

排水機場基礎コンクリートにおける劣化機構の解明と進展予測

森 充広*・渡嘉敷勝*・石神暁郎**・長束 勇***・増川 晋*

目 次

緒 言	299	5 ASRの可能性に関する調査結果	302
調査の概要	299	考 察	306
1 新川河口排水機場の概要	299	1 中性化予測	306
2 調査方針	299	2 塩害予測	307
調査結果	300	3 基礎コンクリートの劣化メカニズムの考察	308
1 既往の診断結果および目視調査結果	300	結 言	309
2 一軸圧縮強度および静弾性係数	301	参考文献	309
3 中性化深さ	301	Summary	310
4 塩分浸透深さ	301		

緒 言

予防保全対策事業の創設やストックマネジメントへの関心の高まりにより、多くの農業水利施設において機能診断が実施されている。農村振興局においても、開水路、水路トンネルなどのコンクリート製の農業水利構造物の機能診断のためのマニュアル化が進められているところである。

農業水利施設が長期にわたってその機能を発揮するためには、定期的に変状をモニタリングし、適時適切な補修・補強工法によってその機能を要求性能以上に保持していかなければならない。そのためには、農業水利施設に見られる変状からその原因（初期欠陥、損傷、劣化）を判定し、劣化メカニズムを明らかにした上で、それに対処できる補修あるいは補強工法を選定することが重要である。

本報では、ポンプの更新が計画されている排水機場の基礎コンクリートを対象として実施した機能診断の事例を報告するものである。

なお、本調査は、北陸農政局信濃川水系土地改良調査管理事務所からの委託研究によって実施したものである。調査にあたっては、関係各位のご協力・ご支援を頂いた。記して感謝の意を表する。

調査の概要

1 新川河口排水機場の概要

基礎コンクリートの機能診断を実施した新川河口排水機場は、国営かんがい排水事業「新川二期地区」において建設され、昭和45年度から供用が開始されている。西蒲原地域内の主要河川である新川の河口に位置し、地域全体の計画排水量 $530\text{m}^3/\text{日}$ （3日連続50年確率降雨に対応）のうちの約45%にあたる $240\text{m}^3/\text{日}$ を担う地域排水の根幹的重要施設である（筧，2004）。しかし、供用後30年以上が経過し、特にポンプ設備の老朽化が著しく、年々の維持管理費も高騰しつつある状況である。平成12年から開催された農業水利施設総合診断検討委員会において、本施設については、地域の根幹的重要施設であること、かつ予防保全の視点から現有施設をできる限り有効活用することなどの理由から、ポンプ設備については早急に更新し、ポンプ設備を支える土木構造物、特に基礎コンクリートについては、適切な機能診断を行い、次期のポンプ設備の更新時期までその機能を維持できる対策を検討すべきという提言がなされた。

2 調査方針

排水機場基礎コンクリートの劣化状態を的確に診断し、適切な補修・補強工法の選定に寄与する情報を提供するため、Fig.1に示す手順で調査を行った。まず、これまでに実施された機能診断結果を参考に、現地目視調査により、主たる変状とその発生部位を確認した。次に、基礎コンクリートからコアを採取し、基本的な物性を確認するための一軸圧縮強度試験を行った。さらに、二酸化炭素の浸透による中性化や塩分の浸透による塩害の進

*施設資源部水利施設機能研究室

**ショーボンド建設（株）

***島根大学生物資源科学部

平成19年1月15日受理

キーワード：機能診断・EPMA・SEM・アルカリ骨材反応

行程度について、躯体奥行き方向の劣化の進行程度を確認するために、中性化を判定する簡易なフェノールフタレイン法、電位差滴定法による塩分分析に加え、電子線マイクロアナライザー (Electron Probe Micro Analyzer: 以降EPMAと略す) を用いた基礎コンクリート表層の化学組成分析を行った。

また、調査を進めるにつれ、躯体表面に発生しているひび割れの主たる原因として、アルカリ骨材反応 (以降ASRと記す) の発生が懸念された。そこで、ひび割れがASRによるものか否かを確認するため、採取したコアの残存膨張量試験、骨材の有害性判定のための偏光顕微鏡観察、走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: 以降SEMと略す) による白色析出物の画像撮影、骨材やセメント等を構成する主成分鉱物の種類を調べるための粉末X線回折試験を行った。

これらの結果をもとに、表面に発生しているひび割れの原因を特定し、劣化メカニズムを明らかにするとともに、劣化のグレードを評価した。さらに、中性化や塩分浸透については、予測式を用いて今後の進展を予測した。

調査結果

1 既往の診断結果および目視調査結果

これまでに実施された目視点検記録によれば、ポンプ操作室の壁や梁にひび割れが見られること、ポンプ室躯体、基礎、吸吐水槽躯体コンクリートに多くのひび割れや遊離石灰が見られ、部分的に漏水している箇所も見られること、などが記録されていた。こうした状況から、ひび割れの要因は、過去の地震、塩害、波の衝撃による振動、と診断されていた。また、基礎コンクリートのひび割れについては、不等沈下、塩害、が原因とされていた。

これらの既往の機能診断結果を確認するため、現地において目視調査を行った。立地条件から、屋外の基礎コンクリートは、海水による塩分の浸透が懸念される。一方、ポンプ室内は、ポンプの振動などによる疲労ひび割れなどが発生している可能性があった。そこで、基礎コンクリートに関して、排水機場除塵橋周辺の吸水側コンクリート (以降、屋外コンクリートと称す) および排水機場ポンプ室内のコンクリート (以降、ポンプ室内コンクリートと称す) に分けて考察した。それぞれに見られた変状をFig.2およびFig.3に示す。屋外コンクリートの特徴は、躯体に規則性のないひび割れが発生しており、かつ表面から十数cmの位置に躯体表面と平行したひび割れが部分的に存在することである。このため、コンクリートコアは表面から10数cmの位置で分断されることが多く、圧縮試験に使用可能なコアを採取するのが困難であった。一方、ポンプ室内コンクリートは屋外コンクリートと比較してひび割れは少ないが、外側は常時水中

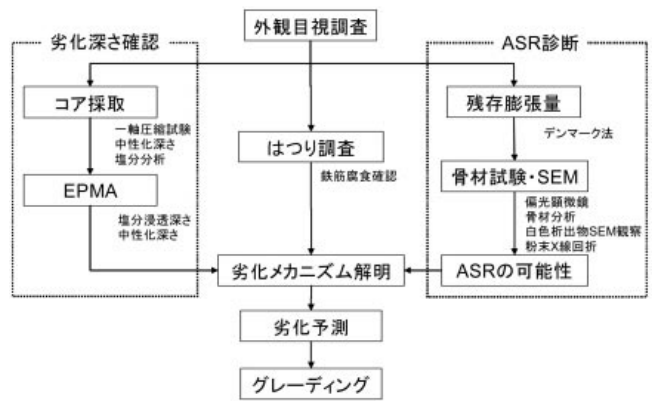


Fig.1 機能診断調査のフロー
Flowchart of diagnosis



Fig.2 排水機場除塵橋のコンクリート (屋外コンクリート)
Guide wall at the pump station



Fig.3 ポンプ室内のコンクリート (ポンプ室内コンクリート)
Inside the pump station

Table 1 屋外コンクリートの一軸圧縮強度および弾性係数
Compressive strength and Yang modulus of outside concrete

コア採取部位	番号	一軸圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
飛沫部	A-1	27.3	10.5
	A-2	18.7	0.94
	B-1	28.8	0.32
	B-2	22.9	10.6
海中土中部	C	28.0	11.3
海中部	D	25.0	27.4

下にあることから、ひび割れ近傍に限らず、随所にエフロッセンスが見られた。

2 一軸圧縮強度および弾性係数

一軸圧縮試験や塩分浸透状況の分析のため、屋外コンクリートおよびポンプ室内コンクリートからコアを採取し、一軸圧縮試験を行った。Table 1に屋外コンクリートの一軸圧縮強度および弾性係数を示す。圧縮強度は、コアにひび割れが認められたA-2を除くと平均して26.4N/mm²、95%信頼の一軸圧縮強度は24.7N/mm²となり、設計強度21N/mm²を上回っていた。したがって、表面にひび割れが認められない部位のコンクリートは、十分な強度を有していることが確認できた。一方、弾性係数を見ると、海中部のコアDを除き、コンクリート標準示方書「構造性能照査編」で示されている一般の弾性係数と比較して著しく小さくなっていることが分かった。ASRを生じたコンクリートの弾性係数は、健全部よりも低下することが知られていることから（例えば、小林ら、1993）、ASRが発生している可能性が示唆された。一方、ポンプ室内コンクリートコアの圧縮強度は、35 N/mm²以上で、弾性係数も22kN/mm²以上を示し、屋外コンクリートでみられたような弾性係数の低下は認められなかった。

3 中性化深さ

屋外コンクリートおよびポンプ室内コンクリートの中性化深さをフェノールフタレイン法およびEPMAによって確認した。

a フェノールフタレイン法（JIS A 1152）による中性化深さ

フェノールフタレイン法は、コンクリートコア割裂面にフェノールフタレインの1%水溶液を噴霧する方法である。フェノールフタレインは、アルカリ性では赤紫色を発色するため、着色しない部分を中性化した深さと評価する。

中性化が確認されたのは、屋外コンクリート飛沫部のコアA-1であり、フェノールフタレイン法によって測定した中性化深さは43mmであった。しかし、同じ屋外コンクリートでも、A-1以外のコアでは全く中性化が確認されなかった。一箇所のコアだけに中性化の進行が見られた原因は、局所的な材料の不均一と思われる。なお、中性化深さ43mmから t 則に基づき、中性化速度係数を算出すると、7.4mm t 年となった。

一方、ポンプ室内コンクリートの中性化深さは最大12mmであった。同様に中性化速度係数を算出すると、2.1mm t 年となった。

b EPMAによる中性化深さ

供試体に電子線を照射すると、内在する元素に特有の波長のX線（特性X線）が検出される。この特性X線を分析することにより、各元素の存在の有無を特定する手

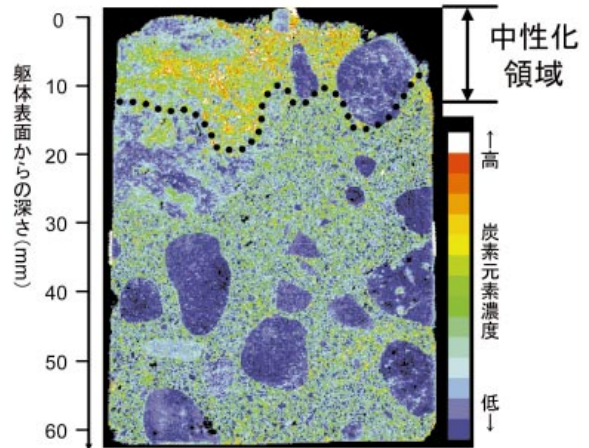


Fig.4 EPMAによる炭素の分布
Distribution of Carbon using EPMA

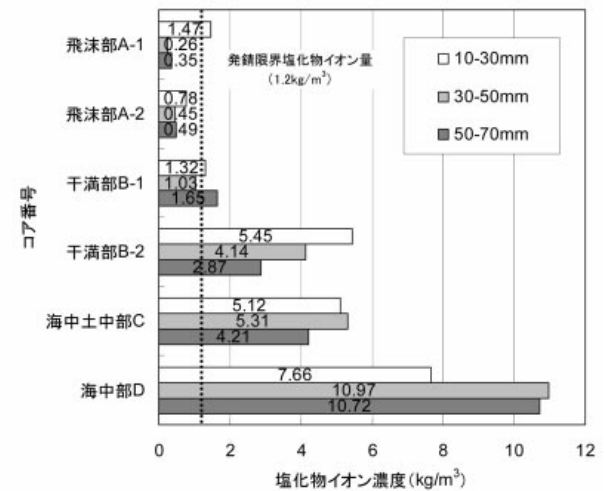


Fig.5 深さごとの塩化物イオン濃度
Chloride quantity at certain depth from concrete surface

法がEPMAである。EPMAによるコンクリート片の分析手順は、次のとおりである。供試体を測定機に対応する寸法にカットする。分析面を鏡面になるまで磨く。電子線を照射した際の耐電を防止するため、分析面に金属を蒸着させる。試料台と蒸着金属を通電し、検出される特性X線の測定・解析を行う。EPMAの測定条件は、加速電圧15kV、ビーム径50 μ m、ビーム電流0.3 μ A、サンプリングタイム30msecである。

干満部から採取したコアB-1について、EPMAにより炭素の深さ方向の元素分布を計測した結果をFig.4に示す。中性化によって、表面からおおむね10mmの範囲で相対的に炭素の濃度が高くなっている（黄色～白）ことが分かった。

4 塩分浸透深さ

a 塩分分析による塩化物イオン濃度

(社)日本コンクリート工学協会の規準（JCI-SC4-1987：硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法）によって採取した屋外コンクリートコアの塩化物イオン

濃度の分析を行った。分析は、表面からの深さが10～30、30～50および50～70mmの部分を対象として実施した。

コア採取部位における塩化物イオン濃度をFig.5に示す。一般に、鉄筋腐食が起こる塩化物イオン濃度は1.2kg/m³とされている(図中の点線以上)。したがって、飛沫部A-2を除くすべてのコアには、既に鉄筋を腐食させる量の塩化物イオンが存在していることが分かった。そこで、鉄筋をはつり出して腐食の状態を確認し、「非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル」(独)土木研究所, 2003)にしたがって評価した。評価結果をTable 2に示す。大量の塩分が含まれているにもかかわらず、腐食状況はごく表面的な腐食にとどまっていることが確認された。海中部においては、多量の塩分は供給されるものの、腐食に不可欠な酸素が供給されにくい環境であるため、鉄筋の腐食は軽微なものにとどまっていると考えられる。

b EPMAによる塩分浸透状況

採取した屋外コンクリートコアのClの分布をEPMAによって分析した。飛沫部、干満部、海中部におけるClの分布状況をFig.6に示す。図中の白色部分ほどClの濃度が高いことを示している。コンクリート中に含まれるClには、海砂使用などにより建設当初から含まれていたClと、海水などによって供給される外来のClがある。コア採取位置による塩分浸透状況を比較すると、飛沫部では、表面付近にClの存在が確認されるものの、内部には到達していない。したがって、建設時にClを含む材料は使用されていないことが確認できた。一方、干満部をみると、表面から10～15mmにClがほとんど観測されず、それより深い部分にわずかにClが存在するという現象が捉えられた。このことから、飛沫部では、表面からの塩分浸透はあるものの、表面部分に付着した塩分は、河川水によって洗い流されている可能性がある。また、海中部のEPMA結果では、表面から既に塩分が50mm以上浸透している状況であることが確認された。

5 ASRの可能性に関する調査結果

ひび割れの原因がASRによるものとすれば、今後ひび割れが進展したり、あるいは現在ひび割れが観測されていない部位においてもひび割れが発生したりする危険性がある。すなわち、ひび割れがASRによるものとすると、今後の補修・補強対策の方向性も大きく変わることが予測される。そこで、ASRの可能性を確認するため、残存膨張量試験、SEM観察、偏光顕微鏡観察、粉末X線回折、コンタクトゲ

ージ法、による調査・分析を行った。

a 残存膨張量試験結果

残存膨張量試験には、Table 3に示すような種々の試験方法および判定基準があるが、今回は塩害環境にあることを考慮し、供試体を50の飽和NaCl溶液中に3ヶ月間浸漬するデンマーク法を採用した。

残存膨張量の測定は、変状が多く見られる屋外コンクリート躯体から採取したコア6本、屋外と比較すると変状が少ないポンプ室内コンクリートから採取したコア7本の計13本実施した。屋外コンクリートから採取したコ

Table 2 はつりによる鉄筋腐食度確認結果
Grading of reinforcing steel corrosion

コア採取部位	コア番号	鉄筋の腐食度
飛沫部	A-1	未確認
	A-2	II～III
	B-1	III
	B-2	III
海中土中部	C	II
海中部	D	III

鉄筋の腐食状況	鉄筋の腐食度
断面欠損が著しい腐食	I
ごく浅い孔食等の断面欠損や軽微な腐食	II
ごく表面的な腐食	III
腐食なし	IV

Table 3 促進膨張量試験と判定基準
Accelerated expansion test and the criterion

	促進養生条件	判定基準	
JCI-DD2 法	温度 40℃ 湿度 100%	阪神高速 道路公団	0.1%以上
	温度 40℃ 湿度 100% 養生期間 13 週	建設省	0.05%以上
デンマーク法	温度 50℃ NaCl 溶液中に 3 ヶ月浸漬	0.4%以上：膨張性あり 0.1～0.4%：不明確 0.1%未満：膨張性なし	
カナダ法	温度 80℃ 1N NaOH 溶液 中に 14 日間浸漬	ASTM C1260-94	0.2%以上：潜在的 に有害な膨張率 0.10～0.2%：有害 と無害な骨材が含ま れる 0.1%以下：無害

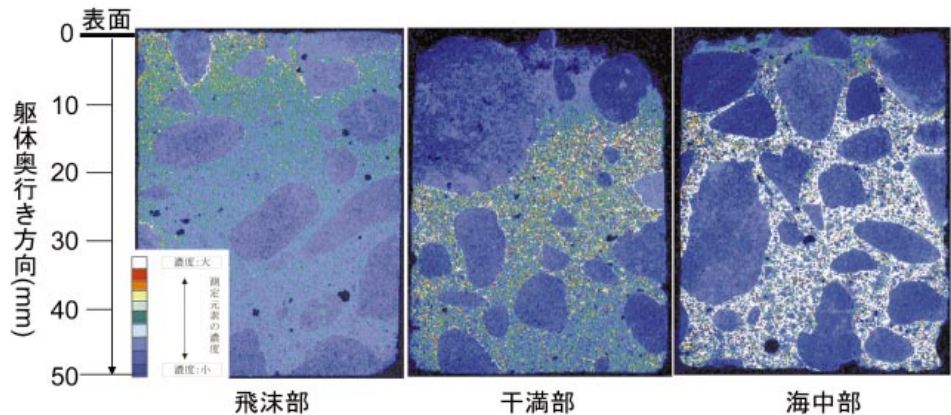


Fig.6 EPMAによるClの浸透状況(左から飛沫部、干満部、海中部)
Chloride distribution by EPMA (Left: Splash area, Tide area, Submarine area)

アの残存膨張量は0.1%未満であった。一方、ポンプ室内コンクリートコアのうち、ポンプ室P1とP5から採取した3本のコアで、0.1%以上の残存膨張量が確認された (Fig.7)。このことから、基礎コンクリートは、潜在的にASR発生の危険性を秘めていると想定された。仮に、残存膨張量がASRに起因するものであるとすれば、屋外コンクリートは、残存膨張量が小さいことから、既にASRが発生し、これ以上の膨張はないと考えられる。一方、ポンプ室内コンクリートは、ASRに寄与するとされる三つの要因 (水分、アルカリ分、反応性骨材の使用)のうち、建設後に供給される可能性ある「水分」により、膨張する危険性がある。したがって、背面からの海水の浸透やポンプ室内の結露などによる水分の供給をできる限り防ぐことが、ASR発生を遅らせる有効な手段であると考えられる。

b SEM観察

屋外コンクリートのひび割れに介在している白色析出物を特定するために、SEMによる観察および物質の特定を試みた。硬化コンクリートにSEMを適用する場合、倍率を選定することによって様々な画像解析ができる。低倍率では空隙の形態・分布状況やアルカリシリカゲルの存在状態の確認など、高倍率では骨材とセメントペーストの界面の状態やセメント硬化体の結晶の生成状態の確認などと利用範囲が広い。さらに、別途X線分析装置を取り付けることにより、ビーム照射部分の元素組成分析が行える。

本手法を用いて、飛沫部、干満部、海中部の3箇所のコアで目視により確認された白色析出物のSEM観察を行った。さらに、これらのコアの特定部分を撮影し、主要な組織成分をX線分析装置により分析した。分析の条件は、加速電圧15kV、電子ビーム径10μm、ビーム電流0.3μAとし、定量分析には、ZAF法 (福島, 1987)を用いた。SEM画像をFig.8~10に、それらの化学組成をTable 4に示す。

ASRによる反応生成物の典型例としては、アルカリ-

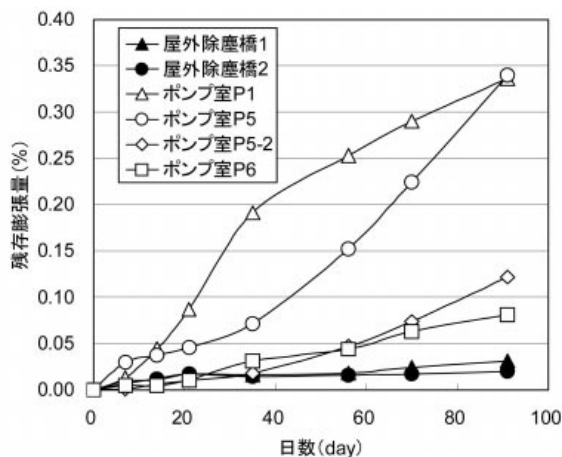


Fig.7 デンマーク法による残存膨張量結果

Result of expansion coefficient by Demark testing method

シリカ型、アルカリ-カルシウム-シリカ型、アルカリ-カルシウム-シリカ型 (K濃度大)の3パターンが報告されている。その主要成分は、Table 5のように分類されている (小林ほか, 1998)。SEMの結果を見ると、コアから採取された白色析出物は、採取位置によってそれぞれ異なる組織形態を示している。飛沫部は、他と比較してCaOの重量が大きい。他の化合物含有量も考慮すると、飛沫部の白色析出物は、アルカリ-カルシウム-



Fig.8 飛沫部コアの白色析出物SEM画像
SEM picture of white separating in splash area

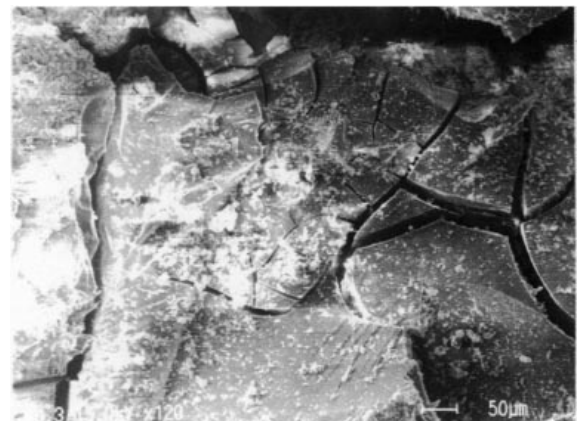


Fig.9 干満部コアの白色析出物SEM画像
SEM picture of white separating in tide area



Fig.10 海中部コアの白色析出物SEM画像
SEM picture of white separating in submarine area

シリカ型に分類されると考えられる。干満部は、 Na_2O と K_2O の両方が高い値を示していることが特徴である。このことから、アルカリ-シリカ型もしくはアルカリ-カルシウム-シリカ型のいずれかに相当すると考えられる。海中部の特徴は、 Na_2O の含有量が干満部に近い値を示しているのに対し、 K_2O の重量が干満部の半分以下になっていることである。したがって、海中部の白色析出物はアルカリ-シリカ型に近い組成を有していると考えられる。

一方、ポンプ室内コンクリートにおいてもコアを採取し、白色析出物のSEM観察を行ったが、アルカリシリカゲルでないことが確認された。したがって、ポンプ室内コンクリートでは、潜在的にASRが発生する危険性はあるが、現時点ではまだその段階には至っていないと判断できる。

c 偏光顕微鏡観察

ASRの発生要因として、水の供給、アルカリ分の供給そして反応性骨材の使用が大きく関与する。そこで、採取したコアから骨材を採取し、偏光顕微鏡観察による有害鉱物の定量評価ならびに硬化セメントの粉末X線回折を実施した。偏光顕微鏡観察では、鉱物結晶が直交ニコル・プリズム下でその鉱物の光学的特徴を示すことを利用し、鉱物の鑑定を行う。今回の試料は、コンクリートコアから切り出した切片を鏡面研磨してスライド・ガラスにはりつけ、手作業によって研磨して厚さ20 μm 程度の薄片としたものを用いた。

偏光顕微鏡下における岩石の観察、有害鉱物の定量は、(社)日本コンクリート工学協会耐久性診断研究委員会の基準案JCI-DD3「骨材に含まれる有害鉱物の判別(同

定)方法(案)」ならびにJCI-DD4「有害鉱物の定量方法(案)」に準じて行った。岩石・鉱物の定量分析は線積分法を用い、測線は1枚の薄片で10本とした。

ASRを引き起こす有害な骨材岩種は、安山岩やチャートといわれている。また、反応性の鉱物として、クリストバライト、トリディマイト微晶質または歪んだ結晶格

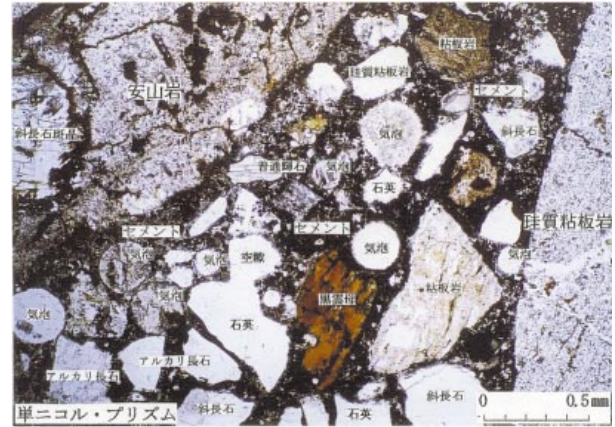


Fig.11 偏光顕微鏡写真(単ニコル・プリズム)
Plane Polarized light view

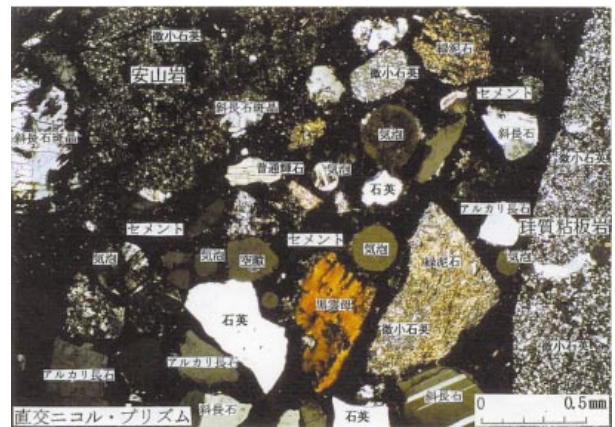


Fig.12 偏光顕微鏡写真(直交ニコル・プリズム)
Crossed polarized view

Table 4 白色析出物化学組成
Chemical property of white separating

コア	重量% (wt%)					等価アルカリ量 (%) [*]
	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	その他	
飛沫部	47.4	7.3	11.5	30.5	3.3	14.9
干満部	57.2	21.5	11.8	9.3	0.2	29.3
海中部	59.9	21.3	4.6	13.1	1.1	24.3

*等価アルカリ量 $R_2O = \text{Na}_2O + 0.658\text{K}_2O(\%)$

Table 5 ASRによる反応生成物
Chemical compound by alkali aggregate reaction

主要成分の範囲 (wt%)	①アルカリ-シリカ型		②アルカリ-カルシウム-シリカ型		③アルカリ-カルシウム-シリカ型 (K濃度大)	
	SiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O
	60~90	5~30	35~75	3~15	45~75	10以下
	5~30	5~30	3~15	3~15	10~25	10~25
	5以下	5以下	10~55	10~55	10~30	10~30
骨材の特徴	←----- 火山岩系骨材 ----->				←----- 堆積岩系骨材 ----->	

Table 6 粗骨材を構成する岩石の種類別割合 (単位: %)
Percentage of rock kinds witch compose gravel (unit:%)

砂岩	粘板岩	珩質粘板岩	安山岩	花崗閃緑岩 花崗岩
24	6	15	32	23

Table 7 骨材中に含まれているASR反応性鉱物の割合 (単位: %)
Percentage of alkali reactive mineral in aggregate

アルカリ反応性鉱物	粗骨材	細骨材
微小石英	22	14
波動消光する石英	2	—
ガラス	10	4
合計	34	18

および18に示す。横軸は設置した日を基準としたときの経過日数を示し、縦軸の変位量は初期値からの変化量を示している。凡例に示した添え字の1, 2, 3は, Fig.14に示した標点距離番号である。

(1) 屋外コンクリートのひび割れモニタリング結果

躯体温度は, 調査当日の天候に左右され, 5月が40~50と最も高く, 8月が5月よりもやや低く, 1月が13程度という結果であった。このため, ひび割れを跨いでいないゲージプラグの挙動は, この躯体温度と連動した挙動を示した。すなわち, 躯体温度が低くなると, コンクリートが縮み, ゲージ間の距離が初期値と比較して短くなった。一方, ひび割れを跨いだ測点の挙動は, ゲージを設置した場所によって異なることが分かった。

ピア天端に設置したコンタクトゲージは, 躯体温度の低下とともに躯体が縮み, ひび割れ間が伸びる傾向が見られた (Fig.15)。一方, ピア側壁に設置したコンタクトゲージの挙動は, 躯体温度の低下とともに, 躯体およびひび割れ間の両方縮んでいた (Fig.16)。このような挙動が見られた原因は, ひび割れの深さに関係していると考えられる。ひび割れがごく表面のものであれば, ひび割れに関係なくコンクリート全体としての挙動を示すのに対し, ひび割れ幅が深いものであれば, 目地のような機能を発揮し, 躯体全体の挙動と反対の挙動を示すようになると思われる。

(2) ポンプ室内コンクリートのひび割れモニタリング結果

ポンプ室内コンクリートの外壁部 (左岸側) では, 躯体温度が高い場合にはひび割れ間が短くなり, 躯体温度が低い場合にはひび割れが開く挙動が見られた (Fig.17)。一方, 5号ポンプ室隔壁に設置したNo.7のコンタクトゲージの結果では, ひび割れを跨ぐゲージプラグ間が徐々に伸び, ひび割れが開く傾向が見られた (Fig.18)。今後進展する可能性もあるため, 測定回数を増やし, 定期的に点検する必要がある。

考 察

1 中性化予測

躯体に見られた中性化の結果から, 今後の中性化の進行を, 経験式に基づき予測した。

水セメント比から中性化速度を予測する式は, 以下のように表される (土木学会, 2001)。

$$y = R(-3.57 + 9.0 \cdot W/B) \sqrt{t} \tag{2}$$

$$B = W / (C_p + k \cdot A_d) \tag{3}$$

ここで, y : 中性化深さ (mm), R : 環境の影響を表す係数 (乾燥しやすい: $R=1.6$, 乾燥しにくい: $R=1.0$),

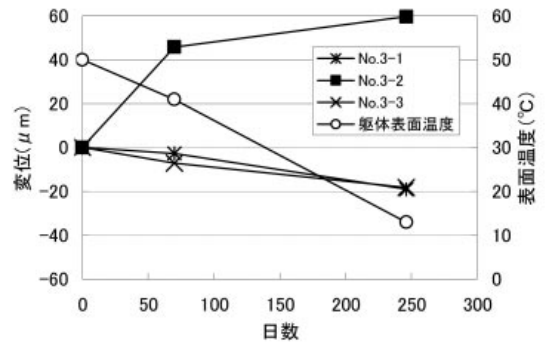


Fig.15 屋外コンクリート (ピア天端)の躯体変位
Displacement of outside concrete (levee crown)

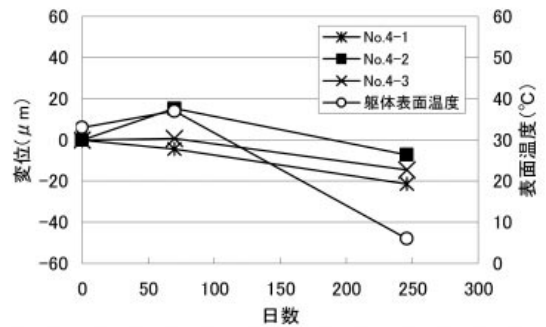


Fig.16 屋外コンクリート (ピア側壁)の躯体変位
Displacement of outside concrete (side wall)

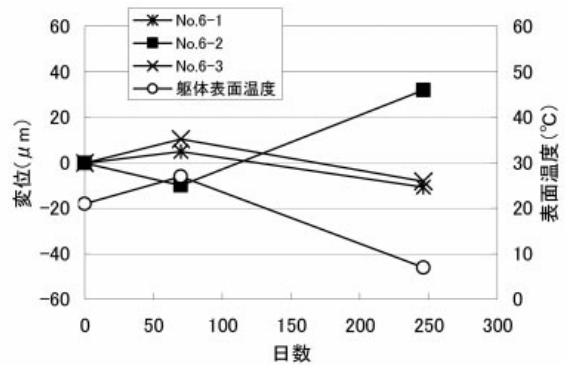


Fig.17 ポンプ室内コンクリートの躯体変位 (左岸側)
Displacement of concrete inside pump station (left side)

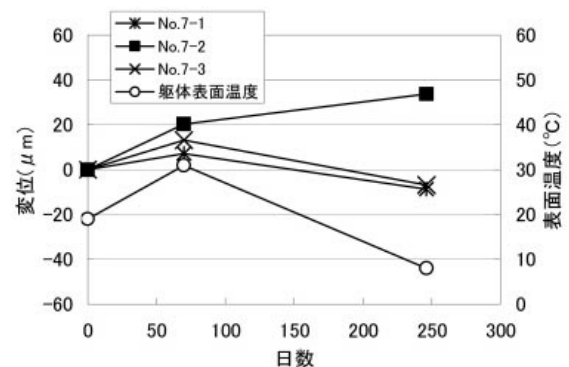


Fig.18 ポンプ室内コンクリートの躯体変位 (隔壁)
Displacement of concrete inside pump station (wall)

w ：単位体積あたりの水の質量 (kg), B ：単位体積あたりの有効結合材の質量 (kg), C_p ：単位体積あたりのポルトランドセメントの質量 (kg), A_d ：単位体積あたりの混和材の質量 (kg), k ：混和材の影響を表す係数 (フライアッシュの場合： $k=0$, 高炉スラグ微粉末の場合： $k=0.7$) である。コンクリート施工時の配合が不明であるため、ここでは混和材は使用していないと仮定し、 w_b は水セメント比0.60として計算した。屋外コンクリートの中性化深さ実測値43mmから t 則によって求めた中性化速度係数7.4mm t /年を用いた場合の中性化深さの予測および式 (2), (3) から推測される中性化速度係数による中性化深さの予測の比較をFig.19に示す。水セメント比から推測した中性化深さに対し、屋外コンクリートの中性化深さ実測値から求めた中性化深さが大きくなっている。ポンプ室内コンクリートの中性化深さ実測値12mmと、水セメント比から推測した34年経過後の中性化深さ10.7mmは、ほぼ一致した。したがって、屋外コンクリートの中性化深さ43mmは、通常的环境下での中性化深さと比較すると、非常に大きい値であると推測される。この原因としては、中性化以外の劣化要因、例えばASRによるひび割れからの中性化、塩害との複合劣化などによる影響があると考えられる。

また、中性化速度係数を危険側の7.4mm t /年と仮定したとき、建設60年後の中性化深さは57.1mmに達する結果となった。鉄筋腐食が開始する中性化深さは、中性化残り+約8mm, 塩害環境下では中性化残り+約20mmとされている (コンクリート工学協会, 2003)。したがって、このまま仮定した中性化速度が維持されるとすれば、77mm (57mm+20mm) 以上のかぶり確保されていると中性化による鉄筋腐食の危険性は少ない。なお、基礎コンクリート5カ所で行ったはつり調査によって、主筋までが平均103mm, 配筋までが平均87mmのかぶり確保されていることを確認した。以上の結果から、中性化のみによって今後鉄筋が腐食する危険性はほとんどない。ただし、ASRによるひび割れが鉄筋まで到達している場合には、局所的に鉄筋が腐食する可能性がある。

2 塩害予測

コンクリート中の塩化物イオンは、連続した細孔に存在する水、いわゆる細孔溶液中を移動・拡散すると考えられている。したがって、塩化物イオンの浸透には、コンクリート中の細孔構造や乾湿繰り返しによる水の移動が大きく関与する。このうち、塩化物イオンの拡散の予測方法としては、適切な境界条件における拡散方程式の解を用いる方法、促進試験を行い、その結果から求める方法、塩化物イオンの反応や環境との境界における移動を考慮した数値解析による方法、などが提案されているが、ここでは、フィックの第二法則として知られる拡散方程式 (4) を適切な境界条件で解いた解 (5) を用い

て塩化物イオンの濃度分布を予測する。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \right) \tag{4}$$

$$C(x,t) = C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \tag{5}$$

ここで、 D ：塩化物イオンの見かけの拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$), C_0 ：表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3), x ：塩化物イオン濃度 (kg/m^3)：コンクリート表面からの深さ (cm), t ：時刻 (年) である。また、 erf は誤差関数であり、

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt \tag{6}$$

で示される。

Fig.5で示した深さごとの塩化物イオン濃度について、30~50mm, 50~70mmの塩化物イオン濃度が深さ方向に減少する傾向を示しているコアB-2について、表面から塩分浸透があるとした場合の塩化物イオンの見かけの

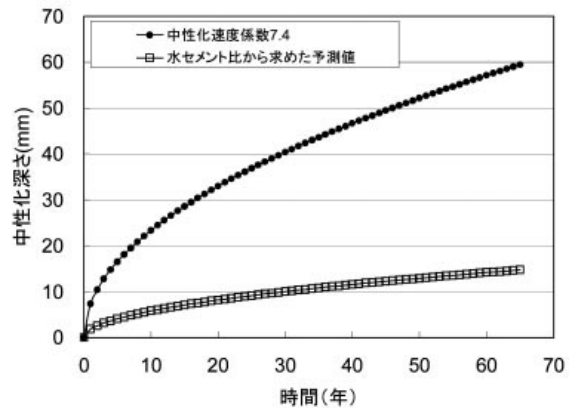


Fig.19 中性化と経過年数との相関
Relation between neutralization and elapsed year

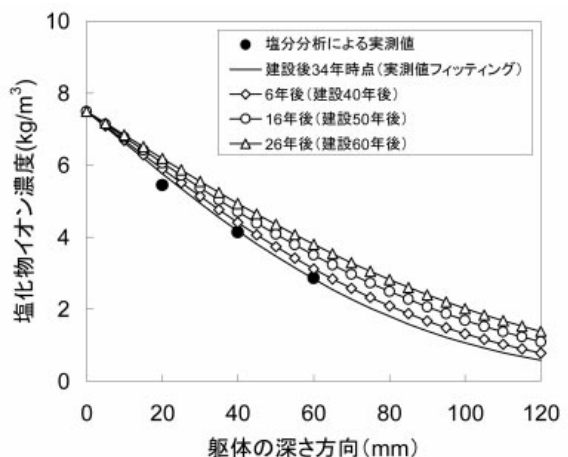


Fig.20 飛沫部 (B-2) における塩化物イオン濃度予測
Prediction of chloride at the point of splash area (B-2)

拡散係数 D ($\text{cm}^2/\text{年}$)と、表面における塩化物イオン濃度 C_0 (kg/m^3)を試行錯誤して求めた。このとき、塩分分析で得られた深さ10~30mm, 30~50mm, 50~70mmの位置における塩化物イオン濃度は、それぞれ深さ20mm, 40mm, 60mmの位置の値を代表していると仮定し、かつ深さ40mm, 60mmの位置での塩化物イオン濃度を最小二乗法でフィッティングした。その結果、 C_0 は $7.5\text{kg}/\text{m}^3$ 、 D は $0.71\text{cm}^2/\text{年}$ という結果が得られた。この値を用い、建設後40年, 50年, 60年における躯体深さ方向の塩化物イオン濃度を予測した。結果をFig.20に示す。発錆限界といわれる $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を越える塩化物イオン濃度が観測される深さは、現時点では躯体表面から9.5cmの位置であるが、6年後(建設40年後)では100mm, 16年後(建設50年後)では115mmとなることが予測された。主筋までのかぶり平均103mmであることから、6~16年後には、塩分浸透による鉄筋腐食が開始する危険性が高まり、構造機能の低下が懸念される。また、中性化の進展に伴い、コンクリート中に固定化されているフリーデル氏塩が Cl イオンを解離して可溶性 Cl となり、さらに深部の未中性化領域に濃縮する現象が報告されている。今回の予測は、中性化および塩害について個別に行ったものであるが、実際には上述した複合劣化も起こりうることから、劣化が加速的に進展する危険性がある。

3 基礎コンクリートの劣化メカニズムの考察

これまで実施した詳細調査の結果をもとに、屋外コンクリート、ポンプ室内コンクリートの劣化メカニズムを考察した。

a 屋外コンクリート

建設時に反応性骨材を使用したことにより、屋外コンクリート表面に亀甲状のひび割れを引き起こすASRが発生した。また、排水機場は海岸近傍に位置しているため、河川水にも海水が混ざる環境条件から、躯体表面から塩分が浸透した。さらに、ASRによるひび割れが塩分の浸透を助長し、鉄筋腐食が開始する危険性が高い状態にある。一方、常に水面下にある部分については、酸素の供給がきわめて少ないことから、現時点では鉄筋腐食には至っていない。以上の状況を総合的に判断すると、屋外コンクリートのASRグレーディングは、既に発生してひび割れが入っていることから、劣化期にある。一方、塩害に関しては、進展期にあると判断される。

b ポンプ室内コンクリート

屋外コンクリートと同様、反応性骨材が使用されているものの、屋内にあるため、河川水、雨水などの直接的な水分の供給がなく、ASRによる外観上の変状はほとんどみられない。採取したコアの白色析出物を観察した結果においてもゲルが観測されなかったことから、ASRは潜伏期にある。ただし、残存膨張量試験において、0.35%の膨張量が確認されたことから、外部からの浸透水、結露などによる水分供給によって、今後ASRが急速

に進展する危険性がある。

塩害については、施工時に塩分が含まれた骨材を使用しておらず、かつ表面からの塩分浸透もない。河川に接した外部表面からの塩分浸透がなければ、今後も塩分浸透による劣化は考慮する必要はない。したがって、塩害についても潜伏期にある。

4 各試験方法の有効性

Fig.1に示したように、今回の機能診断では、現地調査に加え、様々な分析を実施した。そこで、中性化、塩害、ASRに対する手法の有効性をまとめる。

a 中性化

中性化深さの診断には、一般にフェノールフタレイン法が用いられる。本手法は現地で簡便に実施できるので、中性化判定手法として有効である。しかし、本法で確認できるのは $\text{pH}8.2 \sim 10$ 以下の部分であり、鉄筋腐食は pH が11程度で始まるといわれている。したがって、さらに正確に中性化深さを確認するためには、今回使用したEPMAなどにより、炭酸化した範囲を分析することが望ましい。

b 塩害

今回塩害の診断に用いた(社)コンクリート工学協会のJCI-SC4法は、定量分析が可能であり、塩害の可能性のあるコンクリートの分析法として有効である。ただし、分析できる区間が20mm間隔となり、詳細な塩化物イオン濃度分布を調べることが難しい。また、コンクリート内部への塩化物イオンの有害濃度については、(社)土木学会などが $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ を示しているものの、国土交通省では $2.5\text{kg}/\text{m}^3$ を使用するなど、限界値についてまだ議論がある。農業土木分野においても、これらの判定基準の確立が望まれる。

c ASR

「ASRによる劣化」と断定できる手法は、現在のところ確立されていないのが実情である。このため、本研究においては、残存膨張量計測、白色生成物のSEM観察(ゲル観察)、骨材の有害性判定、粉末X線回折などを組み合わせ、それらの結果を総合的に判断し、ASRによる劣化であると判定した。なお、判定基準に関しては、塩害と同様、各行政部局、協会などによって個別に定められている。

いずれの劣化現象についても、試験方法はほぼ確立されているものの、評価基準については、個々の構造物に対して設定されている。したがって、農業水利コンクリート構造物に関しても、置かれている環境条件(水にさらされやすいなど)などを考慮し、独自に定める必要があると思われる。さらに、補修・補強対策を決定する重要な機能診断に際しては、ひとつの手法だけでなく、複数の調査法を組み合わせることで総合的に判断することにより、劣化の原因がさらに明確となり、判定の精度が向上するといえる。

結 言

本報では、排水機場基礎コンクリートを対象として、様々な観点から劣化の要因を推察し、それを確認するための物理試験、化学試験を行った。その結果、排水機場基礎コンクリートは、建設時に反応性骨材が使用されたことによるASRと、海水近傍にあることから表面からの塩化物イオン供給による塩害を複合的に生じていることが明らかとなった。また、屋外コンクリートとポンプ室内コンクリートとは、環境条件が異なることから、劣化のグレーディングも異なる評価となった。今後、これらの劣化メカニズム、劣化ステージに対応した補修・補強工法を選定することが重要である。

参考文献

- 1) コンクリート工学協会 (2003) : コンクリート診断技術⁰⁸ , p.39
- 2) 土木学会 (2002) : コンクリート標準示方書 [構造的機能照査編]
- 3) 土木学会 (2001) : コンクリート標準示方書 [維持管理編] , p.84
- 4) (独) 土木研究所・日本構造物診断技術協会 (2003) : 非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル, 技報堂出版
- 5) 福島啓義 (1987) : 電子線マイクロアナリシス, 日刊工業新聞社
- 6) 筧 直樹 (2004) : 新川河口排水機場の施設機能診断と更新計画の検討 - スtockマネジメントの視点からの更新手法検討 -, 農業土木学会材料施工研究部会報, 第43号, 93-100
- 7) 小林一輔編著 (1998) : コア採取によるコンクリート構造物の劣化診断法, 森北出版
- 8) 小林一輔・森 弥広・野村謙二 (1993) : 圧縮載荷試験によるアルカリ骨材反応の診断方法, 土木学会論文集, No.460/V, 151-154
- 9) 丸 章夫 (2004) : コンクリート構造物の異常ひび割れに関する岩石鉱物学的考察, コンクリート工学, Vol.42, No.12
- 10) (財) 土木研究センター (1989) : 建設省総合技術プロジェクト「コンクリートの耐久性向上技術の開発」

Clarification of Deterioration Mechanism and Forecast of Progress at Base Concrete of Drainage Pump Station

MORI Mitsuhiro, TOKASHIKI Masaru, ISHIGAMI Akio, NATSUKA Isamu
and MASUKAWA Susumu

Summary

To make agricultural facilities demonstrate their functions for long time, it is needed to monitor the progress of their damages and to keep their functions up to demanded performance by timely and proper repair or reinforcement methods. Therefore, it is important to clear the cause of damages generated in agricultural facilities, to specify the mechanism of deterioration, and to select proper repair or reinforce methods.

In this research, we applied various examinations to base concrete of the drainage pump station, for example, physical test such as unconfined compression test, chemical test such as chloride concentration, electron probe micro analyzer (EPMA), X-ray diffraction, and estimation of harmfulness of aggregate. From the result of these investigations, we judged that the base concrete of the pump station, which located near sea, had compound deterioration. Deterioration was caused by alkali-aggregate reaction because of use of reactivity aggregate when the pump station was built. Moreover, it was clarified that chloride from the sea was infiltrated into concrete through cracks caused by alkali-aggregate reaction. Using these investigation results, the depth of deterioration by neutralization and infiltration of chloride was guessed.

Keywords : diagnosis of functions, EPMA, SEM, alkali-aggregate reaction