。

1. 対象施設の概要

1-1 地域特性

対象地域は、透水性の高い土質や、地下水位の高い土質が分布する。地形条件は、高地に位置する路線や、段丘部・低平地に位置する路線など様々である。また、気候条件は少雪で寒暖差が大きいことが特徴的である。

1-2 施設の構造

滞水状況調査の対象施設は、昭和60年代から平成10年代にかけて造成された畑地かんがい用のパイプラインの附帯施設（弁室タイプ）であり、施工から5～20年余りを経過していた。

弁室構造は、大きく分けて以下の3種類に分類される。

Aタイプ：頂底板分離型

Bタイプ：頂底板分離型(本管巻立てタイプ)

Cタイプ：頂版分離・底板一体型

A・Bタイプは、頂・底板スラブと側壁が構造上分離しており、連結プレートとボルトで接続されている。接続部部分には水膨張性止水ゴムが設置され、止水性を確保する構造となっている。

Cタイプは、頂版スラブのみが側壁と構造上分離しており、連結プレートとボルトで接続されている。接続部部分にはA・Bタイプと同様に水膨張性止水ゴムが設置され、止水性を確保する構造となっている。

1-3 対象施設の選定

過年度（平成20～21年）に実施された機能診断調査結果において、滞水が確認されていた弁室を対象に現地目視調査を行い、その結果から滞水要因を推定した。滞水要因の推定にあたっては以下の項目に留意して行った。

- 弁室内部の浸水跡の有無と位置
- 弁室内部のひび割れや管体継手等からの漏水の有無
- 弁室施工からの浸水速度（浸水深）
- 弁室内の結露状況
- 地形条件

滞水要因の推定結果より、本地域における滞水要因は、ひび割れや管体継手等からの漏水が確認されなかったことから、①結露、②その他（水平打継目等からの地下水浸入等）と判断された。

これを基に、本地域での弁室を滞水要因毎に分類し、図-1のようにグルーピングを行った。

本報告は、滞水要因の代表的な弁室として抽出した6施設を対象に、詳細な現地調査を実施し、その

調査結果に基づき滞水原因の解明を行ったものである。

各弁室の諸条件は表-1に示すとおりである。

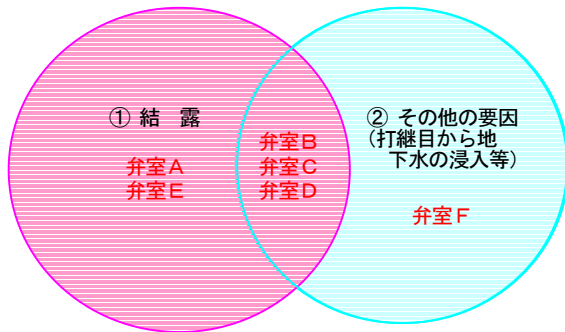


図-1 滞水要因によるグルーピング

また、詳細調査対象の弁室の抽出は、下記事項に配慮した。

- 各滞水要因が主体と判断される弁室から各々1施設以上（滞水原因の究明）
- 計測機器の設置が可能な弁室規模
- アクセス容易性（各種機器の設置、定期目視調査及びデータ回収等の安全性・用地確保）
- 地下水位観測孔の設置が可能（車両乗り入れとボーリング孔のスペース）

2 現況調査

2-1 調査方法

弁室の滞水状況の調査は、想定される浸水要因を勘案し、以下の項目について調査を行った。

- 地下水位観測（計測間隔：1時間）

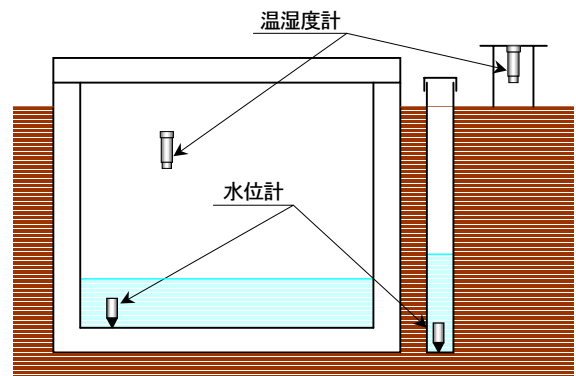


図-2 観測機器の配置

調査対象施設周辺の地下水位と弁室内水位、及び降雨との関係を把握する目的で行った。地下水位観測孔にロガー付水位計を設置し、弁室周辺の地下水位の変動状況を観測した。

- 弁室内水位観測（計測間隔：1時間）

降雨その他の影響による、地下水位の変化と、弁室内水位の関係を把握することを目的として行った。調査対象施設の弁室内にロガー付水位計を設置し、弁室内水位の変動状況を観測した。（最低計測標高は弁室基礎程度）

- 気温・湿度観測（計測間隔：1時間）

弁室内の水位変動と結露の関係を把握する目的で行った。結露の発生は、弁室内温度に対応する飽和水蒸気量の変化と、弁室内空気に供給される外気に含まれる水蒸気量との関係により発生することから、弁室内及び弁室外にロガー付温湿度計を設置し、気温及び湿度を観測した。

表-1 調査対象弁室一覧表

項目	単位	弁室 A	弁室 B	弁室 C	弁室 D	弁室 E	弁室 F
設置施設		制水弁	空気弁、制水弁	制水弁、分岐工	排泥弁	制水弁、分岐工	排泥弁
施工年度		H14	H13	H14	H12	H10	H11
経過年数	(年)	8	9	8	10	12	11
弁室内水深	過年度	(m) 0.55	1.10	0.90	2.00	0.85	5.63
	今回	(m) 0.60	1.60	1.12	3.13	0.92	7.20
弁室規模(内空)	長さ	(m) 3.70	2.75	3.36	4.20	4.50	1.50
	幅	(m) 4.60	5.50	5.11	4.20	4.10	1.80
	高さ	(m) 6.50	4.10	4.11	6.00	3.90	7.60
	空容量	(m ³) 111	62	71	106	72	21
弁室構造形式		Cタイプ	Aタイプ	Aタイプ	Aタイプ	Aタイプ	Cタイプ
地形条件		高位部	段丘高位部	低位部	低位部	段丘高位部	低位部沢地

※ 断熱材の有無:頂版~有り、側壁~なし(全弁室共通)

表－2 滞水原因の類型区分基礎表

弁室名称		弁室 A	弁室 B	弁室 C	弁室 D	弁室 E	弁室 F
水位 状況 (m)	水替え直後	0.04	0.07	0.03	0.06	0.01	0.03
	観測終了時	0.06	0.15	0.29	0.47	0.08	3.71
	水位上昇量	0.02	0.08	0.26	0.41	0.07	3.68
滞水状況	観測期間を通じて、微小ではあるが継続的に水位上昇が見られる。	まとまった降雨時に若干の水位上昇が見られる。	まとまった降雨時に水位上昇が見られる。	まとまった降雨時に水位上昇が見られる。	観測期間を通じて、微小ではあるが継続的に水位上昇が見られる。	常に弁室周辺の地下水位が高く継続的に水位上昇が見られる。	
滞水推定要因	結露	水平打継目等からの浸透および結露	水平打継目等からの浸透および結露	水平打継目等からの浸透および結露	結露	水平打継目等からの浸透および結露	

●降雨量観測（1時間データ）

降雨量は近傍アメダス地点の観測値を用いた。

●目視調査（1月/回）

弁室周辺及び弁室内において、結露、地表水の浸水状況、継目からの浸入状況、滞留水の濁度等について目視調査を行った。

2-2 調査結果

結露が主要因と判断された弁室A及び弁室Eの調査結果を以下に示す。

なお、7月上旬における弁室水位の大幅な低下は、弁室内部の目視調査のためのポンプ排水の結果である。（弁室E：7/8、弁室A：7/7）

(1) 弁室A調査結果

- ① 図-3より、地下水位は、降雨時の一時的な上昇を除き、観測されなかった。（弁室基礎より低い。）
- ② 打継目等からの浸入は見られなかった。
- ③ 観測期間を通じて、極めて微小ではあるが継続的に弁室内水位が上昇している。
- ④ 弁室内水位は、降雨による上昇傾向は見られない。
- ⑤ 弁室内目視調査より、側壁及び頂版の断熱材に水滴が確認され（写真-1）、側壁の水滴は底版へと落下していた。（弁室Eも同様）

(2) 弁室E調査結果

- ⑥ 図-4より、地下水位は、常に弁室内水位より高く、降雨の影響で一時的に上昇している。
- ⑦ 弁室内水位は、降雨による上昇傾向は見られ

ないものの、観測期間を通じて極めて微小ではあるが継続的に上昇している。

- ⑧ 9月下旬から10月末の期間に地下水位の低下が見られるが、弁室内水位の上昇傾向には変化が見られない。

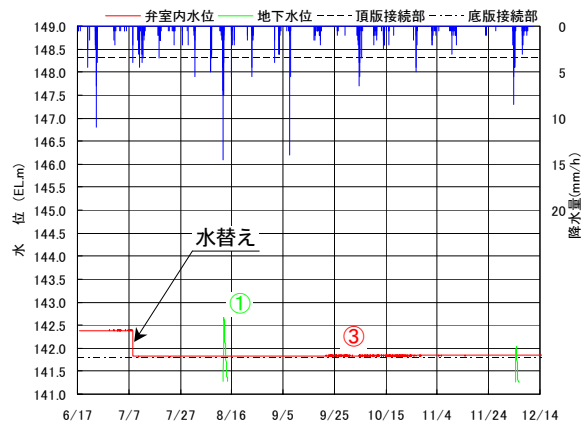


図-3 弁室A 観測データ経時変化図

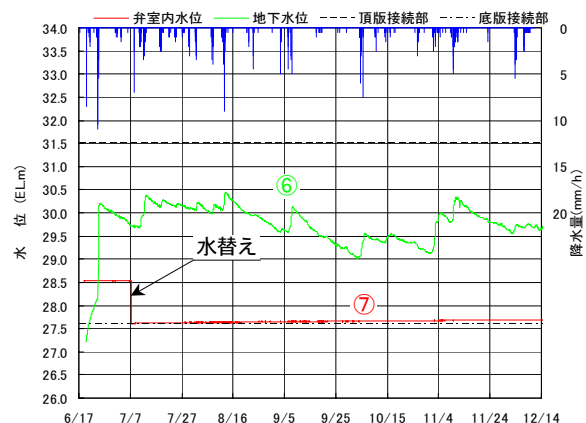


図-4 弁室E 観測データ経時変化図



写真-1 弁室A 側壁と頂版断熱材の状況

3 滞水原因の解明

3-1 滞水原因の類型区分

パイプラインの附帯施設である弁室の滞水原因推定にあたり、施設及びその周辺、漏水痕跡の現地調査（目視調査・概略測量調査）より、変状等を整理して共通項を抽出した。

更に、弁室内水位、地下水位の計測データ及び近傍アメダスの雨量観測データを時系列に整理し、現地調査結果と合わせて滞水原因を考察した。

現地調査及び計測データによる考察より、弁室の滞水原因は、以下の類型区分（原因パターン）のとおりに特定した。（表-3）

<滞水原因の類型区分（原因パターン）>

- ・パターン1：結露
- ・パターン2：水平打継目等からの浸透

表-3 滞水原因の類型区分

類型区分	滞水要因		該当施設 (主たる要因別)
	主要因	他要因	
パターン1	結露	-	弁室A、弁室E
パターン2	水平打継目等からの浸透	結露	弁室B、弁室C 弁室D、弁室F

以降において、全弁室の滞水要因となっている結露について、滞水状況の解明を行った。

3-2 対象施設における結露のメカニズム

(1) 結露の種類・区分

結露は、下記のとおり、見える部分と見えない部

分という区分で“表面結露”と“内部結露”に区分される。また、建物内外の気温や湿度の相対的な関係に特徴付けられる季節による区分として、“夏型結露”と“冬型結露”に分けられる。¹⁾

【表面結露と内部結露】

壁体の表面で湿り空気中に含まれる水蒸気が凝縮し、液体になるのが表面結露で、材料の内部で水蒸気が凝縮し、液体になるのが内部結露である。

【冬型結露と夏型結露】

冬型結露は、室内空気が露点以下の冷たい部分に触れることにより発生する。夏型結露は、外気に含まれる多量の水蒸気が、屋内の低温部分に触れることによって発生する。

梅雨時は水蒸気が飽和状態になり、気温が20℃前後で高湿状態にあるので15℃前後の物体には結露する。しかも外気に含まれる水蒸気量が多いだけ、一旦発生すると冬の結露よりはるかに液水の量が多くなる。

(2) 結露のメカニズム

弁室の結露は、弁室内に比して高温で多湿（相対湿度の高低ではなく水蒸気量が多いこと）な外気から供給された水蒸気が、弁室内の側壁等で露点温度まで冷やされることにより、その表面に発生する。（図-5）

※ 露点温度とは、水蒸気を含む空気を冷却したとき、凝結が始まる温度をいう。具体的には、相対湿度が100%の場合は現在の温度がそのまま露点温度である。

相対湿度とは、ある温度の空気が含んでいる水蒸気量（水蒸気圧）の、表-4に示す飽和水蒸気量（飽和水蒸気圧）に対する割合をいい、下式により求められる。

$$\text{相対湿度(\%)} = \frac{\text{その気温の水蒸気量}}{\text{その気温での飽和水蒸気量(既知)}} \times 100$$

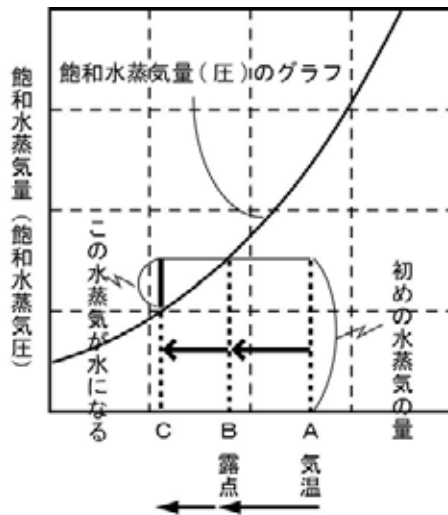


図-5 結露のメカニズム概念図

表-4 温度と飽和水蒸気量(圧)

温度 (°C)	飽和水蒸気量(圧)		温度 (°C)	飽和水蒸気量(圧)	
	(g/m ³)	(hPa)		(g/m ³)	(hPa)
0	4.8	6.10	20	17.3	23.38
1	5.2	6.56	21	18.3	24.86
2	5.6	7.05	22	19.4	26.43
3	5.9	7.57	23	20.6	28.08
4	6.3	8.08	24	21.8	29.83
5	6.8	8.72	25	23.0	31.67
6	7.3	9.34	26	24.4	33.60
7	7.8	10.01	27	25.8	35.64
8	8.3	10.72	28	27.2	37.79
9	8.8	11.48	29	28.8	40.04
10	9.4	12.28	30	30.4	42.41
11	10.0	13.10	31	32.0	44.92
12	10.7	14.02	32	33.8	47.53
13	11.4	14.97	33	35.7	50.32
14	12.1	15.98	34	37.6	53.18
15	12.8	17.05	35	39.6	56.22
16	13.6	18.17	36	41.7	59.39
17	14.5	19.37	37	43.9	62.74
18	15.4	20.63	38	46.2	66.23
19	16.3	21.97	39	48.6	69.90

(3) 結露量の算定例

20°C相対湿度50%の空気が5°Cまで冷やされたときの結露量を求めてみる。

温度20°Cの飽和水蒸気量(相対湿度100%)は、表-4より17.3 g/m³であるから、温度20°C相対湿度50%の空気の水蒸気量は、

$$17.3 \text{ g/m}^3 \times 50\% = 8.65 \text{ g/m}^3$$

同様に、5°Cの空気が持てる水蒸気量(飽和水蒸気量)は表-4より6.80 g/m³であるから、結露量 v_i は、

$$v_i = 8.65 - 6.80 = 1.85 \text{ g/m}^3$$

となる。

ある時間(又は日数)の結露総量 V_i は、結露量 v_i に通気量 q_i (m³)を乗ずることにより求められる。

すなわち、

$$V_i = v_i \times q_i$$

結露期間全体の結露総量 V は、上式の累計値

$$V = \sum V_i = \sum_{i=1}^n v_i \times q_i$$

となる

上式より、結露の絶対量は、「結露量」、「通気量(換気回数)」、「結露期間」がこれを決定づけ、その規模・期間は弁室の気密性(隙間量~通気孔の規模(開口面積))と断熱性が大きな影響をもつと考えられる。

(4) みかけ結露量の算定

結露量(g/m³)は、外気温・湿度と弁室内温度から算定することができるが、結露時間(一定時間(期間))における結露総量を算定するには、「すきま量」を把握する必要がある。

しかし、これには通常、気密性試験が必要である。今回、気密性試験は行っていないため、弁室内の水位上昇量からみかけ結露量(g/m³)を逆算して求め検証を行う。

みかけ結露量(g/m³)は、弁室水位上昇から求めた結露総量(g)を弁室空容量(m³)で除した単位空容量当りの値である。

なお、弁室B、弁室C、弁室Dなどの降雨の影響により水位が上昇する弁室については、その期間の水位上昇量を除いた値を採用し、結露量を算定した。弁室Fにおいては、地下水の影響により常時水位上昇が見られ、結露量の算出が困難であったため対象外とする。

また、弁室内の水位変化は、頂版下面や側壁に結露した水滴が落下した結果として生ずる現象であり、結露してから水滴が落下するまでに時間差が生じる。結露が弁室の水位変化として現れるまでには時間差があるため、結露の算定期間は十分な時間間隔をとった方が妥当である。分析の目的と現象面から考え算定は半旬平均値を用いることとした。(表-5)

表－5 弁室水位変化にもとづく結露算出一覧表

期 間	弁室A (通気孔無)		弁室B (通気孔有)		弁室C (通気孔有)		弁室D (通気孔無)		弁室E (通気孔無)	
	弁室水位 (m)	結露量 (g/m ³)	弁室水位 (m)	結露量 (g/m ³)	弁室水位 (m)	結露量 (g/m ³)	弁室水位 (m)	結露量 (g/m ³)	弁室水位 (m)	結露量 (g/m ³)
7/11-15	0.039	0	0.077	0	0.031	0	0.060	—	0.004	0
7/16-20	0.040	155	0.080	746	0.031	0	0.060	—	0.006	514
7/21-25	0.039	0	0.078	249	0.033	491	0.059	—	0.011	1,799
7/26-31	0.041	309	0.080	747	0.034	736	0.060	168	0.013	2,314
8/ 1- 5	0.044	773	0.082	1,244	0.034	736	0.062	504	0.015	2,829
8/ 6-10	0.043	619	0.083	1,493	0.034	736	0.063	672	0.016	3,086
8/11-15	0.043	619	0.083	1,493	0.036	1,227	0.063	672	0.017	3,344
8/16-20	0.045	928	0.085	1,991	0.038	1,718	0.065	1,009	0.018	3,601
8/21-25	0.046	1,083	0.088	2,739	0.041	2,455	0.065	1,009	0.021	4,375
8/26-31	0.046	1,083	0.089	2,988	0.040	2,210	0.065	1,009	0.023	4,890
9/ 1- 5	0.047	1,237	0.091	3,487	0.042	2,701	0.067	1,345	0.022	4,633
9/ 6-10	0.047	1,237	0.092	3,737	0.038	1,719	0.068	1,514	0.023	4,891
9/11-15	0.046	1,083	0.092	3,737	0.035	983	0.069	1,682	0.022	4,633
9/16-20	0.048	1,392	0.091	3,487	0.036	1,228	0.068	1,514	0.022	4,633
9/21-25	0.052	2,012	0.089	2,989	0.041	2,457	0.068	1,514	0.027	5,924
9/26-30	0.052	2,012	0.090	3,238	0.044	3,195	0.070	1,850	0.026	5,666

(5) 対象施設における結露の種類・区分

対象施設の構造及び現地調査による目視や温度、湿度等の計測の概要は以下のとおりである。なお滞水原因が結露のみと判断される弁室Aの観測データ経時変化図を図－6に示す。

回観測された期間での結露は“夏型”の“表面結露”であると判断される。

- ① 6月から9月にかけて結露が要因と考えられる弁室内の水位上昇が確認された。10月以降は結露と考えられる水位上昇はほとんどない。
- ② 弁室の内外における温度及び湿度（相対湿度）の計測より、6月から9月の温度は、常に弁室外に比べて弁室内が低く推移している。
- ③ 同期間の湿度は、弁室外が70～100%に比し、弁室内はほぼ100%で推移しており、水蒸気は飽和状態にあった。
- ④ 6月から9月における弁室内の温度は、弁室外の空気（湿り空気）に対して露点温度以下となっており、弁室外から移動してきた水蒸気は、側壁などの表面で結露として現れる。10月以降は、この関係がほぼ逆転する。
- ⑤ 上記③④より、主として6月から9月の期間に結露が多いと考えられる。

結露に関係するこれらの特徴から、対象施設の今

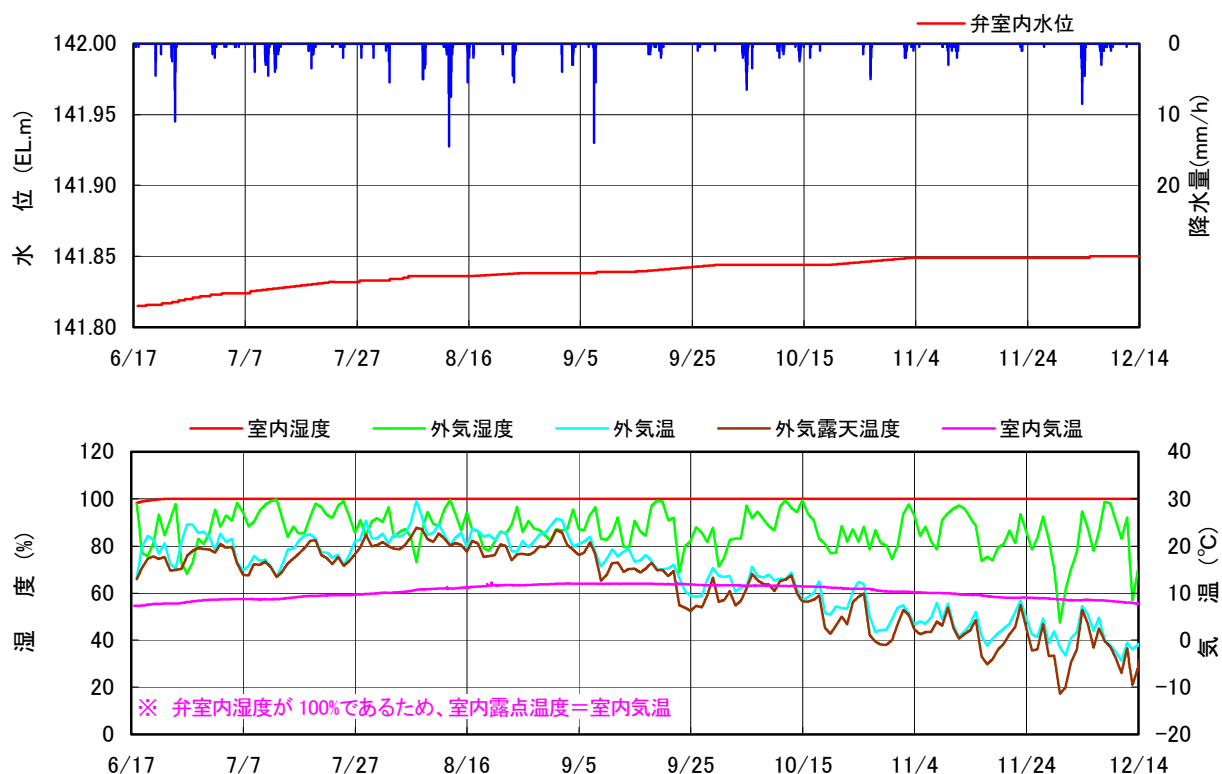


図-6 弁室A観測データ経時変化図

3-3 諸量観測値と結露量との関係分析

先述のとおり、弁室内水位を上昇させる結露の供給源は外気に含まれる水蒸気と判断される。

水蒸気は、水蒸気量（圧）の多い（高い）方から少ない（低い）方へと移動するため、結露による弁室水位の上昇は、気温・湿度の観測結果から、外気の水蒸気量が弁室内の水蒸気量を上回る6月から9月の期間に多くなることが予想される。

対象施設（弁室A～E）における弁室内外の気温と湿度の観測値に基づき、弁室内水位の観測値から推定したみかけ結露量と弁室内外の水蒸気量差との回帰分析を行った。

なお、弁室の結露量増加が予想される6月から9月の湿度（相対湿度）は、いずれの施設も弁室内はほぼ100%、外気も80～100%と高く推移することを踏まえ、上記に加えて、みかけ結露量と弁室内外の気温差との回帰分析を行い、水蒸気量差との関係分析と比較することにより、気温のみから結露量を推定する場合の妥当性（精度）について検証した。

(1) 弁室内外の水蒸気量差及び気温差と結露量の関係分析

外気から弁室内に移動する可能性のある水蒸気量の最大値として、外気と弁室内との水蒸気量差を求め、みかけ結露量との関係について、水蒸気量差とみかけ結露量の半旬値の積算値を用いて一次回帰分析を行った。

なお、水蒸気量差は、弁室内外の気温と湿度の観測値からそれぞれ半旬平均値を算出し、以下の算定式より求めた。

$$\begin{aligned} \text{水蒸気量差} [g/m^3] &= \text{外気水蒸気量} [g/m^3] - \text{弁室内水蒸気量} [g/m^3] \\ \text{水蒸気量} [g/m^3] &= \text{飽和水蒸気量} [g/m^3] \times \text{相対湿度} [\%] / 100 \\ \text{※ 飽和水蒸気量} [g/m^3] &\text{は表-4より} \end{aligned}$$

分析結果を図-7・8及び表-6・7に示す。いずれの施設も弁室内外の水蒸気量差及び気温差と結露量との間には正の相関関係が認められ、相関係数は高い値を示す。

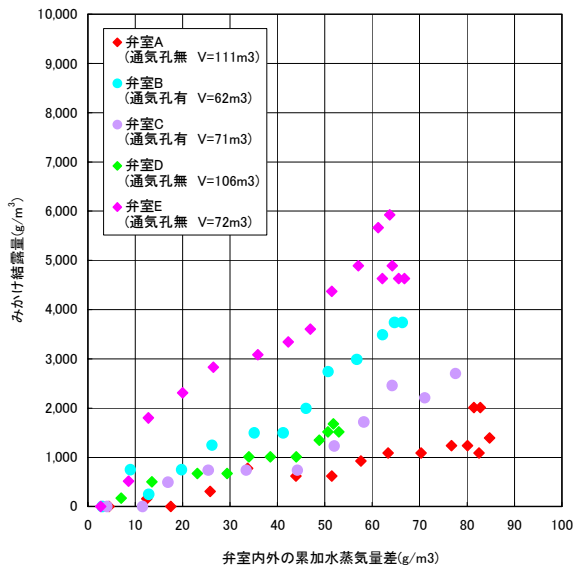


図-7 弁室内外の水蒸気量差と結露量の関係図

表-6 弁室内外の水蒸気量差と結露量の相関式

施設名	関係式	相関係数	通気管	備考
弁室A	$Y=17.389X$	0.897	無	結露量最大
弁室B	$Y=51.873X$	0.967	有	
弁室C	$Y=30.348X$	0.939	有	弁室Dと同程度
弁室D	$Y=28.277X$	0.964	無	
弁室E	$Y=81.250X$	0.952	無	結露量最小

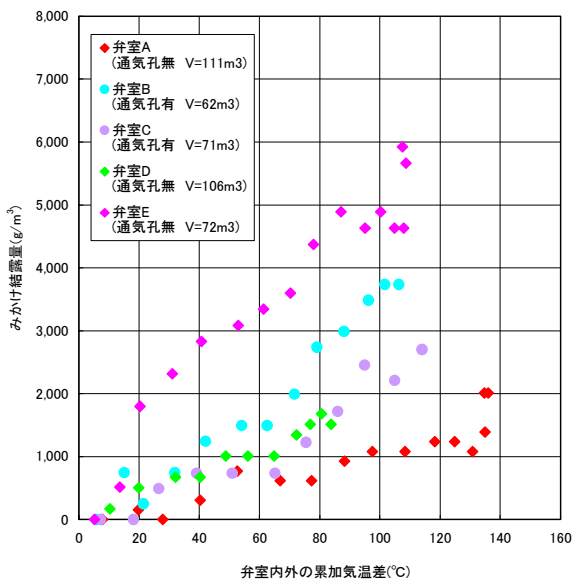


図-8 弁室内外の気温差と結露量の関係図

表-7 弁室内外の気温差と結露量の相関式

施設名	関係式	相関係数	通気管	備考
弁室A	$Y=11.080X$	0.914	無	結露量最大
弁室B	$Y=33.152X$	0.969	有	
弁室C	$Y=20.523X$	0.937	有	弁室Dと同程度
弁室D	$Y=18.851X$	0.973	無	
弁室E	$Y=51.209X$	0.956	無	結露量最小

弁室内外の気温差(=外気温-弁室内気温)を時系列に整理したものが図-9である。気温が高い8月までは、気温差が大きく、9月以降、徐々に気温差が小さくなっている。なお、弁室の通気管の有無(通気管有~弁室B・弁室C)による、弁室内外の気温差に明瞭な差異や傾向は見られない。

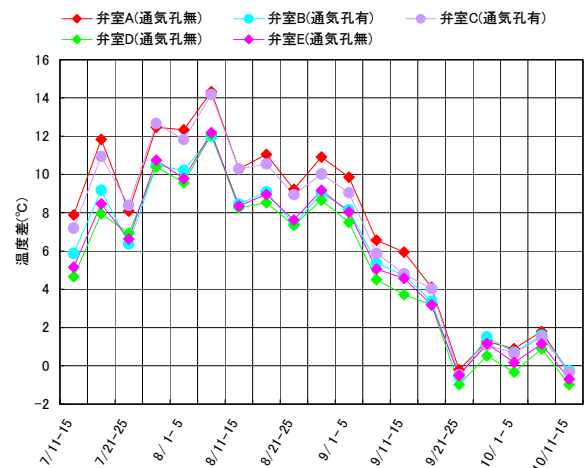


図-9 弁室内外の気温差と通気孔の有無

(2) 弁室規模と結露総量との関係分析

次に、弁室規模と結露総量との関係について分析を行った。(空容量、側壁面積、頂版面積、弁室深さの4ケース)

各ケースとも弁室規模が大きいほど、結露総量も多くなる傾向が見受けられるものの、データ数が少ないこともありその関係は明瞭ではない。

また、通気孔の有無による結露量との関連性は認められなかった。

図-10に弁室空容量と結露総量との検討結果を示す。

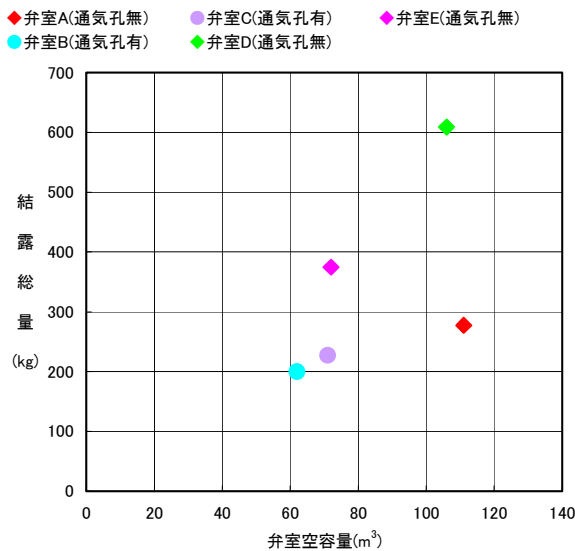


図-10 弁室空容量と結露総量の関係

3-4 結露による滞水状況の推定

前述のように、みかけ結露量と弁室内外の気温差には有効な相関関係があることが検証された。

この相関関係に基づき、気温の観測データから得られる弁室内外の温度差（累加）より、結露量を求め、その結露量を水深に換算することで、弁室の滞水状況の概略推定が可能となる。

各弁室の外気温と近傍アメダス地点の気温（半旬平均値）との関係を整理した結果、いずれの施設もアメダス地点と正の相関関係が認められ、アメダス地点の気温から本式を用いて外気温の推定が可能と判断される。（表-8）

弁室内気温に関しては、地温の影響を受けて変動していると思われ、弁室毎の観測値に差が認められた。（6月下旬に最大5℃程度）

従って、弁室内気温のみを計測することで弁室の滞水状況の推定が可能と判断される。

表-8 近傍アメダス地点気温との関係

施設名	関係式	相関係数
弁室A	$Y=1.0498X-0.93$	0.999
弁室B	$Y=1.0512X-0.53$	0.999
弁室C	$Y=1.0636X-0.82$	0.998
弁室D	$Y=1.0854X-1.66$	0.996
弁室E	$Y=1.1100X-1.78$	0.995

4 調査手法の有効性と課題

滞水が確認されていた弁室を対象に現地目視調査を行った結果、滞水要因を地表水の浸入、地下水の浸入及び結露と判断した。

本調査では、滞水要因の一つと判断された結露について、結露現象の検証、結露過程の解明を目的に、対象弁室内の温湿度・水位計測、及び弁室外の温湿度計測を行った。

4-1 調査手法の有効性

弁室内外の気温及び湿度、弁室内水位の観測データより、結露の発生メカニズムと結露過程について検証した。

- ① 地下埋設物である弁室の内部は外気温との温湿度差があり、夏期には高温の外気の浸入により低温の弁室内（側壁・頂版）で露点温度以下になると結露し、その水滴の落下により滞水を生じさせる。
- ② 結露量は、弁室内外の気温と湿度と通気量に支配されるが、弁室内水位から逆算したみかけ結露量と気温差（＝弁室外気温－弁室内気温）との関係分析により、良好な相関関係が認められた。
- ③ この気温差の蓄積に伴ってみかけ結露量が増加する関係が認められた。（結露過程の検証）
- ④ また、弁室外気温と近傍アメダス地点の気温（半旬平均値）とは、いずれの弁室も良好な相関関係であることが検証され、アメダス地点の気温から各弁室の外気温の推定が可能である。
- ⑤ この結果、弁室内気温のみを計測することで結露による滞水状況の推定が可能となった。

以上のように、本調査で行った、温湿度計による弁室内外の気温及び湿度の計測は、結露現象の検証及び結露過程の解明の調査手法として有用と考えられる。

4-2 対策に向けた提案とモニタリングの必要性

既存の弁室には、頂版下面に断熱材が貼り付けられているものの、コンクリート面との隙間が生じ結露が発生しており、結露の抑制効果が低い。

結露対策として、弁室の断熱性を高めることが結露を抑制する効果があると考え、既存の断熱材を撤去し、コンクリート面（頂版及び側壁）に断熱材を吹付ける断熱工法の適用を提案した。

今後、高度化事業による対策工が実施された場合、施工後のモニタリングにより対策効果の検証と適用性の評価が必要である。

4-3 今後の課題

本調査手法については、一定の有効性評価が確認されたが、本調査結果を踏まえ、今後の課題について以下に例挙する。

- ① 結露量は、弁室内外の気温と湿度と通気量に支配されるが、結露量と通気孔の有無との関連

性は認められなかった。限られたデータから断定することが出来ないため、調査施設の追加等による検証が望まれる。

- ② 今回、通気量測定は行っていないため、今後、通気量測定を行うなど、調査データを重ねて定量化し、通気性の確認が望まれる。
- ③ 本検討の基礎とした観測データは、平成22年6月中旬～同年12月上旬までの短期間の調査結果であり、通年且つ複数年の観測データによる検証が望まれる。
- ④ 冬期間においては、弁室内外の温度差が逆転（10月～5月）し、冬型結露を発生させる可能性についても示唆された。（図-11）
- ⑤ 今回は、滞水している弁室について調査を行ったが、滞水が見られない弁室もあり、その差異の要因解明を目的とした調査を実施し、確認することが望まれる。

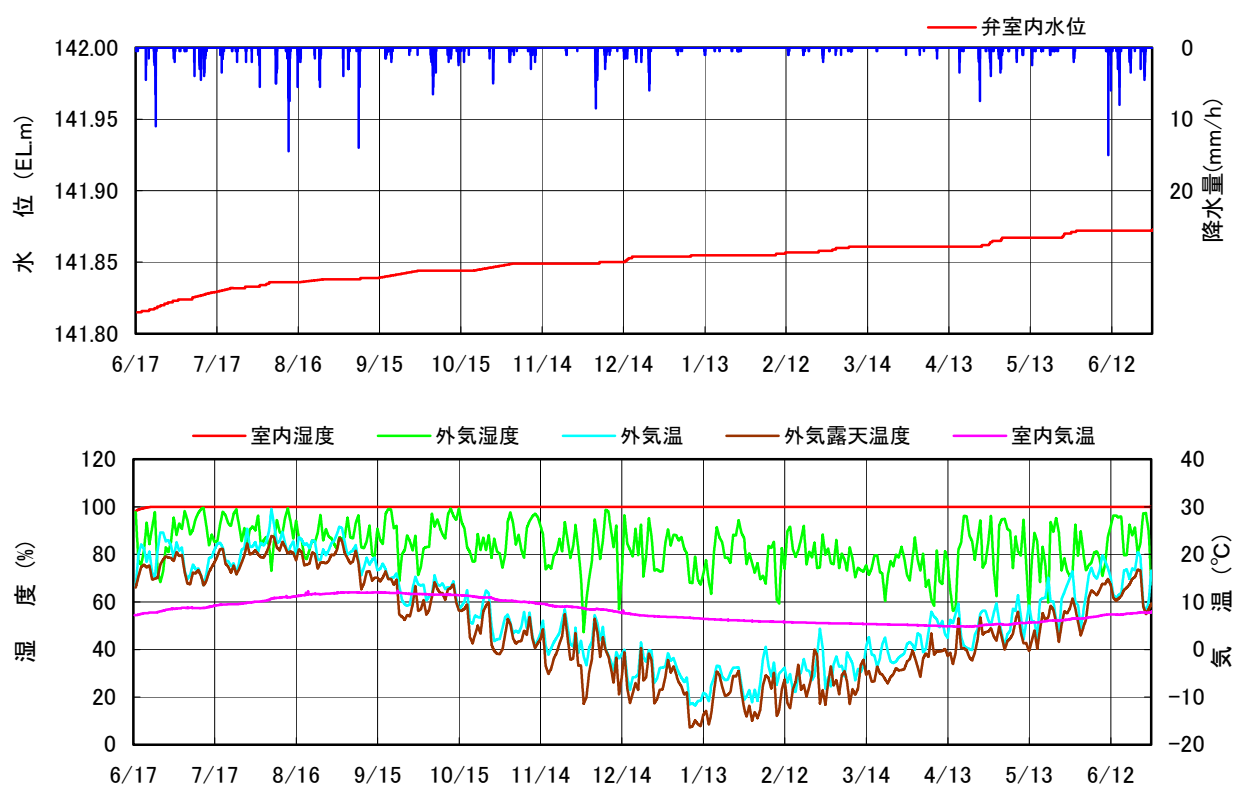


図-11 冬期間の弁室A観測データ経時変化図

おわりに

平成20年度より制度化された「高度化事業」は、ストックマネジメント技術の高度化・標準化に向けた一環として、対象施設の特性を踏まえた調査手法等の検討（Plan）及びその実践（Do）を通じて、調査手法等の有効性を評価するとともに、適用上の問題点や課題を明らかとして（Check）、さらなる解決策を検討・適用（Act）することにより、調査・診断・保全技術のスパイラルアップ（PDCAサイクル）を図っていくための実効手段といえます。

このため、その結果は、一つの業務報告に止まらず、論文発表や研究発表会などを通じて、広く関係者に周知されることが重要と考えます。

なお、本報告の基礎とした観測データは、平成22年6月中旬～同年12月上旬までの、単年でしかも初夏～秋にかけての短期間であり、限られた範囲の調査結果に基づく検討結果であることに留意しつつ、他地域の弁室の滞水状況調査や維持管理の参考となれば幸いです。

今回、本調査の機会を与えて下さいました関係機関に対し厚く御礼申し上げますと共に、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きました北海道土地改良設計技術協会に謝意を表します。

(株)アルファ技研

参考文献

- 1) 住宅の結露防止－防露手法の基礎から防露設計法まで－：防露設計研究会、2004. 4. 30

用水路の基礎杭破損に対する原因特定調査検討

源田 和隆

1. はじめに

本報文では、築造後21年の開水路で供用途中に発生した傾倒（図1参照 2スパン、傾倒角5°、横ずれ0.20m）の原因を究明し、持続的利用に向けた現況復旧工を検討した事例について報告する。

対象施設である丹羽幹線用水路（PCフルーム、B2.20m×H1.60m×L10m、PC杭A種φ300）は、北海道せたな町の泥炭性軟弱地盤にて水田かんがいを目的とした基幹用水路であり、「軟弱地盤」、「枕梁水路橋形式の杭基礎」、「圃場整備等の環境変化」の3条件に着目した調査検討が求められた。

このため、初年度では、原位置試験と杭頭周辺部の試掘調査等（試掘調査では杭の折損を確認 図2参照）から傾倒原因を地下排水機能低下と農道整備による偏圧の複合作用に絞り込み、次年度では、水路基礎工の詳細調査を行い、地震の影響と地下水滞留のメカニズムを明らかにすることで、傾倒原因を特定した。

以下、調査検討の詳細を述べる。

2. 課題と問題点

本業務の課題は、用水路の傾倒に対し、目視困難な基礎杭の変状を考慮した有効な調査検討手法と現況復旧工の検討であり、これに対して以下の3点が問題であった。

- ① 杭の状況（破損、健全性）について、定量的、定性的な判定方法
- ② 試掘により判明した杭の損傷原因の究明と現況復旧工の検討方法
- ③ 地震等偏圧作用の影響程度、杭損傷時期の特



図1 用水路の傾倒状況

杭頭部折損状況写真



杭頭部折損状況スケッチ

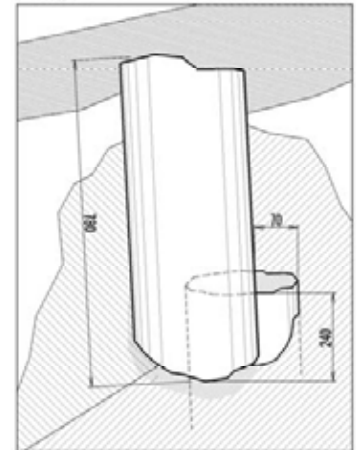


図2 試掘時の杭折損状況

定のための調査検討方法

3. 対策

(1) 技術的提案

前述の課題と問題に対し、以下のように調査検討手法を提案し取り組んだ。

1). 杭の状況（破損、健全性）について、定量的、定性的な判定方法

用水路の傾倒状況把握のために、上下流2スパンを加えた4スパンの内面の位置（X、Y）と標高

(Z) を計測し、変状の大きい目地箇所の試掘と非破壊 I T (インティグリティ) 試験を提案した。掘削は、杭頭部にセンサーを取り付け人力打撃可能な

枕梁下 1 m 深さまで行った。なお、試掘の結果、杭の損傷 (折損、ひび割れ) が確認されたため、損傷部下の杭の健全度を同試験により判定した。

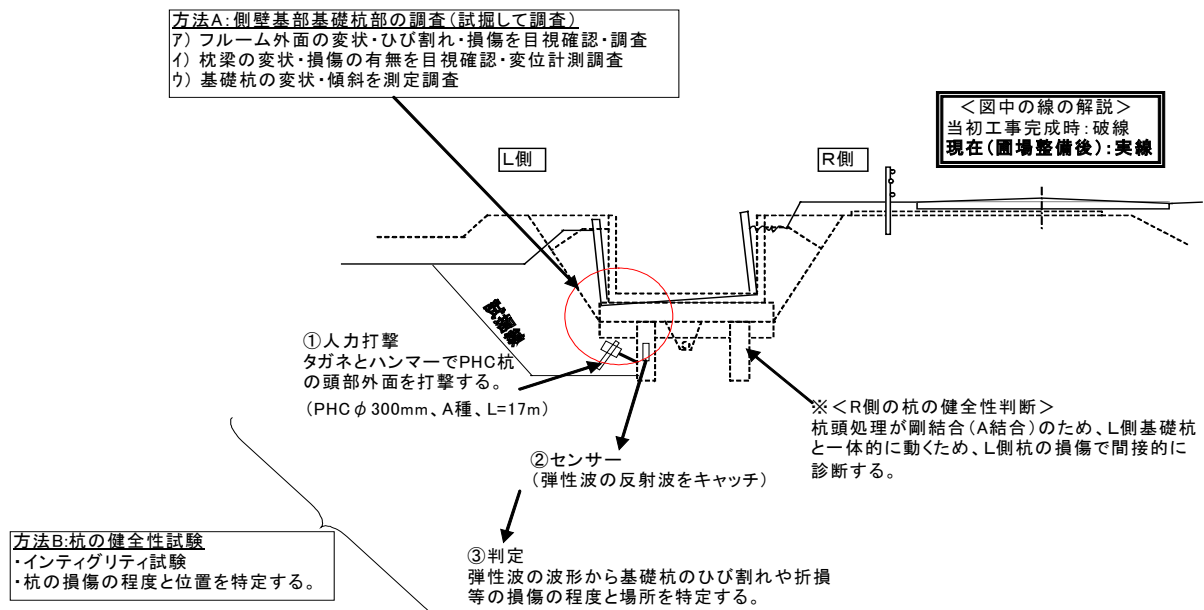


図3 傾倒部側壁基礎部調査概要図

2). 試掘により判明した杭の損傷原因の究明と現況復旧工の検討方法

杭折損の状況から、終局限界のインタラクションカーブを用いて、破壊に至る作用外力の検討を提案した。なお、枕梁下の圧密沈下量計算値(0.60m)から、突出杭条件、アンダードレーン機能の低下による凍上力、外水圧条件を考慮した再現計算により、外力作用条件を絞り込み、現況復旧工の検討に反映させた。

3). 地震等偏圧作用の影響程度、杭損傷時期の特定のための調査検討方法

次年度では、基礎杭とその周辺の詳細調査を提案した。杭頭の形状調査では、損傷状況から作用外力方向を検討し、排水機能の低下に着目したアンダードレーンの形状調査も行った。また、詳細調査の結果を踏まえて、傾倒の関係要素と現象を時間マトリクスで整理し、かつ外力作用状態図を作成して原因

特定を図った。

(2) 技術的成果

調査検討の成果は次の通りである。

- 1). 水路内の位置標高計測と杭損傷の関係から、傾倒角 5° 以上で杭折損があり、今後の指標として有効である。また、初年度に実施した試掘箇所 2 本の杭損傷部下の杭の健全性は I T 試験により確認できた一方で、道路盛土側の引抜きが作用する杭の損傷が顕著であった。
- 2). 詳細調査では、杭損傷部のひび割れの方向とパターンから地震時の揺さぶり力の作用 (図 4 参照) と、アンダードレーンからの水の供給と杭頭部の空洞化のメカニズム (図 5 参照) が判明したことを踏まえ、外力作用の経過と状態を検討整理した (表 1・図 6 参照)。

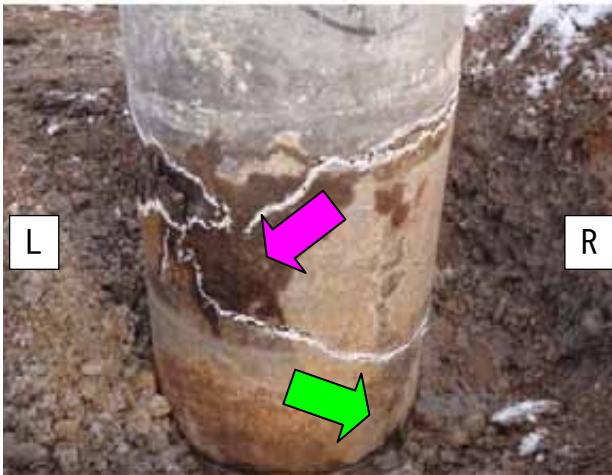


図4 杭の亀裂状況と外力作用方向
(左右両方向の外力作用を受けている)

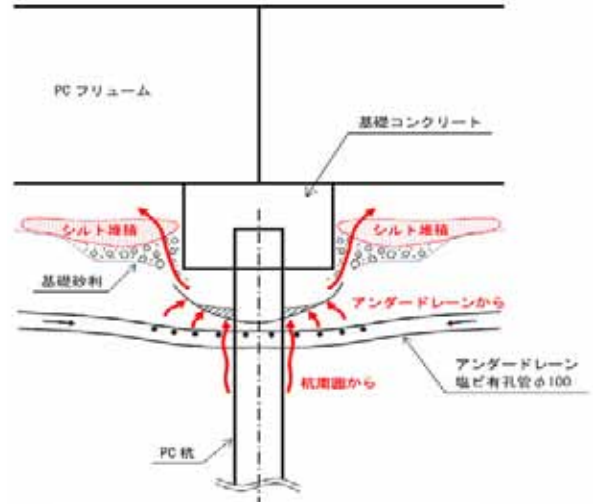


図5 地下水滞留のメカニズム

表1 用水路傾倒原因経過説明

	1987年(S62) 建設時	6年	1993年(H5) 北海道南西沖地震	12年	2005~2006年(H17~18) 道路整備	3年	2008年(H20) 調査開始時
設計	①設計:アンダードレーン形式の採用						
地震			7月12日22時17分頃 震度5(レベル1) ①地震時土圧・動水圧作用 ②基礎コン下6m以深の砂層液化化				
道路整備			①左右加力の水平力の作用 ②杭の支持力の低下		①R側道路盛土 ②水路R側裏込みに粘性土 ③L側排水溝の埋立て		南東側に面したR側壁背面の凍結融解作用→裏込土せん断抵抗低下
軟弱地盤	①道路盛土・裏込土による増加荷重 ②裏込砂利・アンダードレーンなどによる排水改良による地下水水位低下	圧密沈下開始	時間経過による圧密沈下進行による ①杭頭部空隙発生 ②アンダードレーン不同沈下 ③L側土留金網の沈下、裏込土の緩み	①アンダードレーン~L側排水溝への水みち形成による杭頭部空隙拡大、水平抵抗低下 ②L側土圧抵抗低下	①R側土圧増加 ②地下排水機能低下 ③アンダードレーンから水供給	①道路盛土による増加荷重	圧密沈下進行とアンダードレーンから水供給による杭頭部空隙の拡大 →杭の水平抵抗低下
外力作用状況説明			地震時慣性力の土圧抵抗減による過大な杭体応力の発生	地中部杭の曲げせん断破壊 杭体のひび割れ	①R側土圧増加 ②地下排水機能低下 ③アンダードレーンから水供給	圧密沈下開始	大雨・融雪時のR側地下水圧増加、地下水供給による凍上力作用による過大な杭体応力の発生
							①用水路の傾倒 ②R側沈下進行 ③裏込土の緩み ④継目部からの裏込土洗掘

※図6 外力作用状態図を参照。

凡例

□ : 要因

□ : 現象

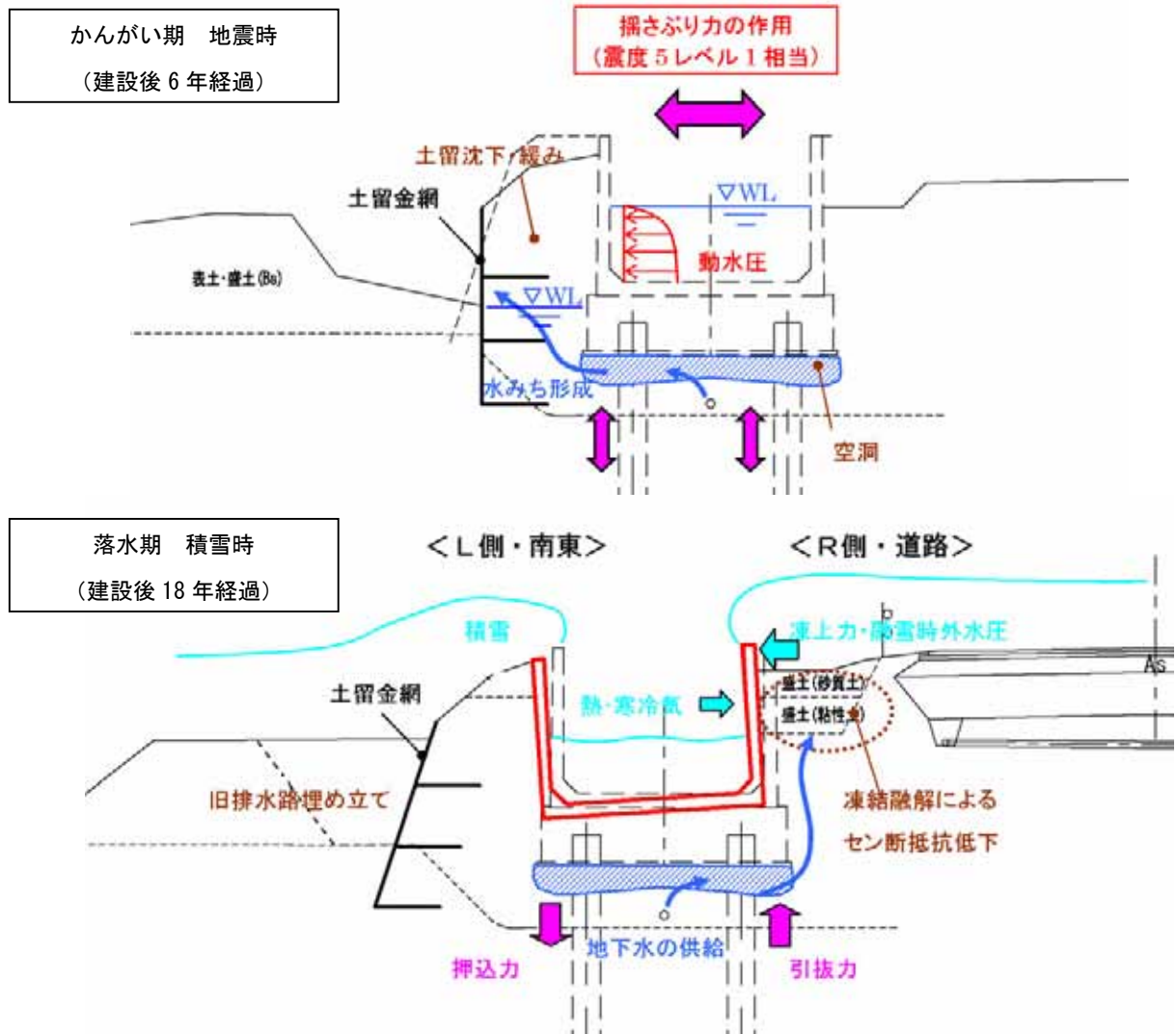


図6 外力作用状態図

アンダードレーン形式で建設された水路が、地盤沈下による杭頭部の空隙が形成された状態で、建設後6年後の地震による揺さぶり力の作用を受け、さらに18年後に道路盛土による沈下と偏土圧、及び凍結融解作用の影響を受け、杭破損と用水路の傾倒に至ったと考えられる。これより、用水路傾倒の原因は、①地震の影響、②道路整備による偏圧、③排水機能低下による凍上力・外水圧の複合作用によるものと特定した。

3). 杭損傷原因は、水路橋形式の構造特性と、偏圧(土圧、外水圧等)による過大な杭応力の発生であるため、現況復旧工は、土圧均等に軽量盛土

(EPS)、輪荷重軽減に補強土壁、外水対策にサイドドレーンを補助工法としたPHC杭φ450mmによる増杭工法を採用した(図7参照)。

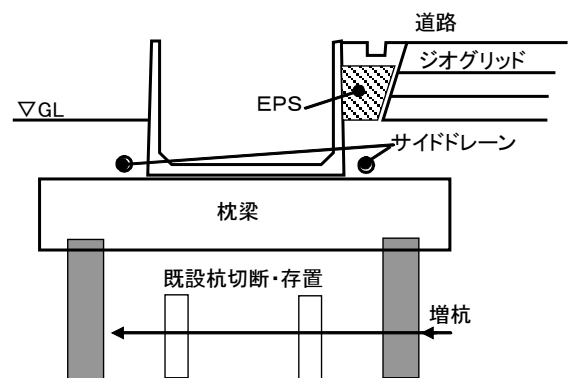


図7 現況復旧工説明図

4. おわりに

対象施設は、工事後2年間の通水を経て安定している(図8参照)。本調査検討により、軟弱地盤、杭基礎の連続単純梁水路橋型式、圃場整備など周辺環境に変化がある用水路条件における機能診断調査時の着目点(留意点)として、ストックマネジメント技術の向上に向けた知見が得られたので以下にまとめる。

1). 調査区間

杭基礎の連続単純梁水路橋形式では、1箇所の杭の損傷により他の杭への荷重偏りを生じ、その影響が上下流スパンの基礎杭に及ぶ特性を持つ。今回の調査結果からは、傾倒等の外観変状の大きいスパンから上下流各2スパンは調査対象にすべきである。

2). 地震や整備の記録

本調査のように建設時の施工記録、地震時の変状や周辺の整備記録が不足する場合は原因特定が困難である。そのため、過去の記録が不足する場合は、同時に離れた変状のない地点も調査し対比することも必要である。

3). 外水処理の重要性

特に、アンダードレーン形式の外水処理工法を採用している用水路は、杭頭部の空洞化拡大を生じやすく、地震や圃場整備などの作用外力の変化に弱いため、偏芯荷重作用区間を重点的に調査し先行改修することが重要である。

4). 調査と同時に現況復旧(長尺PCフルーム布設替え)する場合の留意点

新設時と異なる条件であることから、支承材との付着等により吊り上げ荷重が大きくなるため、クレーン選定、搬出入路、及び吊り金具の取付は新設以上に検討を要する。また、傾倒のあるPCフルームは構造特性から振れを生じている可能

性がある(図9参照)。



図8 工事完了後



図9 PCフルーム振れによる目地のズレ補修

以上

(NTCコンサルタンツ(株))

偏光顕微鏡によるコンクリート内部の劣化状況の調査

榊 克晴・中川 慎司

1. はじめに

コンクリート構造物の進行性劣化の代表格である凍害の劣化度判定は、これまではひび割れ幅、スケールリング、浮き・剥離・剥落、強度、鉄筋の腐食などを基に行っている。また、超音波法などの新たな調査方法も進んでいるが表面からの調査となっており、構造物深部までの確認は一般的に行われていない。一方、ひび割れによる進行性の劣化は、時間の経過とともに進行し、「微細な亀甲状のひび割れ(膨張)」→「部材の強度低下」→「崩壊」が最も基本的なものであり、また、ひび割れが入ってから劣化の進行は急速となる。更に、微細なひび割れは、表面上の変状として目視確認をする場合が一般的であるが、実際には構造物の深部まで発生している可能性がある。

このようなことから、本文では、経年的に進行するコンクリートの表面上の微細なひび割れに対する早期の保全対策に資するため、表面上に表れた微細なひび割れが、実際には構造物のどの程度の深部まで発生しているか、併せて、コンクリートの材質が何であるか、劣化の原因は何であるか等について、偏光顕微鏡を用いて解明した事例を紹介する。

2. 偏光顕微鏡による調査を実施するに至った経緯

コンクリートの機能診断調査を行う場合、一般的には目視や種々の調査機器を用いた非破壊検査を行うが、より詳細な調査を行う場合はコンクリートの試料をコアとして採取し、コンクリート劣化状況や劣化原因を試験・分析(圧縮強度、中性化等)し、また、目で確認する場合がある。特に最近の国営造成土地改良施設の機能診断においては、一定の期間を経過したコンクリート構造物では、コンクリート

のコアを採取する場合が見られる。但し、採取コアからの情報は、コア切断面の表面やコア全体からの入手が一般的である。

ところで、岩石・鉱物の分野においては、既に19世紀に発明された偏光顕微鏡とその観察方法を用いて、岩石の組成やそれを構成する個々の鉱物判定等に活用している。この方法を応用して、岩石・鉱物に類似しているコンクリートの分野においても、これまでコンクリートのアルカリ骨材反応の解明などに活用してきている。

筆者は、これらの過去における実績を活用して、コンクリート・コアの表面からのみの情報に加えて、コンクリート表面のひび割れ等の劣化状況が内部に伝達されている状況を確認する方法として、偏光顕微鏡を用いて解明することを試みることにした。

3. 偏光顕微鏡の仕組みと観察方法・内容



図1 偏光顕微鏡(透過)の概観(Nikon製(OPTIPHOT2-POL))

偏光顕微鏡は鉱物顕微鏡とも言われ、主として鉱物や結晶を観察する時に用いられる。岩石は多様な鉱物が混在しており、明視野で観察するだけでは鉱物の種別を見分けることが難しいが、偏光顕微鏡を用いて観察すると、偏光および複屈折特性が異なるため結晶構造や分子構造を見分けることが出来る。

ここでは、一般的な透過型の偏光顕微鏡の仕組みと、通常の顕微鏡観察と同様に試料の像を観察するオルソスコブ観察方法について説明する。なお、偏光顕微鏡で観察するには、事前に試料を厚み20~30 μ mに薄くした薄片（試料をスライドガラスに載せカバーガラスとの間に封入したプレパラート）を作成しておく必要がある。

図2の偏光顕微鏡（透過型）の構造図に示すように、光源からの光を直線偏光とするために「ニコル」と呼ばれる偏光板が配置される。光源から発した光は上方ニコルを入れない場合、下方ニコル（ポラライザー）をある一方向の面で振動する光のみが通過し、回転ステージ上の試料を通過して対物レンズ、接眼レンズを介して観察される。この状態をオープンニコルと言う。対物レンズと接眼レンズの間には、出し入れ可能な上方ニコル（アナライザー）がセットされていて、これを入れた状態をクロスニコルと言う。上方ニコルは通過できる光の振動面が下方ニコルを通過できる光の振動面と90度で交わるようにセットされており、回転ステージ上に試料が無い状態では、図4のように視野が真っ黒に見える。

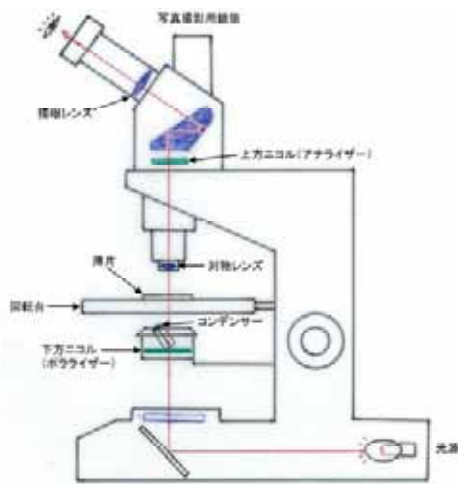


図2 偏光顕微鏡（透過型）の構造

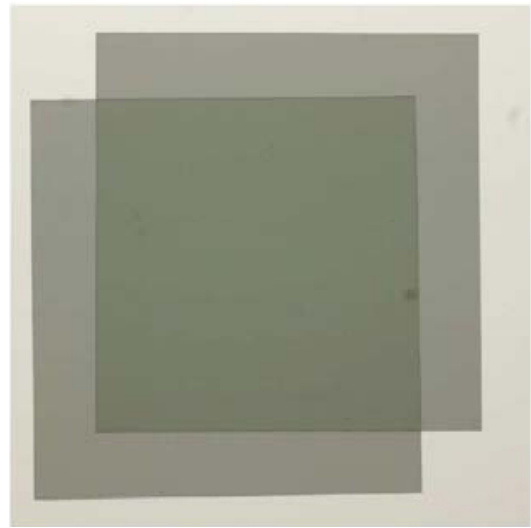


図3 光が透過する向きの偏光板の重ね合わせ

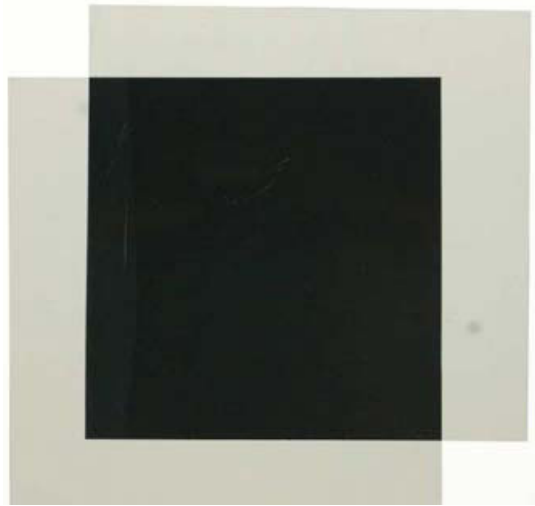


図4 光が遮断される向きの偏光板の重ね合わせ

岩石を構成する鉱物は様々な光学的性質を持っており、光学的等方体以外の鉱物を透過した光は2方向に分散（偏光）して進む。そのため、クロスニコルでも上方ニコルを通過できる成分が現れ、視野に鉱物が見えるようになる。オープンニコルでは自然光でなく、無色のサングラス（偏光板）をかけて見ているに近い。クロスニコルでは鉱物にきれいな色（干渉色）がついて見え、ステージを回転させると色が変わったり（多色性）、色が消えたり（消光）するものがあり、これらの性質を利用して鉱物名を同定する。

オープンニコルによる観察においては、大きさ、形、

へき開、色、屈折率、多色性、岩石組織などの情報を得ることが出来る。クロスニコルによる観察においては、干渉色、双晶、累帯構造、消光位、消光角、伸長の正負などの情報を得ることが出来る（本項の大部分は、ホームページ「偏光顕微鏡のしくみと観察方法：www008.upp.so-net.ne.jp/earth-sc/hennkoukennbikyoku2.pdf」を引用した。詳細はホームページを参照されたい）。

4. 調査の概要

(1) 対象施設の概要と目視調査の結果

調査の対象とした施設は、北海道中央部に位置する「凍害危険度」が上から2番目の「大きい」ランクに属する積雪寒冷地において、昭和63年に国営かんがい排水事業により建設された現場打ちのコンクリートフルーム水路（内幅4,600mm、側壁高（内側）1,200mm、側壁厚200mm）であり、調査年時点（平成22年）で23年が経過していた。

目視調査の結果では、図5のような側壁の亀甲状ひび割れ、図6のような側壁上部のスケーリングなど、凍結融解の繰り返しによる凍害劣化の変状が現れていた。



図5 側壁の亀甲状のひび割れ



図6 側壁上部のスケーリング

(2) 試料コアの採取と目視による所見

試料コア（直径75mm、長さ200mm）の採取場所は、凍害による劣化の現象が表面に表れている場所であって、周辺を代表する位置とすることとし、側壁天端から250mm下の位置を選定した。

採取コアの目視による所見としては、側壁の気中部表面には微細な亀甲状のひび割れが見られるものの、切断面に変状は見られず、健全な状況と判断された。



図7 採取コアの表面の状況

なお、本位置における劣化度は、本位置の上下流の機能診断調査結果を総合的に勘案し、「農業水利施設ストックマネジメントマニュアル」（保全センター）に示す「鉄筋コンクリート水路の健全度ラ

ンクの設定」における「S-4」、「コンクリート診断技術07」（(社)日本コンクリート工学協会）に示す「凍害の二次診断の劣化度の区分」における「II-2（進展期-2）（中度）」と評価した。

表1 劣化度の判定基準

健全度ランク	施設の状態	現象例	対応する対策の目安
S-5	変状がほとんど認められない状態	①新設時点とほぼ同等の状態 (劣化過程は、潜伏期)	対策不要
S-4	軽微な変状が認められる状態	①コンクリートに軽微なひび割れの発生や摩耗が生じている状態 ②自地や構造物周辺に軽微な変状が認められるが、通常の使用に支障がない。 (劣化過程は、進展期)	要観察
S-3	変状が顕著に認められる状態 劣化の進行を選り抜ける補修工事などが適用可能な状態	①鉄筋に達するひび割れが生じているあるいは、鉄筋腐食によるコンクリートの剥離・剥落が生じている ②摩耗により、骨材の脱落が生じている。 ③自地の劣化により顕著な漏水(流水や噴水)が生じている。 (劣化過程は、進展期から加速期に移行する段階)	補修 (補強)

S-2, S-1は省略

出典：農業水利施設ストックマネジメントマニュアル（保全センター）

表2 凍害の二次診断の劣化度の区分

劣化度	区分の基準
I (潜伏期) (ほとんどなし)	軽微なひび割れ(幅0.2mm以下)、または表面のみのスケーリングで進行性ではない。
II-1 (進展期-1) (軽度)	表面に小さなひび割れ(幅0.3mmぐらいまで)、ポップアウト、または中程度までのスケーリング(深さ10mmぐらいまでの劣化)。
II-2 (進展期-2) (中度)	ひび割れ幅が大きい(0.5mm以上)、または強度のスケーリング、ぜい弱化はく離がある(深さ20mmぐらいまでの劣化)。
III (加速期) (やや重度)	鉄筋付近までのひび割れ、厚き、はく落、ぜい弱化や激しいスケーリング(深さ30mmぐらいまでの劣化)。
IV (劣化期) (重度)	コンクリートが浮き上がり、はく離も著しく、ぜい弱部も深い(30mm以上)。鉄筋も断面欠損を生じている。

出典：コンクリートの診断技術（(社)日本コンクリート工学協会）

(3) 偏光顕微鏡による観察の概要

採取コアは、気中部表面からは微細な亀甲状のひび割れが見られるものの、切断面からは健全と見られたため、深度方向へのひび割れの程度を確認するため、偏光顕微鏡による観察を行った。

観察に当たっては、事前に、図8に示すように、コアを縦方向に切断し、その切断面において、厚みが20~30μm、長さが気中部表面から深度50mm超までを薄片にした試料プレパラートを作成した。

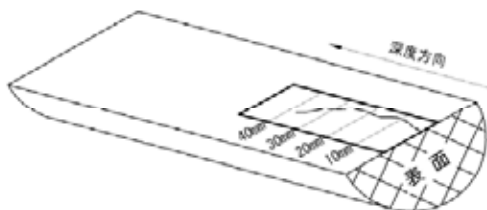


図8 試料プレパラートの採取状況

目視では観察できなかった微細なひび割れが、偏光顕微鏡による観察では、表面からの深度40mm程度まで進行していることが判明した。

5. 偏光顕微鏡による観察結果と考察

オープンニコルでの観察結果の例を図9に、同試料のクロスニコルでの観察結果の例を図10に示す。また、採取コアのフラクチャー（ひび割れ（白い筋状の部分））の状況を図11に、深度50mm付近の骨材分布及びフラクチャーの状況を図12に示す。また、顕微鏡写真の凡例を表3に示す。



図9 オープンニコルでの観察結果

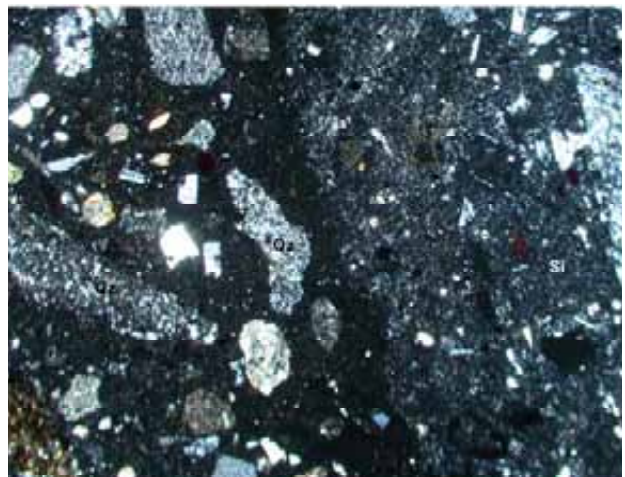


図10 クロスニコルでの観察結果

以下に、観察結果に対する考察を行う。

(1) 全体の特徴

試料の肉眼的特長としては、直径35mm以下の円磨礫を粗骨材とするコンクリートで、粗骨材は安山岩、ホルンフェルス、変形砂岩、変形泥岩など、粗骨材の多くには狭い反応縁が認められ、対応する基質には白色物質がフィルム状に生成され、粗骨材周縁にはひび割れがしばしば認められる。ひび割れはまた、基質中を表面から内部へ向かって伸びている。これらの肉眼的特長と以下に示す偏光顕微鏡観察の結果から、ひび割れの発達や反応縁と反応帯の生成、白色物質（結晶、非結晶）の沈殿等、物理的・化学的に劣化した進んだコンクリートであると言える。

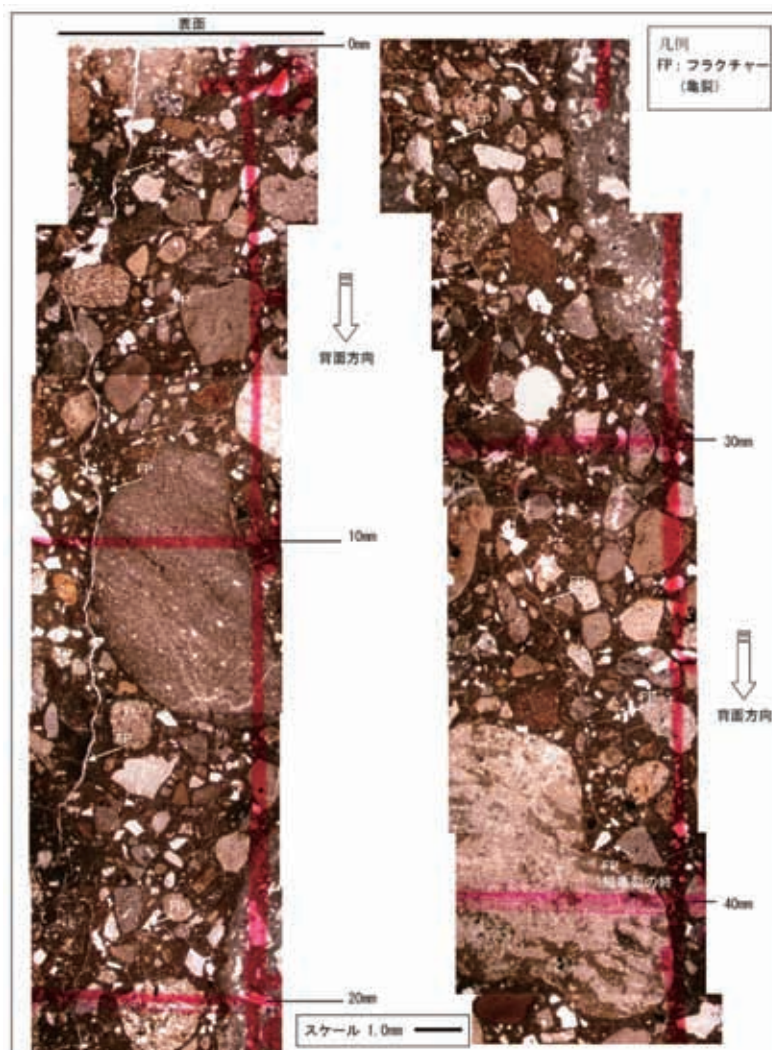


図11 フラクチャー（ひび割れ（白い筋状の部分））の状況

(2) 凍結融解による物理的劣化の可能性

連続性の良いフラクチャーは深部へ向かう縦方向のフラクチャーが深度40mmまで続き、水平方向のフラクチャーもこの範囲に存在する。ネットワーク状の微細フラクチャーはさらに深部まで続くが、これを別の反応によるものと考えると、凍結融解によるものは深度40mm程度と言える。

(3) 骨材-セメントペースト間の反応の可能性

骨材に反応縁が認められ、これと接するセメント

表3 顕微鏡写真の凡例

項目	内容
骨材	(岩石) AN:安山岩 TF:凝灰岩 SS:砂岩 WTF:溶結凝灰岩 CH:チャート MS:泥岩 (初期鉱物) Qz:石英 Pl:斜長石 Hb:普通角閃石 (2次鉱物) Qz:石英 Si:隠微晶質シリカ鉱物 Il:イライト Sm:スメクタイト
基質	MX:基質(硬化セメントペースト) PNP:相対的健全部
反応帯	RR:反応縁(骨材側) DB:暗色反応帯(基質側)
反応性生物	D-Ram:暗色置換性非晶質物質 Pcr:沈殿性結晶質物質 Cb:炭酸塩鉱物(中性化の産物)
孔隙	VS:発泡痕 FP:フラクチャー孔隙

ペーストに反応帯が認められる骨材は、いずれもシリカ鉱物を含む。また、沈殿物としてゲル状物質や

結晶質物質が生成している。このことからアルカリ骨材反応が起こっているとすれば、アルカリシリカ反応が起こっていると考えられる。しかし、アルカリ (Na, K) の関与しない別の反応である可能性も考えられる。

(4) 骨材とセメントペーストからの溶出の可能性

骨材とセメントペーストの間などのフラクチャーに何らかの流体が侵入し、これに骨材から Si などが、セメントペーストから Ca などが溶出し、反応縁、反応帯や沈殿物をつくったと考えることもできる。この場合はアルカリシリカゲル (Si > Ca · Na · K) でなく、シリカカルシウムゲル (Ca > Si) などが生成する。置換性非晶質物質や沈殿性結晶物質、沈殿性不透明物質の不均質な分布や、発砲痕、フラクチャーへの充填を考えると、この可能性も考えられる。

(5) 中性化

セメントペーストの中性化による炭酸塩鉱物の生成は、全体として深度2.3mmまでに留まっている。

(6) まとめ

凍結融解によると考えられる縦亀裂は、表面から深度約40mmまでである。

しかし、骨材に反応縁が見られ、対応する基質には暗色反応帯が生成している（暗色置換性非晶質物質の生成）。微細なフラクチャーのネットワークは、深度40mmにとどまらず、さらに深く深部へと続く。

暗色置換性非晶質物質は、骨材の周囲だけではなく、表面近くやフラクチャーに沿うセメントペーストにも均質に生成している。

したがって、アルカリ骨材反応によって骨材の反応縁とセメントペーストの反応帯ができた可能性よりも、微細なフラクチャーの生成に伴い、骨材-セメントペースト間を含めてフラクチャーに何らかの流体が侵入（本コアの近辺から採取したコアからはエフロレッセンスが確認されており、水が侵入し反応した可能性が高い）し、そこに骨材からは Si などが、セメントペーストから Ca などが溶脱し、反応縁、反応帯（微細なひび割れ）を作った可能性が

高い。これはコンクリートの骨粗しょう症とも言うべき現象で、やはり劣化が進行する。

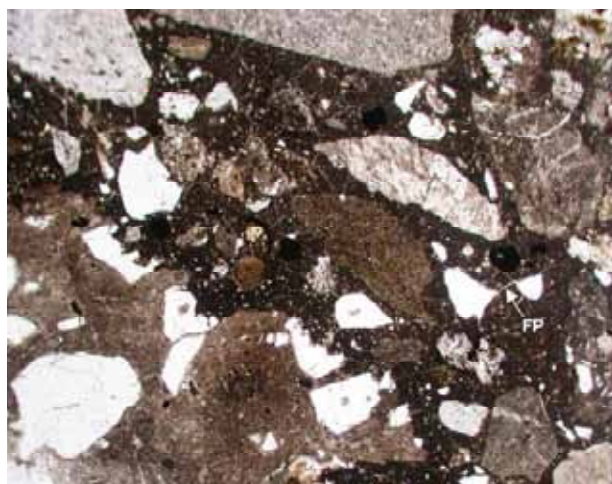


図12 深度50mm付近の骨材分布及びフラクチャーの状況

6. おわりに

偏光顕微鏡を用いて、コンクリート内部のひび割れの状況のほか、骨材の材質の特定、劣化の原因や反応性などを具体的に観察し、解明出来た。

これらの結果を活用して、早期の保全対策を実施することにより、施設の一層の長寿命化に資することを期待したい。

(サンスイコンサルタント(株))

雪を利用した農産物貯蔵システムの研究（その2）

川瀬 智久

1. はじめに

我が国のエネルギー事情は、先の東日本大震災後の電力供給量減少にともなう大規模な節電への取り組みや自然エネルギーに対する依存割合拡大についての検討など、エネルギー政策全体の動向に関心が集まる状況にある。このような背景において、夏期の電力需要削減に貢献できるエネルギー源として、天然の雪や氷といった自然冷熱エネルギーが考えられる。現在、日本には図-1に示すような自然エネルギーを利用した冷房・冷蔵施設が約120施設存在する。そのうち雪を利用した施設は、北海道内では美唄市、沼田町を代表に約50施設存在する。



図-1 山形県村山市雪室施設

また、このうちの半数以上は農産物貯蔵用施設で、自然冷熱を活用した貯蔵方法が農産物の品質向上・鮮度維持などに効果的であるとされている。これらの自然冷熱を利用した施設は、電力を使用した場合よりランニングコストが低く、除雪費用、および二酸化炭素排出量の削減効果も期待できる。一方で、冷熱備蓄用の大規模な雪氷保管庫が必要となり、施設建築に伴うインシヤルコストが割高になるため、

一般的にはあまり普及に至っていないのが実情である。

本研究は、これらの自然冷熱エネルギーの利用技術を農産物貯蔵に低コストで導入することを目的とし、屋外での雪の保存技術、および保存した雪からの冷熱利用技術について、平成20年度から3カ年計画にて実証試験したものである。本報告は、昨年度、研究概要と途中経過について報告した研究報告に引き続き、3カ年の研究結果、および課題となったランニングコスト、貯蔵農産物に応じた施設の設計条件について報告する。なお、本報文に係る研究は、農林水産省の「新たな農林水産政策を推進する実用技術開発事業」を活用した、「自然冷熱を活用した貯蔵農産物のブランド化と貯蔵システムの開発」というテーマの研究事業として実施しており、帯広畜産大学を中核機関として、北海道大学、日本データサービス株式会社、NPO北海道雪氷利用プロジェクト、NPO雪氷環境プロジェクトが共同で取り組んだものである。

2. 実証試験施設の概要

昨年度報文⁽³⁾で述べたとおり、本研究では、実証試験施設に求められる条件として、インシヤルコストが低廉なこと、および高湿度の環境を維持することが重要であると考えられたことから、冷熱源を屋外雪堆積造成方式(雪山)とし、冷熱供給方式には空気式が妥当であると考えた。

これらの条件に適合する農産物貯蔵用を想定した実証試験施設を、十勝管内音更町に構築した。なお、実証試験は1年目(平成20年11月~21年10月)、2年目(平成21年12月~22年10月)の期間で実施した。

2-1 1年目試験施設

1年目試験では、冷熱を採取する熱交換部分の使用資材や構成を変えた試験施設を2基（システムA、B）構築し、冷熱回収性能などを比較した。両施設共通のシステム概要図を図-2に、施設全体の写真を図-3に示す。

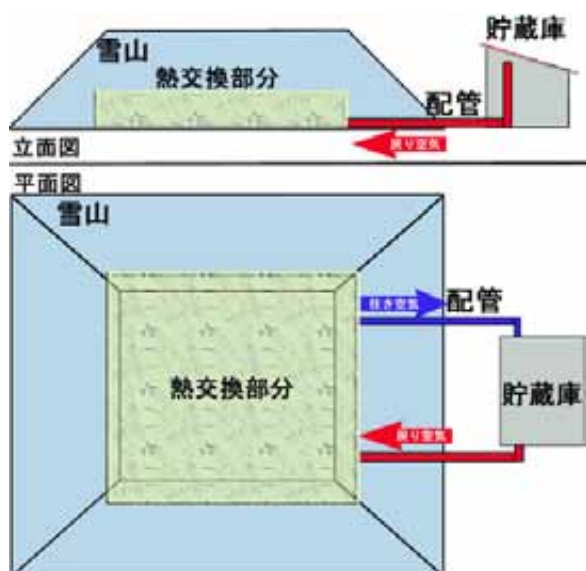


図-2 1年目施設のシステム概要図



図-3 1年目施設全景

雪山は、約500m³の四角錐状台形を2基造成し、それらの表面を断熱被覆した。断熱材は木材樹皮粉砕物であるバーク材を利用し厚さ200mmで被覆した。さらにその表面を、バーク材の飛散防止および雨水対策のためにブルーシートで被覆した。また、雪山体積は、貯蔵期間と貯蔵温度の貯蔵条件に対して、貯蔵農産物の呼吸熱、貯蔵庫温度保持に必要な冷熱

負荷を算出し、雪山の自然融解量を加算して、約100m³と算出したものの、実験初年度であることと、実験敷地に余裕があったことから、約500m³の雪山を構築した。

また、それぞれの雪山の横に簡易プレハブを配置し農産物貯蔵庫とした。貯蔵庫は、室内側に断熱加工を施し、材料は成形板状の押出法ポリスチレンフォーム保温板（厚さ50mm）を使用した。雪山と貯蔵庫は配管資材、およびダクトファンで接続しファンを稼働させることで、雪山の冷気を貯蔵庫に吸込み、貯蔵庫で暖められた冷気（暖気）を雪山に戻す空気循環式とした。貯蔵庫の平面図を図-4に庫内の冷気吹出口の写真を図-5に示す。

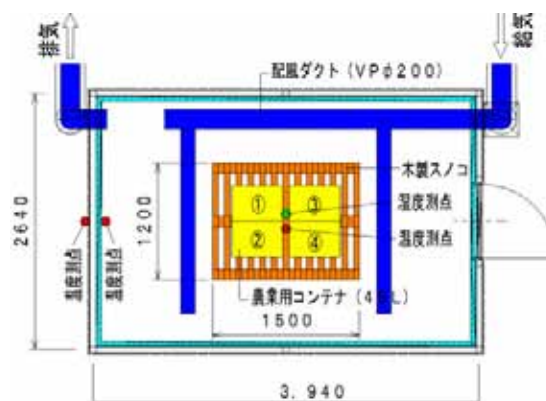


図-4 1年目施設の貯蔵庫平面図



図-5 貯蔵庫内部の冷気吹き出口

(1) システムA

2基の施設うち、システムAは、地上に熱交換部資材として農業用プラスチックコンテナ（以下、コンテナ）を70個利用し、雪山中心部に1段35個を2段にして逆さまに積上げて熱交換する空間とした。（図-6）

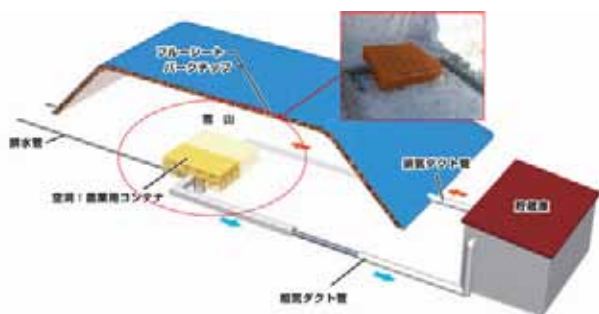


図-6 1年目施設のシステムA概要図

(2) システムB

システムBは、U字トラフを地中に埋込み、トラフの上面部分（地表面）はグレーチングにて蓋をして、トラフ内を通過する空気がグレーチング面で雪と熱交換するようにした。システムBは、システムAと比較するとグレーチングの資材費用、地中に埋設する作業費用などコストが高く、また、配管経路を容易に変更できない短所があるものの、雪山造成時の重機重量、および雪山重量の負荷による空気流路破損に対する懸念が少ない。（図-7）。

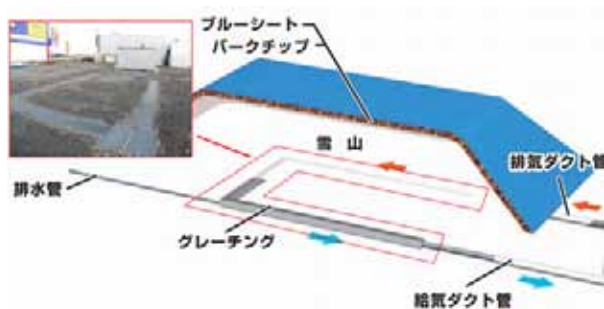


図-7 1年目施設のシステムB概要図

2-2 1年目実証試験内容

平成20年11月から試験施設の構築を開始し、3月に試験運転を開始、4月に貯蔵用農産物を搬入した。貯蔵用の農産物は、本研究事業において「低温貯蔵

に適した品目の選定」を課題としたことなどから十勝圏の主要な農産物である大豆、小豆、玄そば、馬鈴薯、長いもを選定した。

試験運転開始時から、両システムにおいて温度計測を各9箇所、および湿度計測を各1箇所実施し、10分毎データを計測機器に記録、熱損失特性、断熱性能、熱収支などを評価することとした。また、定期的な雪山体積変化測量、定点撮影、および貯蔵庫への冷氣供給ダクト内の風量測定を実施し、雪山形状変化を観察するとともに、雪山からの供給冷熱量との相関性を推察した。その他に、融雪排水の成分分析、貯蔵庫内の粉塵測定を実施し、周辺環境、および貯蔵農産物への影響を推察した。計測項目一覧を表-1に示す。

表-1 1年目施設の計測項目一覧

計測項目	計測位置・採取位置
温度	貯蔵庫内、ダクト給気口、ダクト排気口、熱交換部、冷熱内部(雪山)、地中(雪山下)、地中(雪山以外)、外気、貯蔵庫外壁、貯蔵庫床下
湿度	貯蔵庫内中央、ダクト給気口
冷熱量	雪山体積
粉じん	貯蔵庫内空気
融雪水質	雪山融雪排水
風量	ダクト断面

2-3 1年目試験結果

雪山形状は、パーク被覆厚みを合わせると、3月15日の時点で高さが約3.2~3.4m、体積約680~740m³であった。その後、85日後の6月9日には、高さが約0.3m、体積が約170m³減少した。なお、雪山形状は、全体がほぼ均一な形を維持したまま縮小し、設計段階で融雪要因として想定した「雪山表面での大気、および地中への冷熱損失による融雪」による変化であると推察された。

さらに融雪要因として「熱交換部分での冷熱利用による融雪」、「雪山表面に形成された想定外の融雪」（参考写真 図-8~9）が確認された。この想定外の雪融解箇所は、発見時に、既に雪山表面に開口

部を形成し、開口部と熱交換部分の空洞とが繋がり、



図－8 雪融解箇所の写真
(システムAの配管の雪山貫通箇所)

熱交換部分に外気を侵入させるバイパスのような空洞を形成していた。

なお、これらの雪融解はシステムAでは冷気循環配管の雪山貫通箇所、システムBでは融雪水排水管が地中埋設してある箇所が発生しており、システム構成要素の設置箇所において、局所的に熱伝導が高くなり雪融解が進行したことに起因すると考えられる。

なお、これらのバイパス空洞が確認された6月初旬以降、貯蔵庫内の温湿度は大きな変化が無かった。農産物貯蔵、および各種計測はそのまま継続し、7月下旬以降の空洞拡大ともなっており、両システムとも室温上昇が著しくなった。そこで、8月初旬に2基の雪山を1基に集約し、システムAのみで試験を継続した。



図－9 雪融解箇所の写真
(システムBの排水管の埋設箇所)

10月29日までの日平均外気温、貯蔵庫の室内日平均湿度の推移を図－10に示す。2基の試験施設の貯蔵環境は4月末までは約3℃で推移し、5月の外気温上昇ともなっており約4℃に上昇した。さらに、7月以降の外気温上昇とバイパス空洞の拡大により、徐々に5℃を超え8月初旬には10℃まで上昇した。雪山を1基に集約した8月11日以降は約6℃で推移したものの、徐々に温度上昇して10月初旬には再び約10℃になった。また、日平均湿度は、常に70%を越え、雪山集約後は80%以上を維持した。

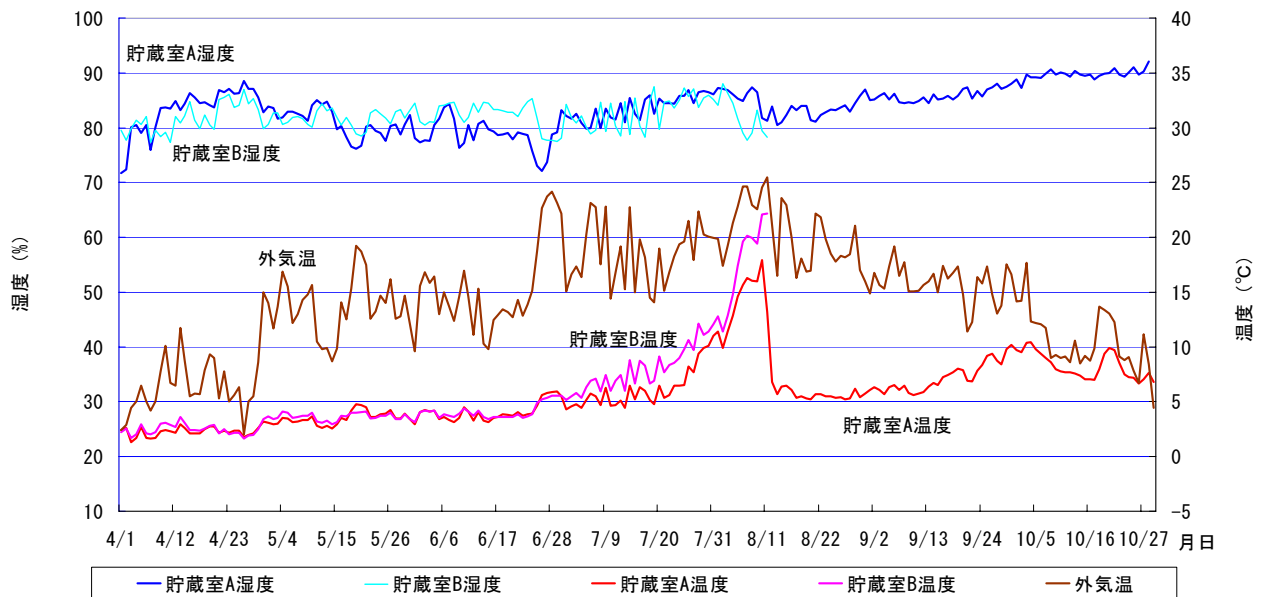


図-10 1年目試験施設の貯蔵庫内における日平均温湿度の推移（4／1～10／29）

また、庫内室温、および外壁温度の測定結果から、平成21年4月1日から7月31日までの122日間で雪山からの供給冷熱量は、いずれのシステムも約2,300kwh（雪換算で40m³）であった。なお、冷熱量換算は、給気ダクト内の実測風量約400m³/h、貯蔵庫のダクト給気・排気口の冷風温度と外気の温度差0～20℃、貯蔵庫の構造体熱通過率0.65として算出した。

また、融雪排水の成分分析結果は、参考とした排水基準を満たしており、貯蔵庫内の粉塵濃度測定結果も、一般大気中の粉塵量と同等レベルであった。

2-4 2年目試験施設

1年目試験結果の供給冷熱量、および貯蔵庫の温湿度状況に明確な性能差が認められなかったため、2年目施設は、コスト面で有利なコンテナ型熱交換方式施設を1基構築した。試験施設の全景を図-11に、システム概要図を図-12に示す。

また、外気温上昇時の影響を軽減するため冷気を循環させる送風機を1台増設し、さらに熱交換部分のコンテナ個数を120個に増加させて、空気と雪の接触面積を1.5倍にして冷熱をより多く供給させ、1年目施設との冷熱供給量の違いについて検証することとした。



図-11 2年目施設全景

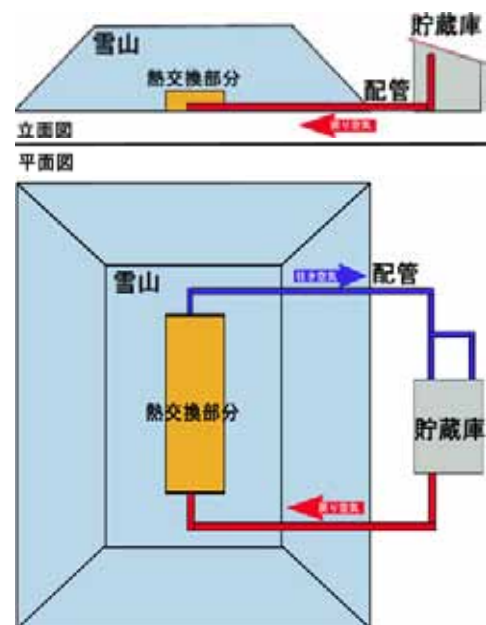


図-12 試験施設のシステム概要図

なお、貯蔵庫の内部断熱材厚は1年目施設の貯蔵庫では、設計どおりの断熱効果が得られなかったことから、倍の厚みの100mmにして熱損失が低減するかを検証した。

また、供給冷熱用配管の延長が伸び、配管での熱損失が増加することが予測されるため、配管断熱材を補強した。2年目施設は、熱交換部分と同様に1年目の1.5倍の750m³の四角錐状台形の雪山を1基造成し、それらの表面を1年目と同様にバーク材で表面被覆した。

2-5 2年目実証試験内容

1年目と同様に平成22年3月初旬に試験運転を開始し、3月末に貯蔵用農産物を搬入した。貯蔵用の農産物も1年目と同様に実施した。また、同様に温湿度計測、定期的な雪山体積変化測量・定点撮影、および貯蔵庫への冷氣供給ダクト内の風量測定を実施し、雪山形状変化を観察するとともに、雪山からの供給冷熱量との相関性を推察した。他方、2年目は雪山表面でのアルベド(物体表面が太陽光を反射する割合)と、雪の含水率も計測した。

2-6 2年目の試験結果

雪山造成直後の3月の雪山形状は、高さ約3.7m、

体積が約740m³であった。約60日後には高さが約0.4m、体積が約100m³減少していた。1年目同様、5月中旬に雪山法面の配管接続部にバイパス空洞形成が確認された。また、6月中旬には、雪山上面にバイパス空洞形成が確認された。その時の高さは約3.0m、体積約400m³であった。なお、1年目と同様にバイパス空洞が確認された後6月末までは、貯蔵庫室内の温湿度に変化がなかった。そのため、農産物貯蔵、および各種計測はそのまま継続して実施した。その後、貯蔵庫内室温が上昇したため、残存している雪でバイパス空洞部を埋めて再成型した結果、約300m³の雪山が再構築できた。2カ年分の試験施設の8月31日までの日平均外気温、貯蔵庫内日平均温湿度の推移を図-13に示す。2年目施設の貯蔵環境は6月上旬までは、庫内日平均温度が5℃以下だった。また、日平均湿度は送風機を2台稼働させた5月上旬以降8月末まで約85%を越えて安定していた。貯蔵庫の室温、および外壁温度の測定結果から、平成22年3月25日から7月31日までの129日間で雪山からの供給冷熱量は約5,500kwh(雪換算で約98m³)であった。なお、冷熱量換算は、給気ダクト内の実測風量約520m³/h、貯蔵庫のダクト給気・排気口の冷風温度と外気の温度差0~20℃、貯蔵庫の構造体熱通過率0.65として算出した。

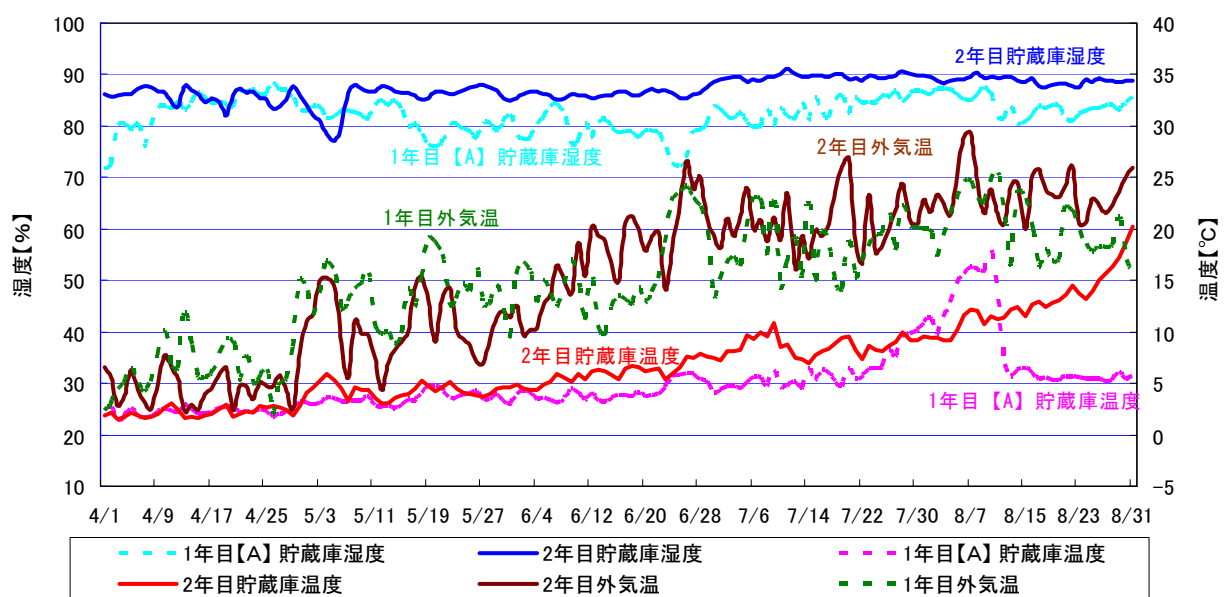


図-13 1、2年目施設の貯蔵庫内における日平均温湿度の推移(4/1~8/31)

3. 結果と考察

3-1 2カ年の貯蔵庫内温湿度の比較

2カ年の試験結果から、1年目施設の貯蔵庫内湿度は、おおむね80%を超えたものの変動が激しく、2年目は、送風機を2台同時稼働した5月初旬以降に85%以上の水準で安定した。これらの結果を詳細に整理するため各施設貯蔵庫内の月平均温湿度を図-14に示した。

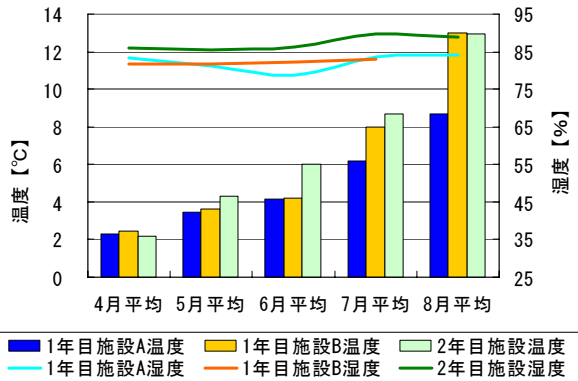


図-14 施設貯蔵庫内の月平均温湿度

図-14によると、4月の貯蔵庫温度は、いずれの施設もほとんど差が無く2℃程度であった。その後5、6月は、各施設温度が上昇し、特に2年目施設の温度上昇の幅が拡大した。さらに、7、8月は1年目施設Bの温度上昇が大きくなった。1年目施設Aは、8月に雪山を集約する7月まで、温度上昇が小さく抑えられたことが分かった。また、2年目の平均湿度は運転開始直後の4月から8月末まで常に高く推移した。この要因として考えられるのは、2年目施設は熱交換部分の容積を増加させたことによって冷気中への加湿空間が増大したことと、送風量増加にともなって熱交換部分での水分蒸発量が增大したことなどが挙げられる。したがって、貯蔵環境に高い湿度を必要とする場合は、熱交換部分の容積、および風量を増大させるなどの方法が有効であることが確認できた。

また、図-13、14から、2カ年の外気温がほぼ変わらないにもかかわらず5月以降の外気温上昇に伴って、2年目施設の貯蔵庫内温度が、1年目施設に比べて約2℃高く推移した。この要因としては、2年

目施設の配管経路が約7m増加したため、この経路における熱損失が増大していたことが考えられる。そこで、図-15に1年目と2年目における冷熱経路の各地点平均温度（4月1日～8月31日）を整理した。

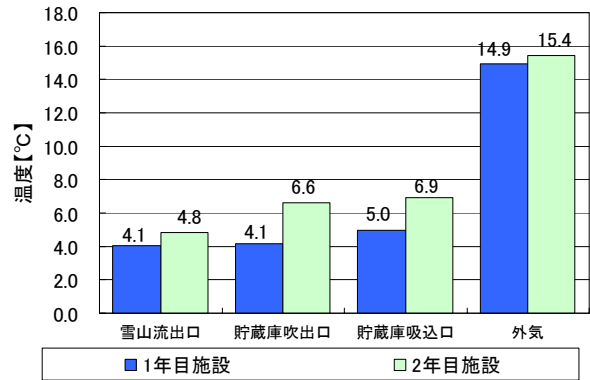


図-15 1年目と2年目における冷熱経路の各地点平均温度（4/1～8/31）

その結果「雪山流出口」と「貯蔵庫吹出口」の温度差がほとんど無かったのに対し、2年目施設は約1.8℃となっており、この間の熱損失が、2年目に増大したことが明らかである。2年目施設は、配管経路延長に伴い1年目施設での配管用保温材厚み40mm対して、保温材を2重に巻き80mmの保温材を施工し、さらにバークチップを厚み約100mm被せた。しかし、比面積の大きい管路では、熱損失の抑制が充分でなかったことから、実際の施設を構築する際は、できるだけ配管経路を短縮させるなどの配慮が必要である。

また、貯蔵庫内温度上昇である「貯蔵庫吹出口」から「貯蔵庫吸込口」間の温度上昇が、1年目は約0.9℃であったのに対し、2年目は0.3℃だった。このことから、貯蔵庫内部の断熱補強は効果的だったことが確認できた。なお、貯蔵庫内の断熱補強により2年目は1日平均で約3.2kwh（雪換算約35kg）の冷熱損失を削減できたものの、配管経路で約9.2kwh（雪換算約99kg）の冷熱損失が増加し、1年目と比べるとトータルで約5.9kwh（雪換算約64kg）の冷熱損失が増大したと考えられる。

また、農産物貯蔵に最適な温度は、一般食用の馬

铃薯で3.3～4.4℃、湿度90～95%⁽⁶⁾とされており、1年目施設においては、いずれの施設でも6月末までほぼ最適な貯蔵環境を維持可能であったが、2年目施設では5月末までだった。これは、配管経路での熱損失、雪山開口部の発生の影響が大きかったと考えられる。なお、馬鈴薯の貯蔵には適合しないものの貯蔵庫内温度約10℃以下、湿度85%以上の低温な貯蔵環境であれば7月末まで維持できることが確認できた。

3-2 雪山の供給冷熱量および熱収支

雪山からの供給冷熱量は、1年目施設で約2,300kwh、2年目施設で約5,500kwhであり、雪の融解潜熱のみ利用したとして雪換算するとそれぞれ約40m³、約98m³であった。これは当初造成した雪山の約10%の雪を冷熱として利用できたことになる。そのうち約65%の冷熱が、貯蔵庫外壁熱通過や貯蔵農産物呼吸熱等として利用され、約35%が配管経路等で損失したと考えられる。なお、1年目施設の雪のうち1割の約50m³が平成21年12月まで残存し、2年目施設の雪山にも再利用できた。

4. おわりに

4-1 雪山維持ランニングコスト

昨年度報文でも述べたように2カ年の試験結果から、いずれの雪山にもバイパス空洞が発生し、雪の融解が早まった。その要因としては、以下の3つが考えられた。

- 要因① 空気循環用配管と雪山の接する箇所の断熱不足。
- 要因② 融雪水排水管出口から雪山に外気進入。
- 要因③ 雪山頂上面に溜まった雨水による集熱作用。

これらの要因のうち、要因①、③の場合は、発生を防止するために雪山に対する定期的なメンテナンスを要し、それにともなって発生するランニングコストを抑制する方法を検討する必要がある。

(1) 雨水対策

本研究では、雪山の設置場所が市街地だったため、パーク材の飛散を防止することと、雨水による融雪対策のために雪山にブルーシートを被覆した。この被覆の効果について確認するために、2年目の実験で、小規模な雪山を2基造成し、ブルーシート被覆した場合とメッシュシート被覆した場合の体積変化、パーク材の飛散状況を観測した。

雪山の体積変化について図-16に整理した。その整理結果から2つの雪山の体積変化に大きな差が認められなかったことから、メッシュシート被覆の場合における雨水による雪の融解量と、ブルーシート被覆の場合におけるシート内部での雪融解量は、差がないことを確認した。

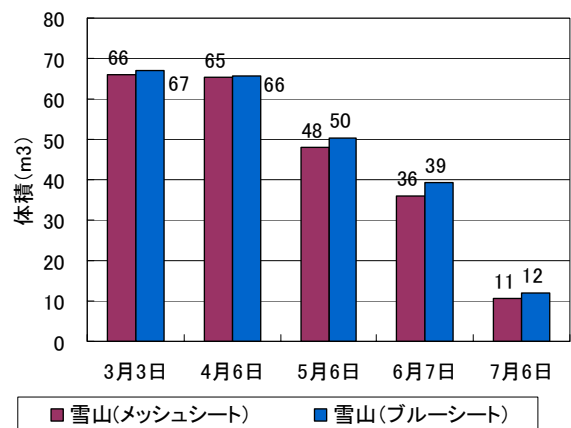


図-16 雪山体積変化

また、今回の実験では、メッシュシートの周辺においてパーク材の著しい飛散は認められなかったことから、飛散防止のためにシートを被覆する場合は、メッシュタイプでも対策が可能であり、この場合、雨水がシート表面に溜まることが無いため、雨水対策コストを削減可能であると考えられる。

(2) 配管接続部対策

1年目の研究施設では、冷熱回収性能などを比較するため空気循環用配管を地上埋設型と地中設置型の2種類施工した。これらの2種類の施工方法における冷熱採取性能は、実験結果から大きな差が認められなかった。他方、地上配置型は、雪山接続部を

切欠とするバイパス空洞が6月初旬に発生しているのが確認された。地中埋設型は、8月中旬まで雪山接続部周辺でバイパス空洞が形成しなかった。これは、配管を地上設置したことで、雪山と配管の接する部分での「配管の熱伝導」が、「地表面の熱伝導」よりも高かったため、そこでの融雪が促進されたことが要因であると考えられる。したがって、配管を地中埋設することで、局所的に融雪が進む箇所がなくなり、バイパス空洞の発生も抑制でき、その補修に係るランニングコストを削減できると考えられる。



図-17 8月11日の地中埋設型配管と雪山の状況

4-2 貯蔵農産物に応じた設計条件

貯蔵農産物は、品目により適切な貯蔵環境が異なる（馬鈴薯・長いもなどは2～4℃で湿度90%以上、穀類・豆類などは15℃以下で湿度60～80%）。また、冷熱供給方式（水冷方式、空冷方式）により得られる貯蔵環境が異なることから、貯蔵農産物に適した方式を選択することが必要となる。

本論文に係る研究事業の他地域で実施した実験では、温度が5～15℃かつ湿度約70%の貯蔵環境が必要な米倉庫について雪山を水冷方式で利用することで、既存倉庫へ導入しやすいことが確認されている。また、空冷式に比べて雪山の崩壊リスクが少ないため、雪山維持のランニングコストも低減できる。一方で、低温度かつ高湿度の貯蔵環境が必要な馬鈴薯・長いもなどは、空冷方式を採用することで高湿度な貯蔵環境が維持できることから、「細胞組織の軟化

防止」、「目減りの抑制」が確認できている。

さらに、長いも・馬鈴薯の貯蔵に関しては、低温長期貯蔵による効果として、従来から知られている「糖度の上昇」、本研究ではさらに、図-18に示すように「ビタミンCの保持」などの付加価値についても明らかになっていることから、貯蔵農産物に対して期待する付加価値についても設計段階の設定条件の要因となる。

本研究は、秋に収穫される北海道産の馬鈴薯を翌年の馬鈴薯収穫時期まで保存することが一つの目標であった。実験では、8月以降はバイパス空洞の発生などにより、安定した冷熱供給ができない状態であったものの、バイパス空洞の発生抑制、雪山保守などによって、雪自体を10月以降まで残存させることは可能であることを確認している。このことから、馬鈴薯を貯蔵する場合、年間を通じて雪で冷蔵する方式、または収穫直後から新たな雪山を造成するまでの期間は電気式冷蔵設備を利用する方式など複数の導入方式が選択肢として考えられる。この場合、貯蔵庫コストを販売価格に反映できない側面もあるため、これらの冷熱の利用方式は、貯蔵コストとの兼ね合いで選定することも重要である。



図-18 空冷式貯蔵環境イメージと貯蔵効果

したがって、農産物貯蔵に雪を利用する方法を適用するためには以下のような設計条件を検討することが必要と考えられる。

- ①環境条件（温度、湿度）
- ②冷熱供給方式
（空冷式、水冷式、電気併用式）
- ③貯蔵期間（通年、夏まで）
- ④貯蔵コストと販売単価
- ⑤付加価値

これらを考慮した設計を行うことで、自然にやさしく効果的な貯蔵システムが導入可能である。

（㈱ズコーシャ）

参考文献

- (1) 北海道経済産業局：Cool Energy 4（雪氷熱エネルギー活用事例集4）、2008. 4.
- (2) 本間弘達、館下誠、川本周朗、媚山政良、金子幸江、新家憲：トラフを利用した風洞式雪山空気冷房の実験報告、2008. 11.
- (3) 川瀬智久：雪を利用した農産物貯蔵システムの研究（北海道土地改良設計技術協会報文集22号 2010. 9）
- (4) 農林水産省：自然冷熱を活用した貯蔵農産物のブランド化と貯蔵システムの開発（中間報告 2010. 10）
- (5) 国土交通省 大臣官房官庁営繕部 設備・環境課：官庁施設における雪冷房システム計画指針、2008. 7
- (6) 大久保増太郎：野菜の鮮度保持（養賢堂発行）

頭首工における魚道施設の機能評価

田中 宏征

1. はじめに

国営かんがい排水事業「びっふ地区」は、旭川市、上川郡鷹栖町、比布町及び愛別町にまたがる受益面積3,232haの稲作を主体とした農業地帯にある。地区の基幹用水施設である愛別川頭首工は、図-1に示すとおり上川総合振興局管内愛別町を流れる一級河川石狩川支流愛別川に位置し、昭和39年に建設された施設である。その後、老朽化等により機能低下を生じてきたため、当該事業により改築に着手し、平成20年3月に魚道を有する新施設の完成に至っている。

事業では、新施設完成後の平成20～21年度に魚道の機能評価を目的とした現地調査を実施し、この調査結果により魚道機能として満足していることを確認している。ただし、一部魚種(ハナカジカ)の遡上率向上が期待できる可能性が示唆されたため、平成22年度においてハナカジカの遡上率向上を目的とした現地実験を行っている。

本報では、愛別川頭首工に設置された魚道の概要と、完成後に実施した魚道機能調査とこれらの結果を踏まえた魚道機能評価を述べるとともに、平成22年度に実施した現地実験とその結果について紹介する。



図-1 愛別川頭首工位置図

2. 魚道計画の概要

愛別川頭首工は、かんがい期には堰上げにより上下流の水位差が1.5m程度生じ、魚類遡上の妨げとなる。

魚道はこの水位差を解消するため計画され、頭首工本体を迂回する「バイパス方式」により取水口対岸の左岸側に設置されている。

魚道形式は、幅員2.50mの「粗石付き斜路式魚道」で、呑口部には一定の流入量を確保するため半円切欠越流堰と潜孔付越流堰が設置され(図-2)、越流堰の下流面には魚類の遡上を助けるためのスリット付きのスロープが設置されている(写真-1)。魚道の設計対象魚種及び基本諸元を表-1に示すとともに、施設平面図を図-3に示す。なお、潜孔付越流堰は、将来、本河川上流に北海道が建設を予定している班溪ダム完成後の河川維持流量増量分を流入させるものであるため、現在は使用していない。平成20年度の魚道機能調査では、一時的に両方の越流堰から魚道内に流入させ、各越流堰の魚類の遡上状況を確認しているが、堰形状の違いによる遡上状況の変化は生じていない。本報では、現在使用している半円切欠越流堰とその下流の粗石付き斜路式魚道を調査対象施設として報告する。

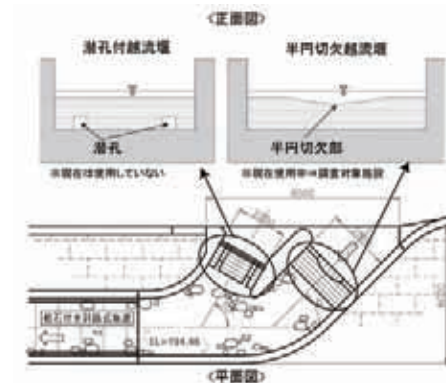


図-2 魚道呑口部形式



通水なし



通水時

写真-1 スリット付きスロープ（半円切欠越流堰）

表-1 魚道設計対象魚種及び基本諸元一覧表

位置	愛別川左岸
魚道形式	粗石付き斜路式魚道
対象魚種	大型遊泳魚(サクラマス(成魚)) 中型遊泳魚(ウグイ、アメマス等) 底生魚(フクドジョウ、ハナカジカ等)
魚道延長	58.0m
幅員	2.5m
水面落差	0.3m(呑口部越流堰) ^{注1)}
魚道勾配	1/25

注1) 後述の評価基準では、隔壁落差の条件において「遡上不可」となるが、本施設では越流堰下流面にスリット式スロープを設置することで遡上が可能となるよう配慮している。



【愛別川頭首工諸元】
 計画高水流量: 500m³/s
 計画高水位: 198.45m
 計画河床高: 193.56m
 計画取水水位: 195.06m
 最大取水量: 13.545m³/s
 かんがい期間: 5月1日～8月31日
 形式: フローティングタイプ
 堰長: 29.80m(頭首工径間長)
 洪水吐: 28.00m×1.9m×1門(ローラゲート)

魚道部

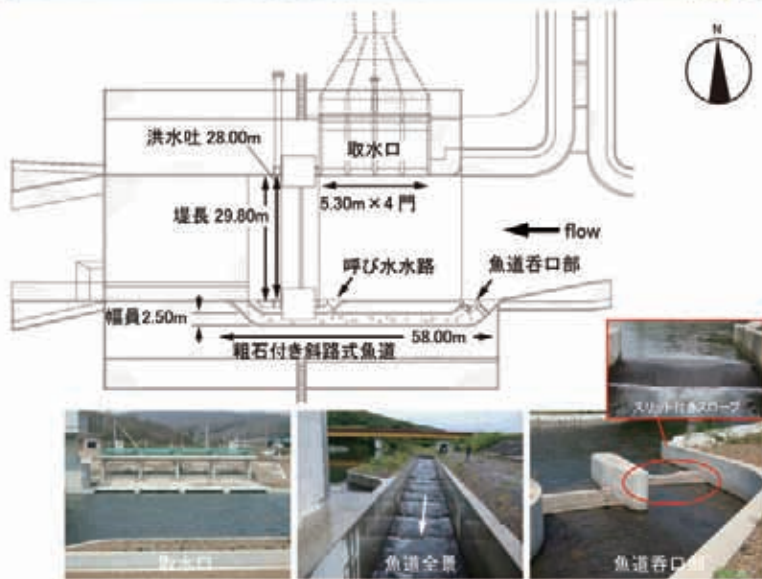


図-3 施設平面図

3. 魚道機能調査

魚道機能調査は、平成20～21年度に実施した。調査時期は、平成20年度はサクラマス遡上期である8月、平成21年度についてはウグイ遡上期である6月～7月とサクラマス遡上期である8月にそれぞれ実

施した。調査項目は表-2に示す魚道各部の水利条件を把握する「魚道流況調査」と、魚道の通過魚を把握する「魚類採捕調査」とした。

以下に平成20～21年度に実施した調査の概要と結果について示す。

表-2 魚道機能調査項目、時期及び魚道水位

調査項目	平成20年度調査			平成21年度調査			
	1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	4回目
魚道流況調査	8/6	8/19	8/28	6/23	7/23	8/9	8/18
魚類採捕調査	8/5～6	8/18～19	8/27～28	6/22～23	7/22～23	8/8～9	8/17～18
魚道呑口水位 WL(調査時)	195.14m	195.04m	195.00m	194.98m	194.98m	194.99m	194.99m

1) 魚道流況調査結果

魚道流況調査は図-4に示す位置に横断測線を設け、越流堰の越流部及び斜路部の水深・流速を計測した。水深計測はスタッフ、流速計測はアレック電子社製の電磁流速計ADM1-Dを使用した。

評価にあたっては、石狩川河口から源流までの堰、床止、ダム等の河川横断施設の魚類の生息環境の現状把握、遡上環境の現状評価と改善方策を検討した「石狩川魚がのぼりやすい川づくり推進モデル事業実施計画書」¹⁾の評価基準(計画書内表2-2及び表2-3)を参考とし、越流堰による水面落差と越流流速及び斜路部の流速を評価項目とした。評価基準を表-3に示す。

平成20年度と平成21年度の魚道流況調査の計測結果を比較すると、平成21年度の魚道呑口部の水位が計画取水位のWL=195.06mと比較してやや低めの条件となっていたことから、魚道内水位及び流速についても平成20年度を下回る計測結果となっている。

魚類に対する評価結果については、水位の増減による大きな差違は生じておらず、中大型遊泳魚からみた場合には全ての調査において「遡上可能(◎)」もしくは「ほぼ遡上できる(○)」と評価された。一方、底生魚(吸盤なし)からみた場合には、魚道

呑口部の水位が計画取水位のWL=195.06mと比較して高い場合(H20、1回目)は、越流流速が半円部で「遡上不可(×)」、矩形部で「やや遡上が困難(△)」との評価となった。また、魚道呑口部の水位が計画取水位と比較して低い場合は、越流部の水面落差条件において「やや遡上が困難(△)」もしくは「遡上不可(×)」との評価となった。(表-4)

ただし、後述する採捕調査では、①底生魚(吸盤なし)であるフクドジョウの遡上が確認されたこと、②底生魚と同様に遊泳力の弱い小型遊泳魚(エゾウグイ 体長8.8cm)の遡上が確認されたことから、越流堰の下流面に設置したスリット付きスロープが有効に機能しているものと評価され、底生魚の遡上は可能であると推察される。

なお、斜路部については緩勾配であり大きな水面落差が発生していないため、流速条件について評価を行ったが、2カ年の調査で全ての対象魚種について「ほぼ遡上できる」と評価される良好な結果となった。

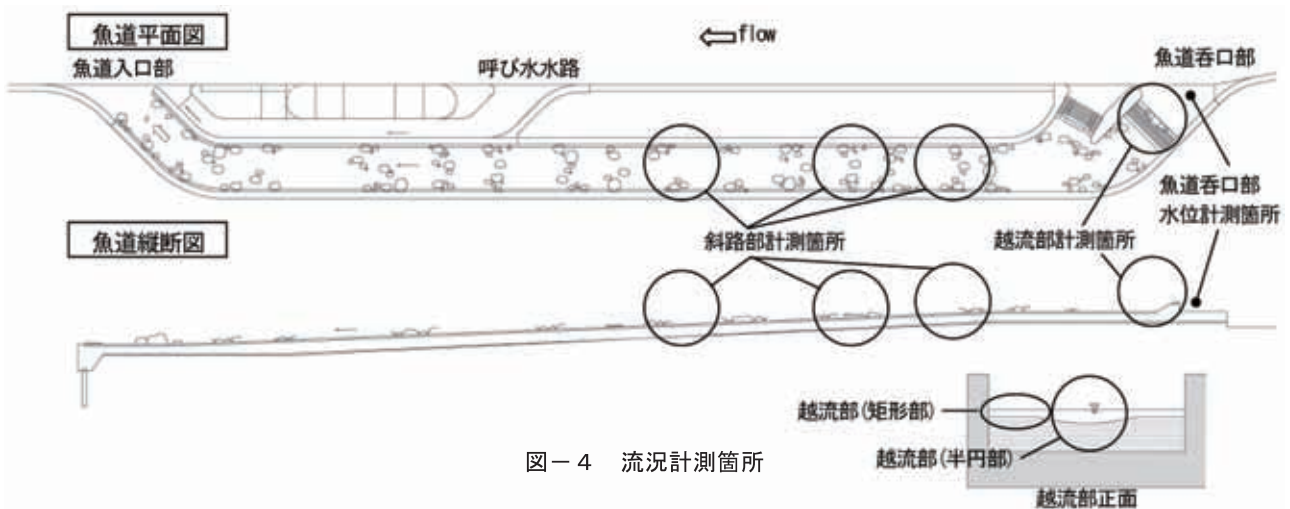


図-4 流況計測箇所

表-3 評価基準値

評価項目	小型遊泳魚 (体長 20cm 未満)		中型遊泳魚 (体長 20~50cm)		大型遊泳魚 (体長 50cm 以上)	
	基準値	評価	基準値	評価	基準値	評価
隔壁落差 (m)	~0.2	◎	~0.3	◎	~0.3	◎
	0.2~0.3	○	0.3~0.4	○	0.3~0.5	○
	0.3~0.4	△	0.4~0.5	△	0.5~0.8	△
	0.4~	×	0.5~	×	0.8~	×
越流流速 (m/sec)	~0.8	◎	~1.0	◎	~1.2	◎
	0.8~1.0	○	1.0~1.5	○	1.2~1.8	○
	1.0~1.2	△	1.5~2.0	△	1.8~4.0	△
	1.2~	×	2.0~	×	4.0~	×

評価項目	吸盤のある底生魚 (カワヤツメ・ヨシノボリ・ウキゴリ)		吸盤のない底生魚 (ハナカジカ・フクドジョウ)	
	基準値	評価	基準値	評価
隔壁落差 (m)	~0.2	○	~0.2	○
	0.2~1.5	△	0.2~0.3	△
	1.5~	×	0.3~	×
越流流速 (m/sec)	~0.8	◎	~0.8	◎
	0.8~1.0	○	0.8~1.0	○
	1.0~1.5	△	1.0~1.2	△
	1.5~	×	1.2~	×

※ ◎: 遡上可能、○: ほぼ遡上できる、△: やや遡上が困難、×: 遡上不可

表-4 魚道流況の評価結果一覧

評価項目	計測箇所	平成20年度調査			平成21年度調査			
		1回目	2回目	3回目	1回目	2回目	3回目	4回目
落差 (m)	越流部	0.18 (◎, ◎, ◎)	0.30 (◎, ○, ×)	0.32 (○, ○, ×)	0.30 (◎, ○, ×)	0.32 (○, ○, ×)	0.29 (◎, ◎, △)	0.31 (○, ○, ×)
	越流部 (半円部)	1.27 (○, ○, ×)	1.01 (◎, ○, △)	0.84 (◎, ◎, ◎)	0.76 (◎, ◎, ◎)	0.59 (◎, ◎, ◎)	0.64 (◎, ◎, ◎)	0.73 (◎, ◎, ◎)
流速 (m/sec)	越流部 (矩形部)	1.08 (○, ○, △)	0.77 (◎, ◎, ◎)	0.51 (◎, ◎, ◎)	0.77 (◎, ◎, ◎)	0.46 (◎, ◎, ◎)	0.38 (◎, ◎, ◎)	0.30 (◎, ◎, ◎)
	斜路部	0.83 (◎, ◎, ◎)	0.66 (◎, ◎, ◎)	0.55 (◎, ◎, ◎)	0.37 (◎, ◎, ◎)	0.46 (◎, ◎, ◎)	0.47 (◎, ◎, ◎)	0.45 (◎, ◎, ◎)

※ () 内評価については(大型遊泳魚、中型遊泳魚、底生魚(吸盤なし))の順

2) 魚類採捕調査結果

魚類採捕調査は、図-5に示す魚道の呑口部に遡上魚捕獲用トラップを24時間設置し、魚道を遡上した魚類を採捕した(写真-2)。また、トラップ撤去後は、魚道内に残留する魚類を電気ショッカー等で全量採捕し、調査結果を補完した(写真-3)。



写真-2 トラップ設置状況



写真-3 魚道内採捕状況写真

調査結果は表-5に示すとおり、2カ年全体で4科7種が採捕され、設計対象魚種であるサクラマス(大型遊泳魚)、ウグイ(中型遊泳魚)及びフクドジョウ(底生魚(吸盤なし))等の魚道遡上が確認された。

年度別の確認状況を比較すると、平成21年度は種数及び個体数ともに平成20年度に比べて増加しているが、①調査回数を増やしたこと、②ウグイ類などの遡上産卵期である春季(6月)に調査を実施した

こと等が反映されたものと考える。

ここで、魚道内で確認されたがトラップでは採捕されなかった魚類をみると、サクラマス(成魚)及びハナカジカの2種^{注2)}となる。

サクラマス(成魚)については、上述の評価基準において大型遊泳魚と同一の体長区分(40cm以上)となるアメマス(尾叉長41.8cm、写真-4)の遡上が確認されていることや、評価基準で当該種より遊泳能力が低く位置付けられているウグイやサクラマス(幼魚)など中小型遊泳魚の遡上を確認していることから遡上は可能と推察する。

ハナカジカについては、同じ底生魚(吸盤なし)



写真-4 魚類調査採捕結果
(平成21年度第1回目)

であるフクドジョウの遡上を確認していることから、底生魚の遡上は可能であると推察されるものの、魚道内での個体残存状況や、流況からみた評価で「やや遡上が困難」もしくは「遡上不可」となることを勘案すると、魚道呑口部における越流堰での水面落差を小さくすることで、遡上率が向上する可能性が考えられた。

注2) 本調査では上記種のほかドジョウ及び底生魚1種が確認されているが、ドジョウは上流のダム湖などからの迷入種と推察されること、底生魚1種は希少生物であること及びこれを明記しても本施設の評価に影響を及ぼすものではないことから確認種から除外した。

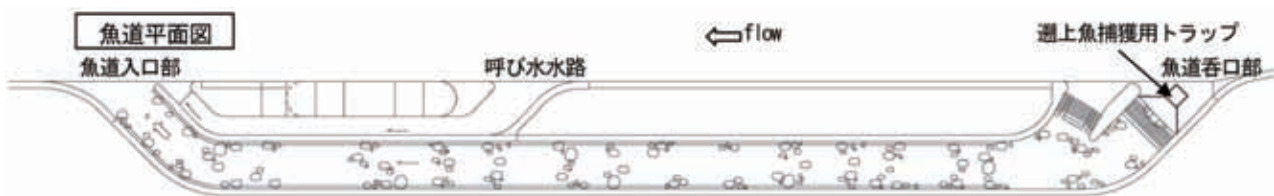


図-5 トラップ調査位置

表-5 魚類採捕結果 (平成20、21年度)

(尾)

科名	種名	平成20年度		平成21年度	
		トラップ	魚道内	トラップ	魚道内
コイ	エゾウグイ	4	1	31	6
	ウグイ	3		12	
ドジョウ	フクドジョウ	2	18	7	28
サケ	アメマス			1	
	ニジマス	1	4	10	23
	サクラマス(成魚)		2		
	サクラマス(幼魚)	1	1	6	3
カジカ	ハナカジカ		19		61
合計種数		5	5	6	5
H20, 21 全体		4科7種			

4. 現地実験内容と評価結果

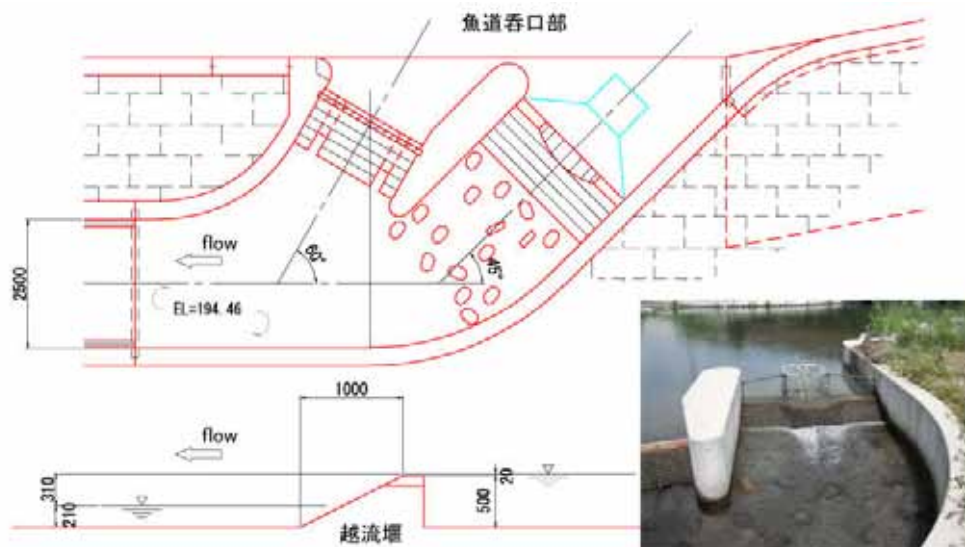
平成20～21年度の結果を踏まえ、ハナカジカの遡上率を向上させることを目的とした現地実験を平成22年度に実施した。実験では、魚道呑口部の越流堰下流に土のう及び玉石を設置して嵩上げを行い、越流堰での水面落差を小さくすることで遡上を促すこととした。現地実験の施設状況を図-6に示す。

現地実験の評価にあたっては、過年度と同様の「魚道流況調査」と「魚類採捕調査」の魚道機能調査の結果により行うこととし、調査は計2回実施した。1回目については、過年度と同様の条件(変更なし)で魚類の遡上状況を再確認し、2回目に越流堰の水面落差を軽減した条件下で調査を実施した。表-6に調査時期及び調査時の魚道水位等を示す。

表-6 現地実験時における時期及び魚道水位

調査項目	平成22年度調査	
	1回目	2回目
調査条件	変更なし (過年度と同様)	変更あり (越流堰追加設置)
魚道流況調査	6/30	7/16
魚類採捕調査	6/29～30	7/15～16
魚道呑口水位 WL(調査時)	195.00m	194.99m

通常時



実験時(水面落差軽減時)

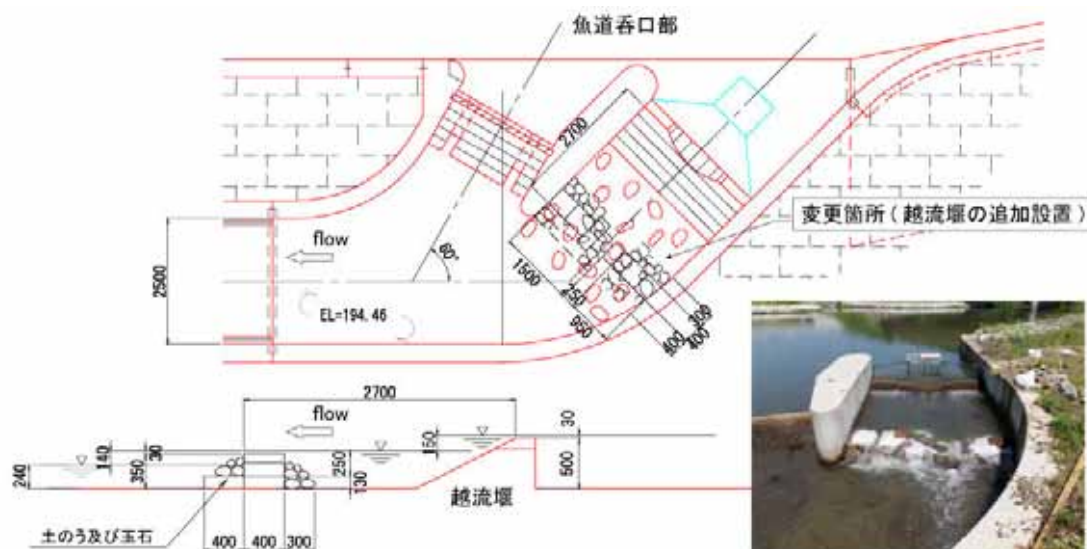


図-6 現地実験における魚道施設の状況

1) 魚道流況調査

計測結果と前述の評価基準(表-3)を用いた評価結果を表-7に示す。この結果、1回目(変更なし)については、過年度と同様に越流部の落差条件が底生魚(吸盤なし)からみた場合、「遡上不可」との評価となった。一方、2回目(変更あり)については、底生魚(吸盤なし)の遡上条件である水面落差30cm未満の条件を満足することから、中大型遊泳魚から底生魚まで遡上が可能との評価となった。

表-7 魚道流況の評価結果一覧

評価項目	計測箇所	調査日(平成22年度)	
		1回目	2回目
落差(m)	越流部	0.35 (○, ○, ×)	0.18 (◎, ◎, ◎)
	越流部(半円部)	0.53 (◎, ◎, ◎)	0.44 (◎, ◎, ◎)
流速(m/s)	越流部(矩形部)	0.71 (◎, ◎, ◎)	0.67 (◎, ◎, ◎)
	斜路部	0.51 (◎, ◎, ◎)	0.46 (◎, ◎, ◎)

※ 評価については(大型遊泳魚、中型遊泳魚、底生魚(吸盤なし))の順

2) 魚類採捕調査結果

採捕結果を表－8に示す。調査の合計では過年度に確認された魚種のうち、ウグイを除く4科6種の魚類が確認された。ここで、これまで魚道呑口部のトラップで採捕されていないハナカジカの確認状況を見ると、1回目調査（変更なし）では、過年度と同様にハナカジカは確認されなかった。一方、2回目（変更あり）では当該種の遡上が3カ年の調査で初めて確認された。他魚種の確認状況については、調査回別の大きな差違はみられなかった。

以上を踏まえると、現状の施設については設計対象魚種の遡上が可能な施設であると評価されるものの、底生魚（吸盤なし）のハナカジカについては、現状の魚道呑口部の水面落差を軽減することで、当該種がより遡上しやすい施設になる可能性があることが示唆された。

ただし、遡上を確認した施設条件下においても、魚道内の残存個体数に対しトラップ調査で採捕した個体数が少ないことを踏まえると、積極的に遡上しようとする個体が少なく、当該施設の魚道を生息場として選好している可能性も考えられる。

表－8 魚類採捕結果(平成22年度) (尾)

科名	魚種	1回目		2回目	
		トラップ	魚道内	トラップ	魚道内
ウグイ	エゾウグイ	3		3	
ドジョウ	フクドジョウ		1	2	
サケ	アメマス	1			
	ニジマス	4	4	11	24
	サクラマス(幼魚)	2	1	2	3
カジカ	ハナカジカ		32	3	61
合計種数		4	4	5	3
H22 全体		4科6種			

5. まとめ

- 大型遊泳魚及び中型遊泳魚に関しては、魚道流況調査及び採捕調査とも良好な結果を得られ、遡上に問題はないと評価される。
- 遊泳力の弱い底生魚（吸盤なし）に関しては、引用した評価基準値では、水面落差が「やや遡上が困難」もしくは「遡上不可」との評価になるが、採捕調査によりフクドジョウ（底生魚（吸盤なし））や小型遊泳魚の遡上を確認したことから、越流堰下流面に設置されたスリット付きスロープが有効に機能し、底生魚の遡上は可能であると推察される。
- 底生魚（吸盤なし）のうちハナカジカについては、現状の魚道呑口部の水面落差を軽減することで、当該種がより遡上しやすい施設になる可能性があることが示唆された。
- ただし、遡上を確認した施設条件下においても、魚道内の残存個体数に対しトラップ調査で採捕した個体数が少ないことを踏まえると、積極的に遡上しようとする個体が少なく、当該施設の魚道を生息場として選好している可能性も考えられる。

6. おわりに

近年、土地改良施設の魚道整備においては、既往事例や最新知見を踏まえた様々な形式の魚道が整備されつつあるが、今後は本施設のモニタリング調査を一例とし、設計の妥当性や工夫の有効性のほか、魚道の問題点・改善点等を検証することで、後発事業や同種施設の計画設計に有用な知見の蓄積を図れば良いと考える。

最後に、本調査に際し多大なご助言をいただいた北海道大学北方生物圏フィールド科学センターの上田宏教授、本稿の紹介にあたり様々なご協力をいただいた北海道開発局旭川開発建設部旭川農業事務所及び独立行政法人土木研究所寒地土木研究所には深くお礼を申し上げる次第である。

引用文献

- 1) 北海道開発局、北海道：石狩川魚がのぼりやすい川づくり推進事業実施計画書（1999）

(株ドーコン)

連結ブロックの健全度評価手法

菅 睦三

1. はじめに

調査・設計段階において、排水路等の護岸工に使用されている連結ブロックの再利用率や健全度を把握することは、施工コストやコストの変動を縮減する上で重要である。

しかしながら、連結ブロックの劣化は、目視できるひび割れや破損、磨耗の程度のほかに、目視できない含胴線の連結孔周辺で凍害によるひび割れが生じている場合があり、外観のみの調査での確な健全度判定や再利用率の推定精度を上げることは困難である。このため、連結ブロックをハンマーで打撃し、その音色や反発強度から健全性を推定し補完しているものの、その判断基準が定性的であるなど様々な課題がある。

そこで本報は、健全な連結ブロックとクラックなどの欠陥が存在する連結ブロックにハンマーを打撃した際に発生する音の「高さ（周波数）」「強さ（音圧）」「長さ（継続時間）」、また、コンクリートの「応答波形」に違いがあることに着目し、これを数値的に整理して客観性を持たせて定量的評価を行った試みについて紹介するものである。

2. 音響解析による健全度判定

(1) 評価基準の設定

ハンマー打撃による構造物の健全度評価は手軽に実施できるため広く用いられているが、聴覚による打音の判定は、「高さ（周波数）」「強さ（音圧）」「長さ（継続時間）」が複合した音の特徴（音色）により行うもので、個人差が表れ易いといった弊害がある。

そこで、打音による判定において、音の周波数や継続時間を分析することで、より客観性を持たせる

ことができるのではないかと考えた。

連結ブロックは、含胴線を通す孔があるため、充実断面の連結ブロックに比べて波形の継続時間が長く、また低い周波数成分が多くなるといった傾向があり、潜在的なひび割れがある場合にはさらに、たわみ振動により波形の継続時間や低周波成分が卓越しやすい。

そこで、この特徴を視覚的に把握することで、聴覚に頼った判定に比べて、より客観性をもたせるものとした。

視覚的に表現する方法は、打音調査で発生する音をマイクロフォンで収録、収録した音をウェーブレット変換^{*1}により、スカログラム^{*2}とパワースペクトル^{*3}で表現して判定する手法とした。

※1：ウェーブレット変換

フーリエ変換によって周波数特性を求めるときに失われる時間領域の情報を、この変換においては残すことを可能とし、経時的な周波数特性を表現することができる解析

※2：スカログラム

ウェーブレット変換の結果で分析された周波数成分、音圧レベルについて時間経過の変化をマップで表現したもの

※3：パワースペクトル

ある段階の波形がもつ周波数成分と音圧レベルの特徴を表現したもの

健全度の判定基準は、ひび割れが発生しているコンクリートブロックと健全なコンクリートブロックをサンプルブロックとして調査現場で選定し、それぞれのブロックをハンマーで打撃して得られた音を解析し、その特徴から設定した。

判定基準として採取した音の解析結果と特徴は、図2.1.1、図2.1.2のとおり。

音の特徴から、判定基準を次のとおり設定した。

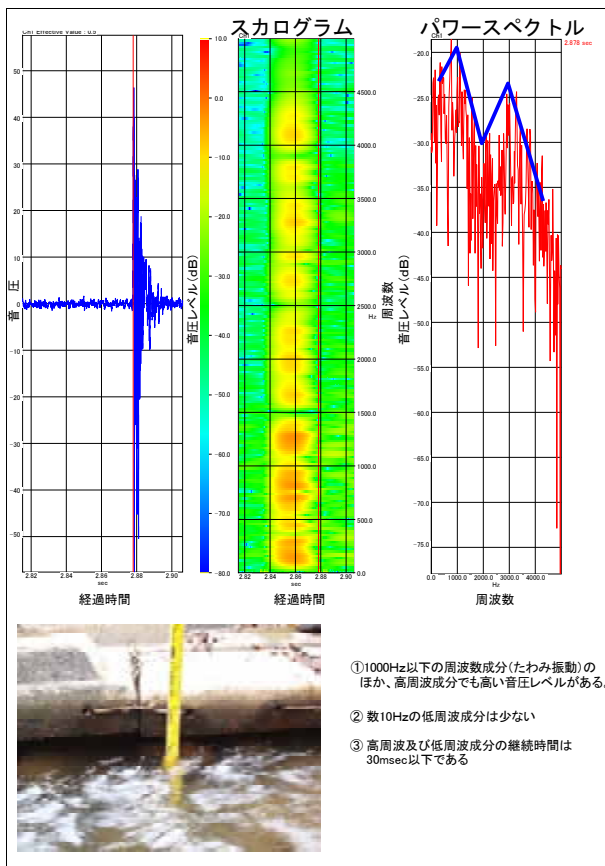


図2.1.1 健全なブロックの解析結果

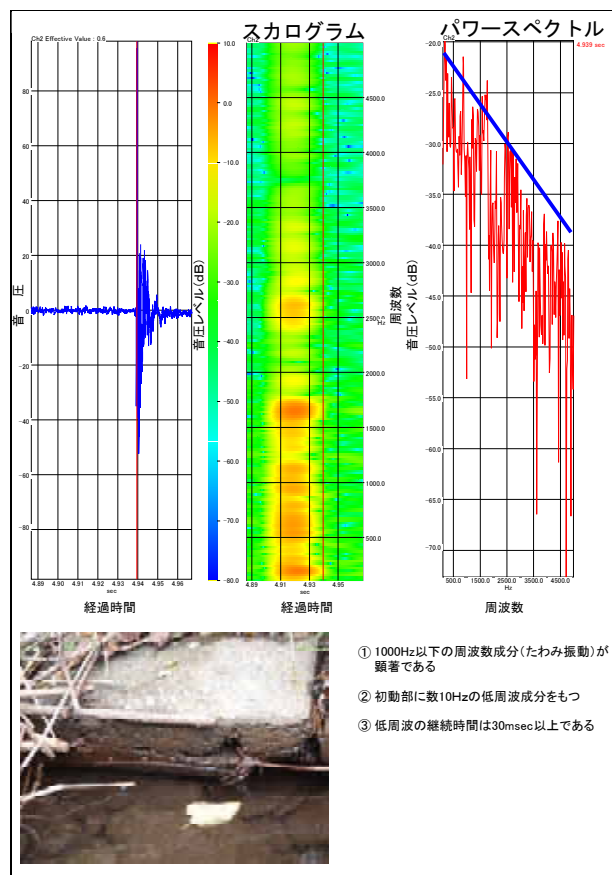


図2.1.2 ひび割れのあるブロックの解析結果

表2.1.1 ブロック健全度の判定基準

健全度	判定基準
優	1000Hz以上の高周波成分が卓越し、継続時間が30msec以下
良	1000Hz以上の高周波成分の外、数10~100Hzの突出した低周波成分が存在し、継続時間は30msec以下
可	1000Hz以上の高周波成分の外、数100Hzの低周波成分が顕著であるものの、継続時間は30msec以上 数100Hzの低周波成分が顕著である外、1000Hz以上の突出した高周波成分が存在し、継続時間は30msec以下
不可	数100Hz以下の低周波成分の存在が主体で、継続時間が30msec以上

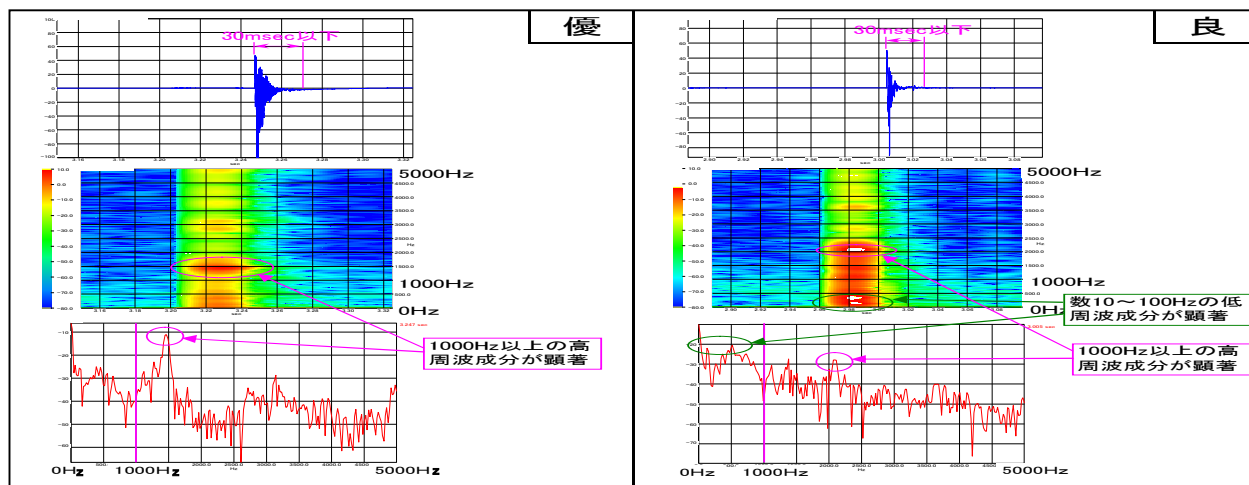


図2.1.3 ブロック健全度と解析結果の特徴(優・良)

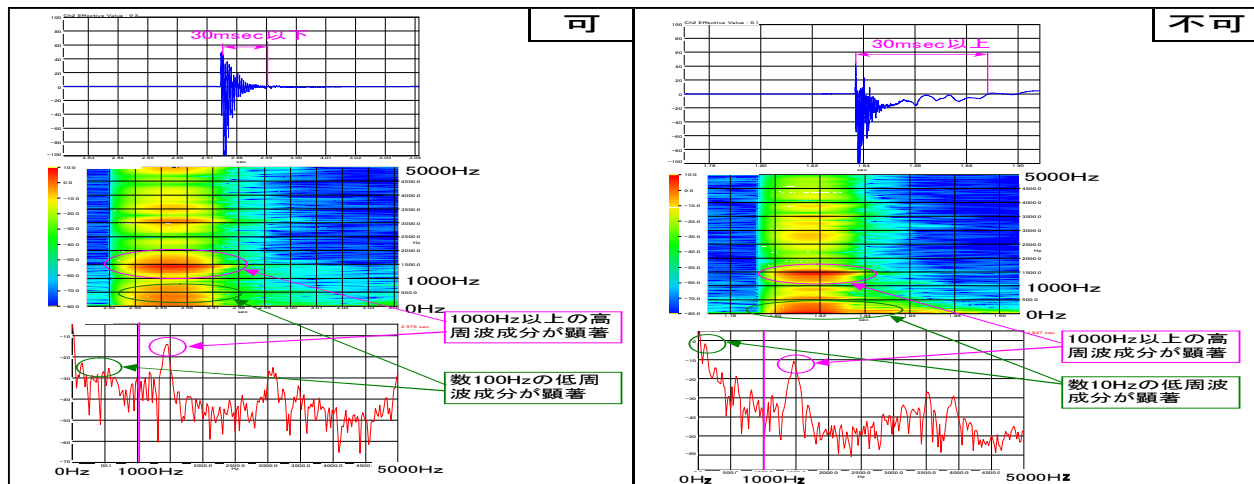


図2.1.4 ブロック健全度と解析結果の特徴（可・不可）

(2) サンプル数の設定

現地踏査の目視確認では、際立ったコンクリートブロックの劣化は確認されなかったため、不良なコンクリートブロックの割合はせいぜい10%程度と考え、信頼度95%、誤差率を5～10%程度とすることを前提に次式により必要なサンプル数を算定した。

$$n = \frac{Z_{ci}^2 \cdot P \cdot (1-P)}{M^2}$$

n: サンプル数

Z_{ci}: 信頼度95%のときZ_{ci}=1.960

P: 不良率 (10%程度を想定)

M: 誤差率 (5～10%)

$$n = \frac{1.96^2 \times 0.1 \times (1-0.1)}{(0.05 \sim 0.10)^2} = 35 \sim 138 \text{個}$$

左記より、平ブロック32個及び凸ブロック16個、合計48個をサンプルに、コンクリートブロックの再利用率を検討するものとした。

48個のコンクリートブロックを対象とした場合

不良率10%のときの誤差率 ⇒ 8.5%

不良率15%のときの誤差率 ⇒ 10.1%

(3) 再利用率の判定

再利用率の判定は、表2.1.1、図2.1.3及び図2.1.4で設定した健全度の評価基準に加え、コンクリートテスターでブロックを打撃し、その反発度から推定される強度が15N/mm²以上を健全、これ未満を不良として扱うものとした。

サンプルとした連結ブロックの状況を図2.3.1に、また、健全度の判定結果を表2.3.1に示す。

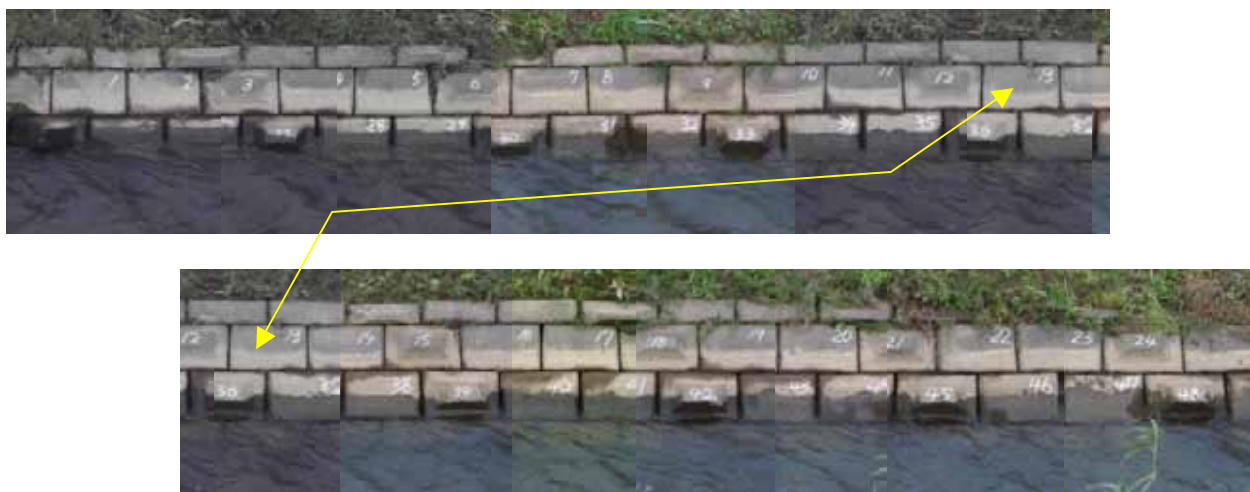


図2.3.1 サンプルとした連結ブロックの状況

表2.3.1 サンプルブロックの判定結果

検計項目	上 段																							
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No. 10	No. 11	No. 12	No. 13	No. 14	No. 15	No. 16	No. 17	No. 18	No. 19	No. 20	No. 21	No. 22	No. 23	No. 24
1000Hz以上の高周波成分が顕著	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
数100Hzの低周波成分が顕著	×	×	○	×	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	
数10Hzの低周波成分が顕著	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	
継続時間が30msec以下	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
コンクリートブロックの健全度評価	良	良	良	良	優	良	優	良	可	優	良	良	優	良	良	不可	良	不可	良	良	良	不可	優	
コンクリート推定強度 (N/mm ²) [コンクリートテスターによる]	26.9	34.2	21.4	31.6	23.8	18.5	26.8	23.2	28.4	25.5	34.9	22.8	18.6	39.6	49.6	39.9	29.5	35.4	36.6	32.7	22.5	43.5	27.9	21.3
総合評価(再利用の可否)	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	否	可	否	可	可	可	可
検計項目	下 段																							
	No. 25	No. 26	No. 27	No. 28	No. 29	No. 30	No. 31	No. 32	No. 33	No. 34	No. 35	No. 36	No. 37	No. 38	No. 39	No. 40	No. 41	No. 42	No. 43	No. 44	No. 45	No. 46	No. 47	No. 48
1000Hz以上の高周波成分が顕著	○	○	○	△	○	○	○	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	△	○	○	○	○
数100Hzの低周波成分が顕著	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
数10Hzの低周波成分が顕著	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
継続時間が30msec以下	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	
コンクリートブロックの健全度評価	良	良	良	不可	良	良	優	可	良	良	良	良	良	良	良	不可	良	可	良	良	良	良	良	
コンクリート推定強度 (N/mm ²) [コンクリートテスターによる]	23.5	24.9	19.1	25.5	34.5	22.2	32.5	23.0	31.2	24.3	36.5	19.4	25.8	29.2	28.2	24.1	30.8	23.1	26.0	30.8	56.7	44.9	17.7	30.5
総合評価(再利用の可否)	可	可	可	否	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可	可

判定の結果、サンプルブロック48個のうち、健全なブロック43個、不良なブロック5個と判定され、90%程度再利用が期待できるものと判断した。

3. 衝撃弾性波による健全度判定

(1) 衝撃弾性波法の基本原理

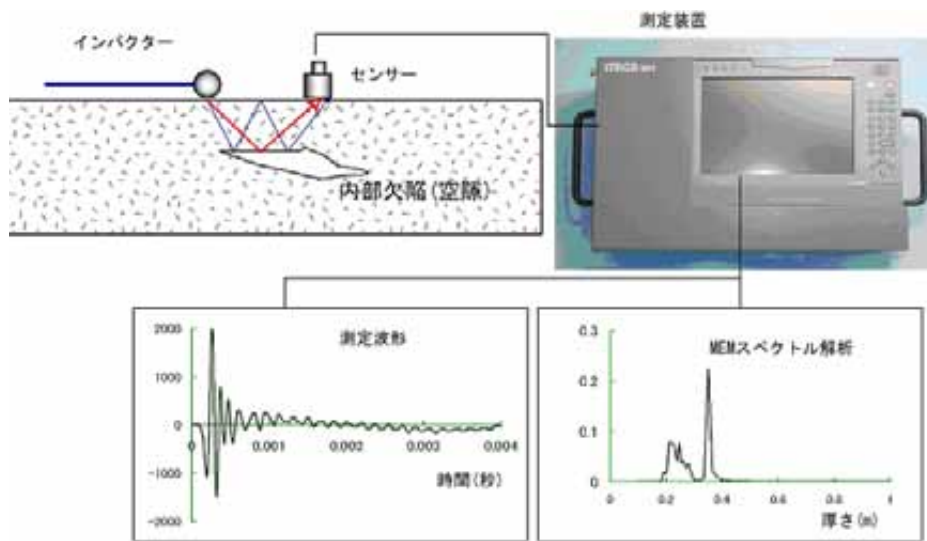


図3.1.1 衝撃弾性波法の基本原理

衝撃弾性波法の原理と信号処理の内容は、図3.1.1及び図3.1.2に示すとおりである。

測定器は、写真3.1.1に示すiTECS-4を使用し、弾性波の入力には直径10mmの鋼球インパクターを使用した。(写真3.1.2)。

測定は、調査区域のブロックをサンプリングして、ブロックの中央の1箇所を鋼球インパクターで打撃した際に得られる速度波形の特徴から健全度を評価するものとした。

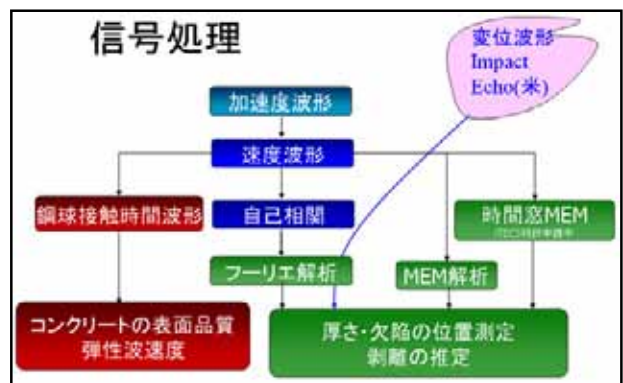


図3.1.2 iTECSの信号処理の内容



写真3.1.1 iTECS-4



写真3.1.2 インパクト

(2) サンプルブロック数とひび割れ状況

調査対象のブロック全量は約20,000個であり、ブロックに発生したひび割れ等を把握するために全ブロックを取り外して調査するには、費用および日数が多大となる。

そこで効果的に健全度を把握するため、代表して一部のエリアの抜き取り調査を実施してひび割れの傾向を把握し、ブロックの再利用率の程度と全量調査へ向けた調査方法を検討するものとした。

現地概査では、ブロックの表面から損傷が確認できるものが5%程度、これに損傷を受けてはいるものの、表面からは確認できないものが同程度あるものと考え、全体に占める損傷を受けたブロックの割り合い（不良率）を10%程度と想定した。

サンプリング調査の信頼度を十分に高めるため、信頼度95%、誤差率を3%程度とすることを前提に、次式により必要なサンプル数を算定した。

$$M = Z_{ci} \cdot \sqrt{\{p \cdot (1 - p) / n\}}$$

M：誤差率（3%とする）

Z_{ci}：信頼度95%のときZ_{ci}=1.960

p：不良率（10%について検討）

n：サンプル数

前式をサンプル数について整理すると下式のとおりに表現できる。

$$n = \frac{Z_{ci}^2 \cdot P \cdot (1 - P)}{M^2}$$

前式に、Z_{ci}=1.960, P=0.10, M=0.03を代入してnを算定するとn=384個となる。

施工されているブロックは6個/m²使用で、サンプルリングのためには64m²の抜き取り調査が必要となり、これを満足する平面部6.0m×6.0m、斜面部6.0m×5.0mのエリアを抜き取り調査範囲とした。（サンプルブロック数396個）

調査対象のブロック396個（含胴線孔数792孔）に発生しているひび割れ形態は表3.2.1に示す分類で、含胴線の孔から下向きに発生しているひび割れはなかった。また、表面にひび割れは生じていないものの、水平方向のひび割れが認められるものが0.8%あった。

表3.2.1 ひび割れ形態の分類

形状	表面からひび割れの確認が不可能			表面からひび割れの確認が可能			
	1	2	3	4	5	6	7
平坦部 216個×2孔=432孔	403	1	2	17	1	1	7
斜面部 180個×2孔=360孔	334	3	0	9	5	0	9
合計	737	4	2	26	6	1	16
全体に対する比率	93.0%	0.5%	0.3%	3.3%	0.8%	0.1%	2.0%
		0.8%			6.2%		
表面ひび割れの有無に対する比率	99.20%	0.8%		53.1%	46.9%		
表面ヘアクラック(開孔)0				42箇所(全表面ひび割れに対する比率:81%)			

(3) 衝撃弾性波形とブロックの健全度

ブロックの健全性評価に衝撃弾性波法の適用を試行するため、サンプリング調査したブロック個々の衝撃弾性波の速度波形を計測した。

ブロックを打撃して得られた実際の速度波形を以下の図に示す。

図3.3.1は、目視でひび割れが確認されなかったブロックの速度波形、図3.3.2は表面にひび割れが発生し、内部にも水平方向にひび割れが発生しているブロックの速度波形、図3.3.3は表面にひび割れが発生しているものの、内部にはひび割れが発生していないブロックの速度波形である。

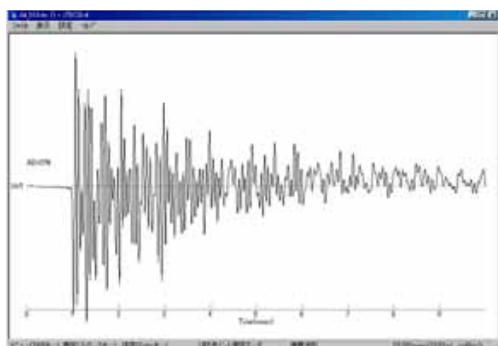


図3.3.1 健全なブロックの速度波形

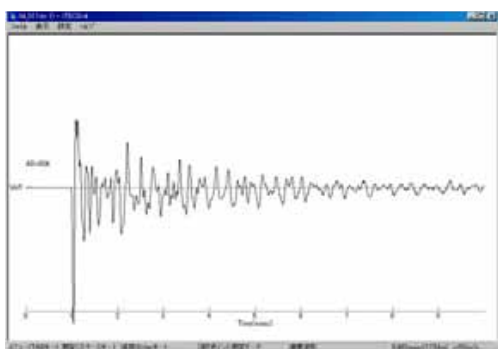


図3.3.2 水平ひび割れのあるブロックの速度波形



写真3.3.1 水平ひび割れの状況

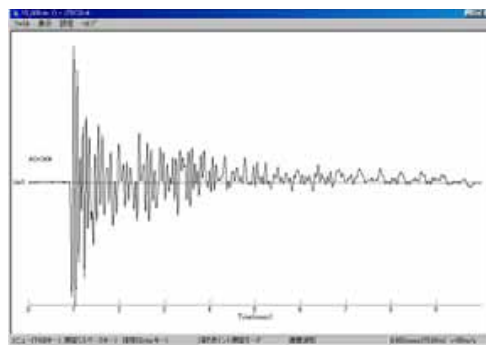


図3.3.3 表面ひび割れのあるブロックの速度波形



写真3.3.1 表面ひび割れの状況

健全なブロックの速度波形に比べ、図3.3.2のブロックの速度波形は明らかに異常を示していた。しかし、図3.3.3のブロックの速度波形は健全なブロックと明瞭な違いはなく、ある数値としての客観的な評価基準を作成する必要があった。

周波数解析では、図3.3.2のブロックのように明らかに健全なブロックと異なる波形が観測されれば低い周波数が卓越するため判断は容易であるが、図3.3.3のブロックのような波形の場合、周波数解析のみでは判断が非常に困難である。

そこで、ひび割れなどの欠陥が存在する場合、衝撃弾性波の応答波形に違いが現れると考えられることから、速度波形による判定が不明瞭なものについては、応答波形の違いを自己回帰モデルからの残差を分析することによって、抽出する解析方法で判定することを検討した。

(4) 欠陥状態と波形

測定・解析に際しては、各ブロックで同じ測定を行い、応答波形の違いからクラックの有無を判断するという方法を用いた。

具体的には、健全なブロックの応答波形を基準波形として自己回帰係数を求め、その自己回帰係数を利用し、比較したい波形を説明変数とした予測値を算出する。

次に、比較したい波形と予測値との残差 $X(i)$ を求め、 $X(i)$ と $X(i+n)$ を直角座標に配置し、相関係数を求め、比較したい波形のパワーに対する残差のパワー比率を算出する。

そして、相関係数および残差パワー比率の大小により応答波形に有意な違いがあるか検討するという方法である。

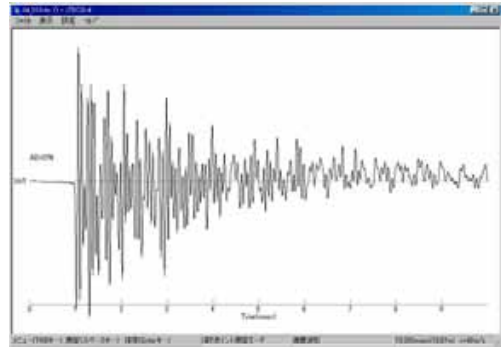


図3.4.1 基準波形

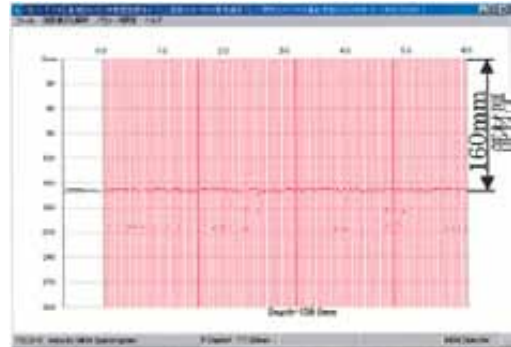
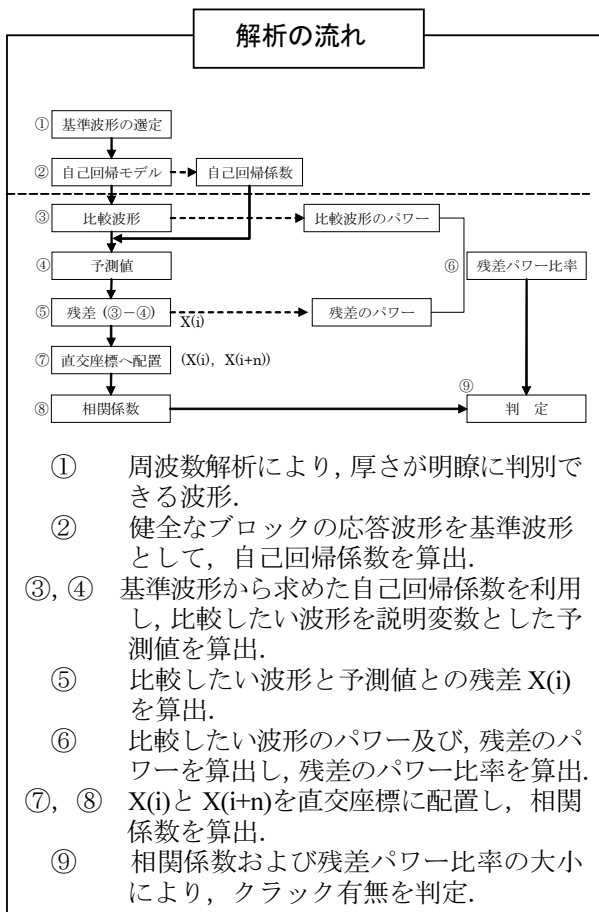


図3.4.2 基準波形のスペクトログラム



測定に先立ち、基準波形および評価基準を作成した。基準波形は、健全なブロックより得られた波形から、周波数解析により部材厚さが明瞭に判別できる波形とした(図3.4.1、3.4.2)。

評価基準の作成は、目視調査においてひび割れが確認されないブロック、および周波数解析結果が比較的安定しているブロックを15個抜き出し、自己回帰モデルからの残差分析を行い、その平均値と標準偏差から判定基準(閾値)を作成した。

判定基準を表3.4.1に示す。

表3.4.1 判定基準(閾値)

No.	相関係数	残差パワー比率
1	0.1401	0.0362
2	0.2635	0.1149
3	0.0723	0.0378
4	0.1556	0.0461
5	0.1783	0.0270
6	0.3583	0.0653
7	0.2170	0.1734
8	0.0046	0.0447
9	0.1800	0.0668
10	0.1505	0.0722
11	0.2386	0.0477
12	0.0530	0.0328
13	0.0496	0.0279
14	0.0175	0.0514
15	0.1498	0.0283
平均値 Ave	0.1486	0.0582
標準偏差 σ	0.0981	0.0393
閾値(Ave+ σ)	0.2466	0.0975

ブロックの健全性は、相関係数および残差パワー比率の両者が閾値以下であることを評価指標とした。

(5) 解析結果と調査精度

表3.5.1に調査の解析結果と目視判定による健全度評価結果を示す。

対象は、判定基準の設定に用いた以外のブロックで、目視で表面にひび割れが発生しているブロックを20個とし、ひび割れが表面のみで内部まで及んでいないサンプルは健全と評価した。

目視判定と数値判定の結果は同一となり、的中率は100%であった。

表3.5.1 判定基準（閾値）

No.	相関係数	残差パワー比率	数値判定	目視判定
閾値	0.2466	0.0975		
①	0.1452	0.0379	○	○
②	0.1445	0.1184	×	×
③	0.7273	0.1791	×	×
④	0.313	0.1344	×	×
⑤	0.0856	0.1416	×	×
⑥	0.0645	0.0437	○	○
⑦	0.0988	0.0993	×	×
⑧	0.1091	0.0522	○	○
⑨	0.1209	0.065	○	○
⑩	0.2166	0.1864	×	×
⑪	0.0429	0.3107	×	×
⑫	0.1487	0.1148	×	×
⑬	0.1127	0.1203	×	×
⑭	0.2969	0.02151	×	×
⑮	0.1457	0.1495	×	×
⑯	0.0246	0.0453	○	○
⑰	0.1391	0.0301	○	○
⑱	0.1067	0.0781	○	○
⑲	0.3274	0.1491	×	×
⑳	0.1249	0.0555	○	○

※ 数値判定は、相関係数および残差パワー比率とも閾値以下のとき、健全(○)としている

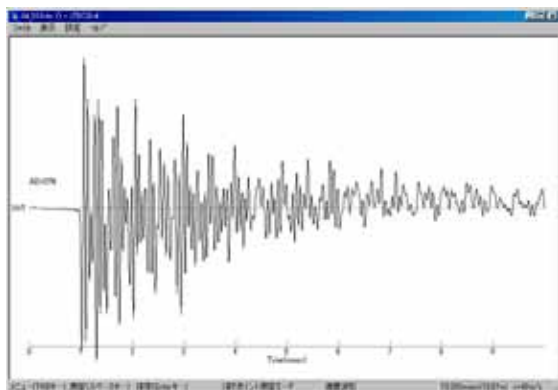


図3.5.1 基準波形

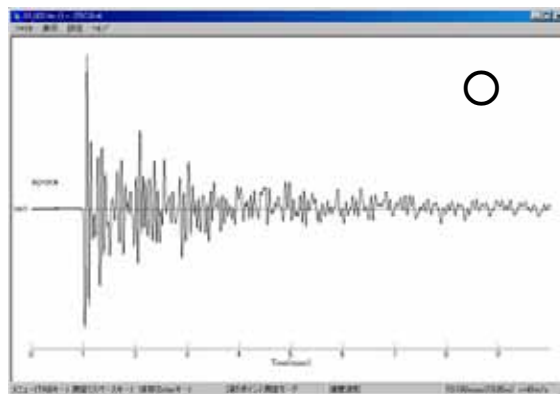


図3.5.2 ①ブロック

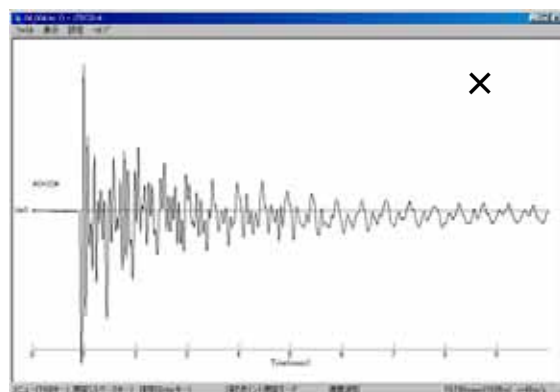


図3.5.3 ②ブロック

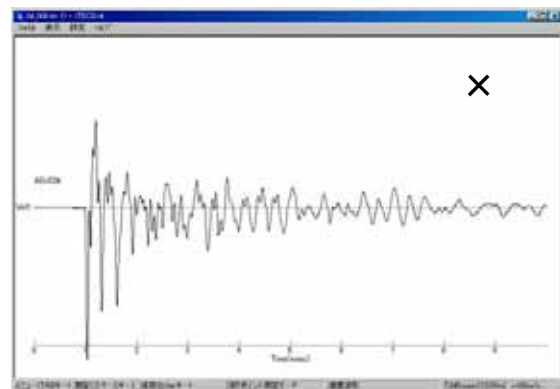


図3.5.4 ③ブロック

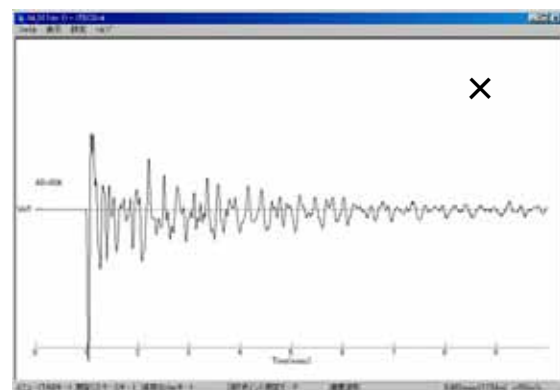


図3.5.5 ④ブロック

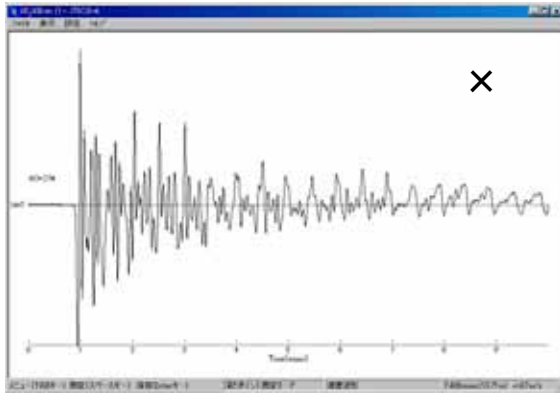


図3.5.6 ⑤ブロック

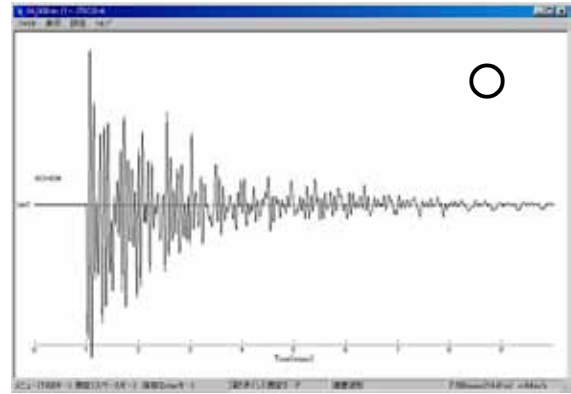


図3.5.10 ⑨ブロック

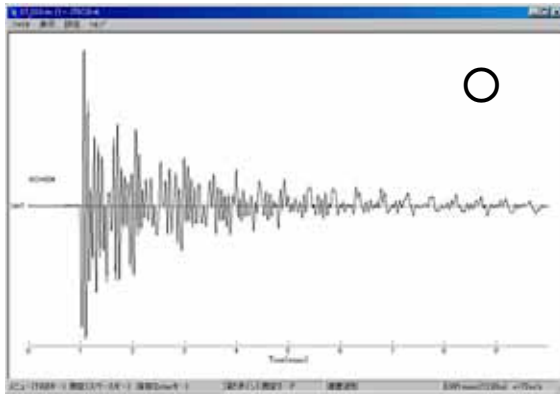


図3.5.7 ⑥ブロック

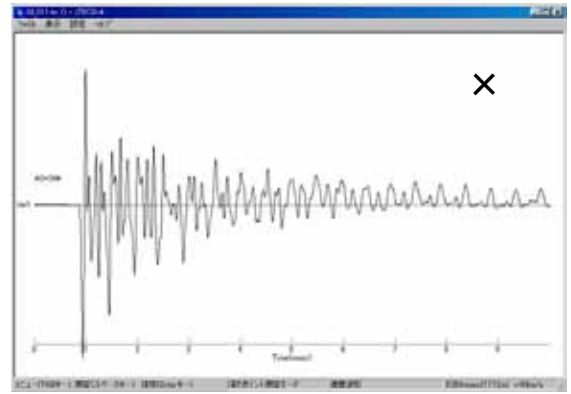


図3.5.11 ⑩ブロック

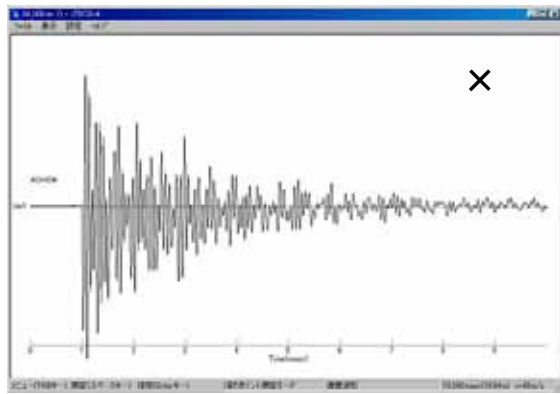


図3.5.8 ⑦ブロック

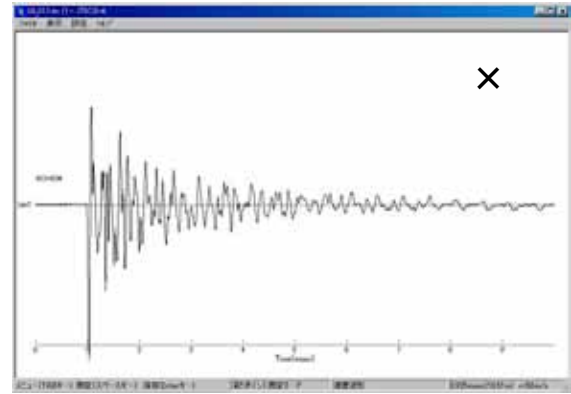


図3.5.12 ⑪ブロック

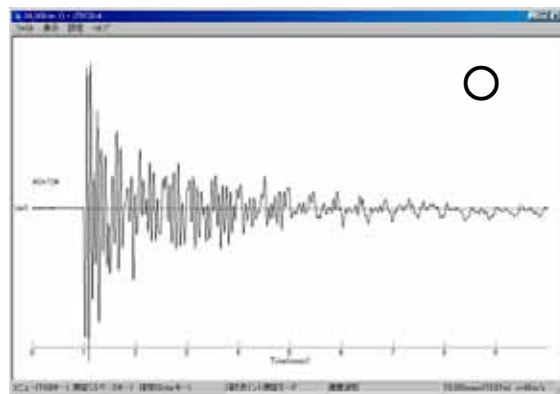


図3.5.9 ⑧ブロック

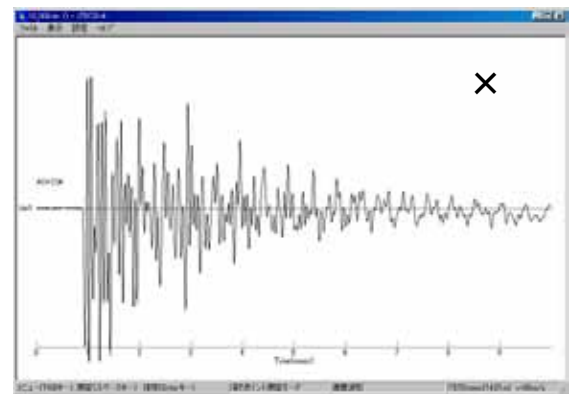


図3.5.13 ⑫ブロック

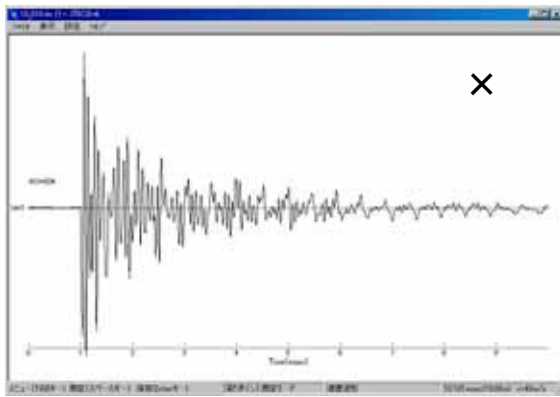


図3.5.14 ⑬ブロック

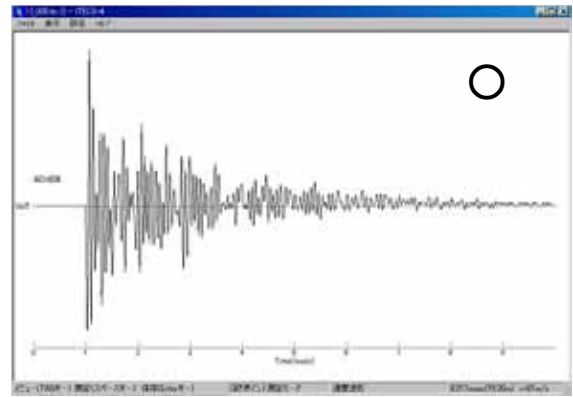


図3.5.18 ⑰ブロック

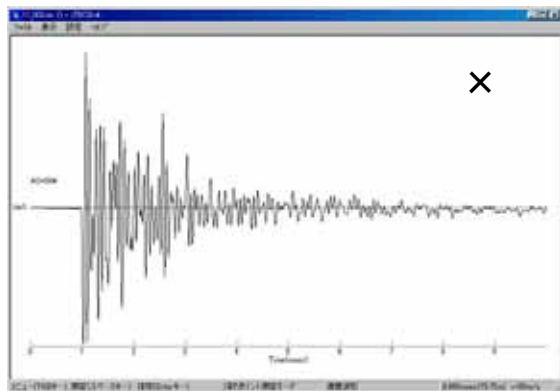


図3.5.15 ⑭ブロック

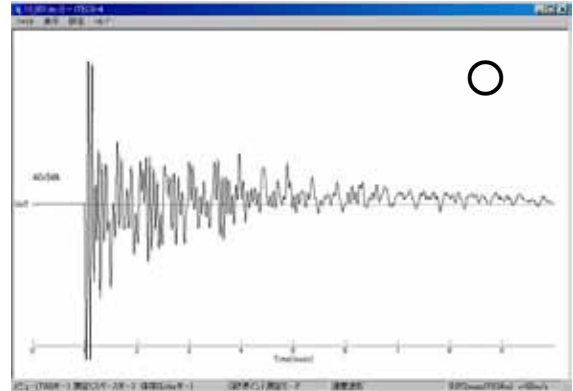


図3.5.19 ⑱ブロック

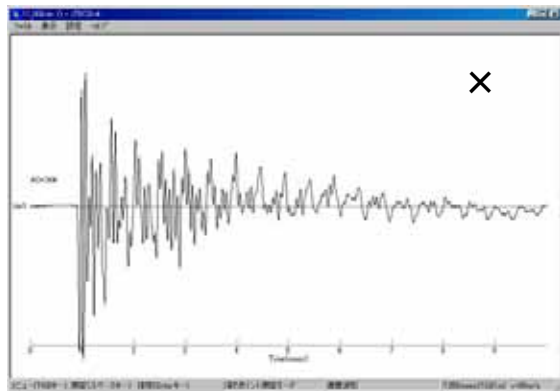


図3.5.16 ⑮ブロック

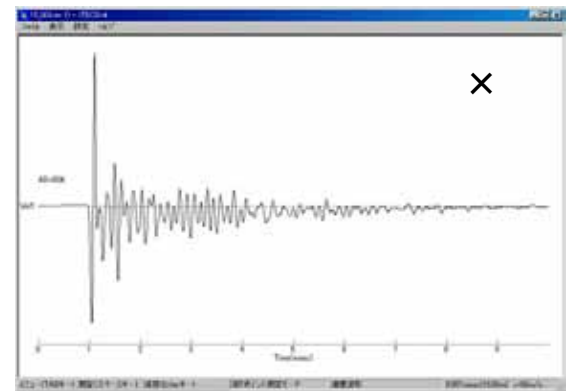


図3.5.20 ⑲ブロック

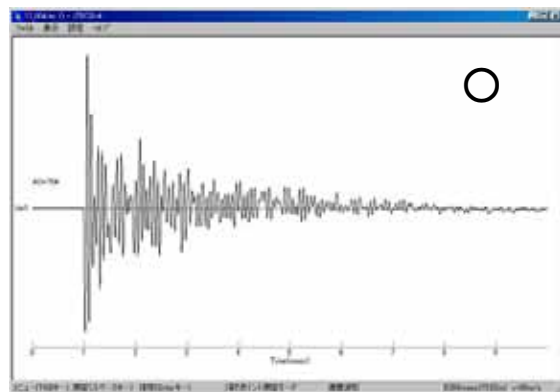


図3.5.17 ⑯ブロック

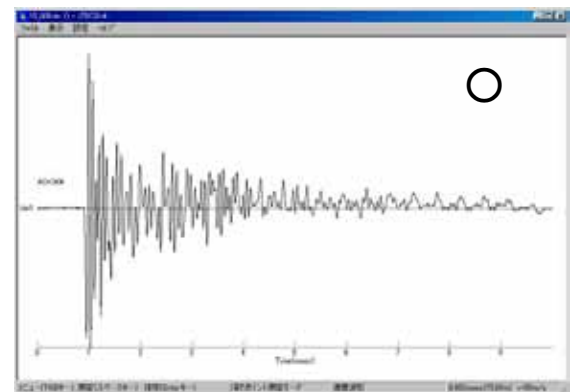
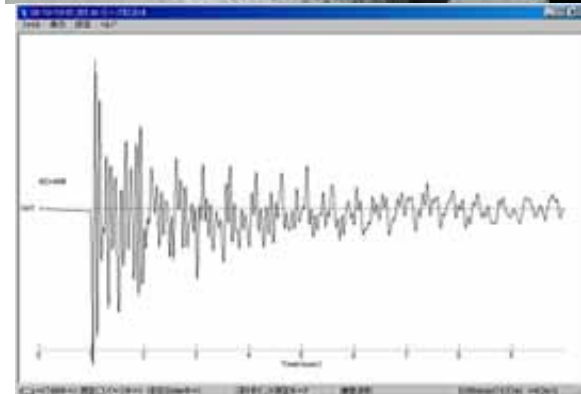


図3.5.21 ⑳ブロック

(6) ひび割れ状態と解析値との関係

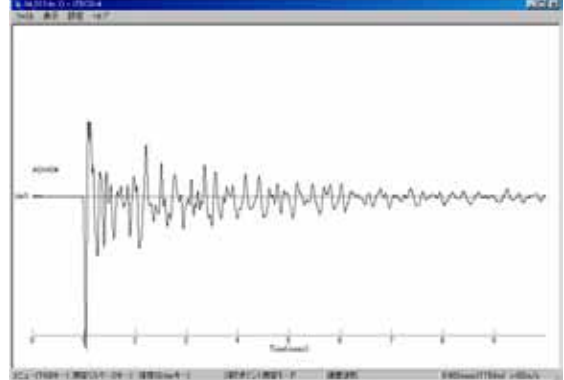
健全なブロックと表面にひび割れが発生しているブロックのひび割れの状態、弾性波速度波形、および相関係数と残差パワー比率の関係は図3.6.1、図3.6.2のとおりで、この程度のひび割れの差異を評価する指標として、衝撃弾性波法による調査は十分適用可能であると判断した。

抜き取り調査において、ひび割れがあるものの、表面には確認されないケースが0.8%あったが、コア抜きと衝撃弾性波による調査で全て健全であると判断できたため、ブロック表面にひび割れが認められるブロックについて敷設された状態で衝撃弾性波法を適用することで、対象とする施設に敷設されている連結ブロックの健全性を評価できるものと判断した。



No.	相関係数	残差パワー比率	数値判定	コア判定
閾値	0.2466	0.0975	/	/
サンプル1	0.1653	0.0724	○	○

図3.6.1 健全なブロックのコアの状態・速度波形・解析結果



No.	相関係数	残差パワー比率	数値判定	コア判定
閾値	0.2466	0.0975	/	/
サンプル2	0.3130	0.1344	×	×

図3.6.2 ひび割れのあるブロックのコアの状態・速度波形・解析結果

(7) 判定結果

表面にひび割れのある734個のブロックを対象とした非破壊検査(衝撃弾性波法)を行い、ブロックの健全性を判定し利用の可否を判断した結果、413個のブロックは交換が必要、321個のブロックは既設利用可能と判断した。

4. おわりに

本報では、被破壊検査による連結ブロックの定量的な健全性評価方法として、「①音響解析」と「②衝撃弾性波法」について、それぞれの評価基準の設定方法、考え方について紹介した。

ただし、試行段階にあるため、今後、より多くの事例について解析を進めることで、洗練化していく必要があると考えている。

(株)フロンティア技研

報 文 集 第23号

平成23年 9月30日

編 集 (社)北海道土地改良設計技術協会

広報部会 明田川洪志・館野 健悦・小澤 榮一・林 嘉章
松崎 吉昭・矢野 正廣・古田 彰・川尻 智之
後藤 静夫・山岸 晴見・源 秀夫

発 行 (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 F A X (011)717-6111

印刷 (株)三誠社 電話 (011)622-9211



●表紙写真●

第25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

「千条ノ滝」

—富良野市—

藤 正 氏 作品

A E C A

HOKKAIDO

Agricultural Engineering Consultants Association