コンクリート水路の診断技術および 簡易補修工法に関する研究

丈久* 森

目 次

第 I 章	緒言	37
1.1	研究の背景と目的・・・・・	37
1.2	既往の研究と研究動向	39
1.3	本論文の構成・・・・・	42
1.4	本論文における用語の定義	43
第Ⅱ章	農業用コンクリート開水路における変状と	
	その発生原因の分析	44
2.1	緒論	44
2.2	農業用コンクリート開水路における主な変状	
	とその発生原因	44
2.3	地震による農業用コンクリート開水路の損傷	
	メカニズムの分析・・・・・	48
2.4	結論	65
第Ⅲ章	通水状態における農業用水路トンネルの	
	機能診断技術の開発	65
3.1	緒論	65
3.2	農業水利コンクリート構造物の機能診断技術	
	の現状分析	66
3.3	通水状態における農業用水路トンネル内部の	
	変状調査システムの開発	70
3.4	結論	74
第Ⅳ章	農業水利施設の劣化予測手法の構築	75
4.1	緒論	75

I 緒 言

1.1 研究の背景と目的

農業水利施設は、ダム、頭首工、農業用用排水路など その種類は多岐にわたり、第二次世界大戦後の食料増産 時代から本格的に全国各地で建設が進められてきた。現 在までに国営・都道府県営土地改良事業により建設され た受益面積 100ha 以上の基幹的な農業水利施設は、ダム、 頭首工、用排水機場などが約 7,100 ヵ所、農業用用排水

4.2	他分野の構造物における劣化予測手法	75
4.3	農業水利施設の劣化予測モデルの作成	78
4.4	農業水利施設の劣化予測手法の確立に向けた	
	課題	86
4.5	結論	86
第Ⅴ章	豊業用小規模コンクリート開水路の簡易	
	補修工法の開発・・・・・	87
5.1	緒論	87
5.2	農業用コンクリート開水路における補修工法	
	の現状分析・・・・・	87
5.3	小規模コンクリート開水路の簡易補修工法の	
	開発	92
5.4	結論	99
第Ⅵ章		100
6.1	農業用コンクリート開水路における変状とその	の
	発生原因の分析(第Ⅱ章)	101
6.2	通水状態における農業用水路トンネルの機能	
	診断技術の開発(第Ⅲ章)	102
6.3	農業水利施設の劣化予測手法の構築(第Ⅳ章)	102
6.4	農業用小規模コンクリート開水路の簡易補修	
	工法の開発(第V章)	103
参考文	·献·····	104
Summa	ary	107

路の総延長が約4万5千kmに達する(Fig.1-1)。さらに, 末端施設である圃場内小水路まで含めた農業用用排水路 の総延長は約40万kmにものぼり,基幹から末端まで の農業水利施設の総資産額は再建設費ベースで約25兆 円と試算されている(Fig.1-2)。しかし,これらの農業水 利施設の大部分は,建設から数十年が経ち,老朽化の進 行により更新が必要な時期を迎える施設が増加してきて いる(森, 2005)。

一方,農産物価格の低迷による農業経営の悪化や国・ 地方公共団体の財政上の制約から,施設の更新整備を担 う公共事業への投資が抑えられている状況にある。また, 施設の老朽化に伴い,維持管理に要する費用も年々増加 しつつある。さらに近年,施設の維持管理を担う土地改 良区の合併により,1土地改良区当たりの管理施設数が

^{*}中国四国農政局四国土地改良調查管理事務所

 ⁽農工研在職時の最終所属:施設工学研究領域 施設保全管理担当)
 平成 23 年 12 月 16 日

キーワード:ストックマネジメント,農業用水路,損傷,破壊試験,劣 化予測,マルコフ連鎖モデル,簡易補修



Number and type of principal agricultural facilities (Rural development Bureau, Rural Infrastructure Department, Water Resource Division, Facilities Management Office, 2004)



Fig.1-2 農業水利施設のストック形成状況(農村振興局整備部水利整備課施設管理室, 2004) Stocks of agricultural facilities (Rural development Bureau, Rural Infrastructure Department, Water Resource Division, Facilities Management Office, 2004)

増加するとともに、職員の高齢化も進み、以前のような きめ細やかな対応が困難になりつつある。

今後,このような状況が一層進み,変状の生じた施設 に対する適切な対応が行われなくなった場合,農業水利 施設の有する食料生産基盤としての機能や,地域の生活 用水や防火用水といった多面的機能が十分に発揮されな いことになり,国民生活にも影響を及ぼすおそれがある。 実際,2002年時点で標準耐用年数を超えている基幹的 な農業水利施設は,再建設費で約2兆円にも及ぶといわ れており(農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設 管理室,2007),早急に農業水利施設の機能保全の仕組 みを構築しなければならない状況にある。

このような状況を受けて,2003年に策定された「農 林水産公共事業コスト構造改革について」(農林水産省, 2003a)や「土地改良長期計画」(農林水産省,2003b) において、「既存ストックの有効活用」が盛り込まれた。 また、2005年には、食料・農業・農村基本法に基づく 「食料・農業・農村基本計画」(農林水産省、2005)が閣 議決定され、「既存ストックの有効活用の観点から農業 水利施設等の長寿命化を図り、これらのライフサイクル コストを低減することを通じ、効率的な更新整備や保全 管理を充実する」ことが明記された。これにより、農業 水利施設の果たしている機能を効果的に保全する仕組み として、「ストックマネジメント」が農林水産行政の基 本施策の一つとして位置づけられることになった(森、 2005)。ここで、「農業水利施設の機能保全の手引き」) 農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設管理室、 2007;以下「機能保全の手引き」と記す)では、ストッ クマネジメントを、「施設の機能診断に基づく機能保全 対策の実施を通じて、既存施設の有効活用や長寿命化を 図り, ライフサイクルコストを低減するための技術体系 および管理手法の総称」と定義している。ストックマネ ジメントでは, ①機能診断による施設の状態把握, ②機 能診断結果に基づく施設の状態の将来予測, ③施設の状 態に応じた補修・補強対策の検討, ④機能保全コストの 算定, ⑤機能保全コストを最小にする機能保全計画の策 定, から成る手順を基本的なフレームとしている。

現在、ストックマネジメントの手法により、全国の農 業水利施設の機能保全対策が行われつつある。しかし, ストックマネジメントの実践に当たっては、様々な技術 的課題が存在する。例えば、長束ら(2002a)は、道路・ 鉄道トンネルにおけるコンクリート塊の剥落のように第 三者被害に繋がる重大事故の可能性が低い農業水利分野 の構造物では、水利構造物の機能に直結する、例えば、 漏水につながる変状を探索する診断手法の開発に向かう べきであるとしている。さらに、地球10周分の距離に 相当する用排水路をも対象とする農業水利構造物分野で は, 概査と精査の両面において, 低コストの非破壊調査・ 試験法の確立が不可欠であるとしている。また、補修・ 補強工法についても長束ら(2004)は、既往の他分野の補 修技術を選択して有効に活用できる場合もあるが、農業 水利分野のコンクリート構造物として要求される性能に 対して十分な照査がなされていないため,経済性を含め, その評価は不十分であるとしている。そして、農業水利 分野のコンクリート構造物に要求される性能を念頭にお いた、補修技術の性能照査、評価方法、選定方法の検討 ならびにその開発が重要であるとしている。

一方,農業水利施設には,国営土地改良事業で建設された大規模なものから,圃場内小水路のような小規模な ものまで,その役割に応じて大小様々な施設が存在する。 特に圃場内小水路については,従来,農家にその維持管 理が委ねられていたが,2007年度から農地・農業用水 などの資源や農村環境を保全するための国の施策である 「農地・水・環境保全向上対策」が全国で展開され,農 家や地域住民による共同活動の一環として水路補修など が行われるようになった。このため,施設規模や施工者 の技量レベルに応じた補修・補強工法の開発が必要であ る。

以上のような背景を踏まえ、本研究では、農業水利 施設の中でも多数を占めるコンクリート水路に焦点を当 て、主に開水路および水路トンネルを対象として、以下 のことを目的に研究を行う。

- ①農業用コンクリート開水路における変状とその発 生原因の分析
- ②通水状態における農業用水路トンネルの機能診断 技術の開発
- ③農業水利施設の劣化予測手法の構築
- ④農業用小規模コンクリート開水路の簡易補修工法の 開発

1.2 既往の研究と研究動向

ここでは、コンクリート構造物における変状、コンク リート構造物の機能診断技術、コンクリート構造物の劣 化予測手法、コンクリート構造物の補修・補強工法に関 する既往の研究の成果と動向を示す。

1.2.1 コンクリート構造物における変状に関する研究 と動向

コンクリート標準示方書「維持管理編」(土木学会, 2007;以下「標準示方書」と記す)では、コンクリート 構造物に生じる変状を「初期欠陥」,「劣化」,「損傷」に 分類している。特に劣化については、中性化、塩害、凍 害、化学的侵食、アルカリシリカ反応(以下「ASR」と 記す)、疲労、摩耗と多岐にわたっており、数多くの研 究がなされている。それらの中で、農業水利コンクリー ト構造物の分野においては、コンクリート開水路の凍 害に関する研究(例えば、緒方ら、2008)、コンクリー トの化学的腐食に関する研究(例えば、野中ら、2001)、 コンクリート開水路のASR に関する研究(例えば、長 束ら、1995)、コンクリート開水路の摩耗に関する研究(例 えば、石神ら、2005)などがある。

また、コンクリートそのものの変状ではないものの、 コンクリート開水路には、躯体と躯体の間に設置されて いる目地材の劣化や脱落の事例が多く見られる。目地材 の劣化や脱落は目地からの漏水を伴うことが多いが、渡 嘉敷ら(2005)は、水路からの漏水は水路の水利用機能を 著しく低下させるだけでなく、漏出した水が周囲の土壌 や住環境に悪影響を与えるなど、水路管理者、周辺受益 者および周辺住民にとって重要な解決すべき課題である としている。また、長束ら(2007)は、中国四国農政局管 内2地区における重力式無筋コンクリート擁壁型水路の 機能診断結果を分析し、躯体の補修が不要とされた水路 区間であっても目地の補修を要する割合が74.7%を占 めていた事例や、路線全体の89%で目地の補修が必要 とされた事例を報告している。

一般に、水路新設時の目地材には、アスファルトゴム、 合成ゴム、合成樹脂、弾性シーリング材などが用いられ ており、圃場内小水路のような小規模水路では目地内に モルタル材が充填されていることもある。これら新設時 の目地材の劣化や脱落の要因について、石神ら(2009)は、 ①水路躯体の温度変化による伸縮挙動に対する目地材の 追従性の低下、②水路躯体に対する目地材の付着性の低 下、③太陽光に曝されることによる目地材の紫外線劣化 や加熱劣化、④水路内の流水や風雨に曝されることによ る目地材の化学的変質、などを挙げ、これらの要因が複 合的に作用している可能性を指摘している。このような 新設時の目地材の変状に対して、劣化した目地材を除去 してセメント系モルタル材や弾性シーリング材を充填す る方法、あるいは目地部全体を表面被覆材で被覆する方 法などが適用されている。また、石神ら(2006)は、上記 のような補修方法においても,水路背面からの水圧など の影響により補修目地材が施工後早期に脱落する事例 や,水路躯体の温度変化による伸縮に補修目地材が追従 できずに再損傷を生じる事例があることを示している。

一方、コンクリート構造物の損傷については、地震を 原因とするものが代表的である。特に橋梁の分野では、 1995年に発生した兵庫県南部地震による被害状況を受 けて、損傷メカニズムについて数多くの研究がなされて いる(例えば、矢部ら、1997;森山・依田、2000)。また、 近年発生した地震による農業水利コンクリート構造物の 損傷については、浅野ら(2006)が、2004年に発生した 新潟県中越地震におけるフルーム型水路側壁の曲げひび 割れやコンクリート三面張り水路側壁の倒れ込みなどの 事例を、林田ら(2008)が、2007年に発生した能登半島 沖地震におけるコンクリート柵渠の倒壊やコンクリート 分水枡の破損などの事例を報告している。

1.2.2 コンクリート構造物の機能診断技術に関する研 究と動向

コンクリート構造物の機能診断技術については、変状 の原因やその範囲を特定するための調査技術の研究・開 発が行われている。変状の中でも、中性化、塩害、凍害、 化学的腐食、ASRといった劣化については、外観調査 だけでは劣化機構や劣化範囲の特定が困難であるため、 それぞれの劣化機構に対応した調査技術が必要になる。 また、既設構造物の機能診断においては、構造物の性能 に影響を与えずに内部の欠陥などを調査するための非破 壊調査技術が求められている。以下に、劣化機構や劣化 範囲特定のための調査技術、および非破壊調査技術につ いて述べる。

(1) 劣化機構や劣化範囲特定のための調査技術

中性化によるコンクリートの劣化深さを調査するた めの方法として、フェノールフタレイン法(JIS A 1152) が用いられる。これは、対象構造物から採取したコア、 あるいははつったコンクリート表面にフェノールフタレ イン水溶液を霧吹きで吹きかけ、着色状況を確認する方 法である。中性化の評価は、鉄筋までのかぶりから中性 化深さを差し引いた「中性化残り」を指標とすることが 一般的である。

塩害の調査においては、鉄筋腐食に大きく影響するコ ンクリート中の塩化物イオン量の測定が行われる。塩化 物イオン量の測定方法には、「硬化コンクリート中に含 まれる塩分の分析方法(JCI-SC4)」、「硬化コンクリート 中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)」、「硬化 コンクリート中に含まれる塩化物イオンの試験方法(JIS A 1154)」などがある(小林ら、2007)。採取したコアな どを適切な大きさにスライスし、深さごとに粉砕して塩 化物イオンを抽出し、その量を滴定によって求める。滴 定方法としては、塩化物イオン選択性電極を用いた電位 差滴定方法、指示薬としてクロム酸カリウムを用い、硝 酸銀溶液で塩化物イオンを滴定する硝酸銀滴定法,クロム酸銀溶液で塩化物イオンを滴定する硝酸銀滴定法,クロム酸銀を溶液中に加え,生じるクロム酸イオンの吸収波 長領域における吸光度により塩化物イオン量を求めるクロム酸銀吸光光度法などがある(日本コンクリート工学協会,2007)。塩化物イオン量の測定結果に基づき,鉄筋腐食の可能性を判断するが,標準示方書では,塩化物イオン量が Cl⁻¹で 1.2kg/m³を鉄筋の発錆限界としている。

凍害は、外気に触れるコンクリート表面部分から進行 するため、凍害の劣化診断では、表面からどの程度の深 さまで劣化が進行しているかを把握することが重要とな る。表面部分については、目視によるひび割れ、スケー リング、剥離、剥落の発生状況の確認を行い、コンクリ ート内部については、既設コンクリート躯体からコアを 採取し、劣化深さを計測する方法が一般的である。最近 では、非破壊により劣化深さを推定する方法として、超 音波を使った非破壊による凍害劣化深さ推定方法の研究 が進められており(林田ら、2006)、農業水利コンクリ ート構造物の分野においても、緒方ら(2009)がコンク リート製開水路に適用し、凍害劣化の評価を試みている。

ASR の調査については、ASR であるかどうかを判断 するため、コンクリートに使用されている骨材を分析し、 ASR 反応性の有無を確認することが行われる。骨材の ASR 反応性を判定するための方法としては、化学法(JIS A 1145), モルタルバー法 (JIS A 1146) がある。また, 既設コンクリート構造物の ASR を特定できる調査技術 としては、ASR 発生時に生成されるアルカリシリカゲ ルの化学組成を調べる走査型電子顕微鏡観察(Scanning Electron Microscope: SEM)や蛍光 X 線分析などがある(日 本コンクリート工学協会, 2007)。さらに, ASR による 膨張の可能性を検査する方法として、既設コンクリート から採取したコアを促進膨張させる残存膨張量試験があ る。試験方法には、促進の程度(温度、アルカリ量など) の相違により、JCI-DD2法、デンマーク法、カナダ法に 区分されているが、いずれも現場から採取したコアを特 定条件下に放置し、膨張量を計測するものである。

化学的腐食によるコンクリート表面からの劣化深さ を特定するため、硫酸塩などの劣化因子の浸透深さを計 測する必要がある。劣化因子の浸透深さを視覚的に捉え る手法として、電子線マイクロアナライザー(Electron Probe Micro Analyzer: EPMA)がある。EPMA では、供 試体に電子ビームを照射し、供試体から反射する各元素 に特有の特性 X 線の波長を捉え、供試体に含まれる元 素の種類を同定する方法である(日本コンクリート工学 協会、2007)。下水道施設では、特に硫酸腐食が問題と なるため、防食被覆に使用される有機質被覆材料の品質 照査方法として、EPMA により硫黄の浸透深さを評価す る方法が用いられる(野中ら、2005)。

(2) 変状把握のための非破壊調査技術

コンクリート構造物の非破壊調査技術には、超音波な

どの弾性波を用いる方法,電磁波を用いる方法,電気化 学的方法がある。弾性波法は,コンクリート表面に設置 した発振子や衝撃入力装置によって内部に弾性波を発生 させ,これをコンクリート表面の受振子で測定し,内部 の欠陥の位置や寸法を測定する方法である(日本コンク リート工学協会,2007)。弾性波の入力方法や利用する 周波数帯などによって,超音波法,衝撃弾性波法,アコ ースティックエミッション(AE)法などに区分される。 超音波法をコンクリートのひび割れ深さの測定に適用す る研究事例(例えば,佐藤ら,2003)や,AE法を管路 の漏水,損傷箇所を特定するモニタリングに適用した事 例(鈴木ら,2005)がある。

電磁波法は、電磁波をコンクリート内部に放射し、透 過、屈折、反射する電磁波を捉えることにより、内部欠 陥や鉄筋位置を推定する方法である。用いる電磁波の波 長や周波数によって、電磁波レーダー法やX線透過撮 影法などに区分される。電磁波レーダー法は、農業用水 路トンネルの覆工厚や覆工背面の空洞の調査に適用した 事例(森ら,2008)がある。また、ファラデーの電磁誘 導の法則を応用して鉄筋位置の推定を行う電磁誘導法が ある。最近では、電磁誘導法による鉄筋位置やかぶりを 簡単に推定できる携帯型鉄筋探査機が各種市販されてい る(小林ら,2007)。

電気化学的方法は,鉄筋腐食量の推定や鉄筋腐食の可 能性の判定に用いられる方法である。鉄筋腐食の診断方 法として,鉄筋腐食が電子やイオンなどの電荷の移動を 伴う電気化学的反応であることに着目し,電子などの移 動に伴い発生する電位差を測定する自然電位法や,かぶ りコンクリートの電気抵抗を測定する電気抵抗法などが ある(日本コンクリート工学協会,2007)。自然電位法 をコンクリート開水路の鉄筋腐食調査に用いた事例(森 ら,2004)や,電気抵抗法をダム洪水吐底版のひび割れ 深さの調査に用いた事例(小林ら,2004)がある。また, コンクリート表面の外部電極から内部鉄筋に電流を流し たときに生じる電流変化量や電位変化量から鉄筋の腐食 速度を推定する分極抵抗法がある(日本コンクリート工 学協会,2007)。

1.2.3 コンクリート構造物の劣化予測手法に関する研 究と動向

コンクリート構造物の劣化機構のうち、中性化および 塩害については、鋼材の腐食が発生するまでの段階につ いて、比較的精度の良い予測モデルが提案されている。 中性化の進行予測には、中性化深さが建設後からの経過 時間の平方根に比例するという√f 則による予測方法が 用いられる。塩害の進行予測については、フィックの第 二法則として知られる拡散方程式を適用したコンクリー ト中の塩化物イオンの拡散予測式が用いられる。凍害に ついては、大友ら(2004)が、相対動弾性係数を劣化指 標として、相対動弾性係数と経過年数の関係を表す予測 モデルを示している。化学的腐食については、酸によ る腐食は劣化深さを √F 則により予測可能である。しか し、流水により劣化部が洗い流される場合には劣化の進 行が早まることがあり、また塩類による腐食はある時期 に劣化が急激に進行する場合が多いため、劣化機構をモ デル化することは困難であるとしている(日本コンクリ ート工学協会,2007)。摩耗については、コンクリート 舗装における交通量から摩耗量を推定する研究事例があ る(川村ら、1991)。ASR については、残存膨張量試験 により調査時点で反応がほぼ終了しているのか、それと もそれ以降も反応がさらに進行するのかを概ね把握する ことは可能であるが、反応速度を推定することは困難な 状況にある。

一方、上記で述べた劣化機構ごとの劣化予測手法の他 に,道路施設(橋梁,舗装)や港湾施設などの分野にお いては、様々な劣化予測手法についての研究が進められ ている。道路施設のうち、橋梁の劣化予測については、 森川ら(1994)が、主桁の耐荷力と断面力の差がそれら のばらつきに対してどの程度大きいかを表す指標であ る「安全性指標」の経年変化を予測する手法を示してい る。また、宮本ら(1997)は、部材ごとの健全度を表す 指標として「耐荷性」と「耐久性」の2つを考え、耐荷 性の平均健全度の劣化曲線式は四次関数を、耐久性につ いては、耐荷性の経時変化を表す曲線の微係数で表され ると考えて、平均健全度を三次関数で表す劣化曲線式を 提案している。さらに、貝戸ら(2003)は、健全度が時 間的に変化する割合を劣化速度と考えて構造物群全体の 劣化傾向を表す平均劣化曲線の算出方法を示しており、 竹田ら(2005)は、マルコフ連鎖を用いて橋梁の構造形 式や架設環境などを考慮した劣化予測を行っている。一 方,道路舗装の分野においては、武山ら(1990)や清野 ら(2006)が、マルコフ連鎖を用いて交通供用に伴う舗 装の破損状態の推移を予測する手法を提案している。

港湾施設においては、中川ら(2003)や小牟禮ら(2004) が、マルコフ連鎖を用いた鉄筋コンクリート製桟橋上部 工の劣化予測モデルを提案している。これは、コンクリ ート製桟橋上部工の機能診断結果を数段階の劣化度で評 価し、それぞれの劣化度を与えられた部材の全部材に占 める割合で表される劣化度分布が経年的に変化する状況 を予測するものである。

1.2.4 コンクリート構造物の補修・補強工法の開発に 関する研究と動向

ー般に,コンクリート構造物が用いられる分野として は,道路施設,港湾施設,下水道施設などが挙げられる。 道路施設の代表的なコンクリート構造物である橋梁を構 成する部材の多くは鉄筋コンクリートであるため,橋梁 の補修においては,中性化,塩害といった鉄筋腐食に関 係する劣化を対象とする工法が用いられることが多い。 例えば,二酸化炭素や塩化物イオンなどの劣化因子を遮 断するための表面被覆工法である。表面被覆材料には, 樹脂系やポリマーセメント系の材料が用いられることが 多いが,最近では,景観を重視した高耐久性のフッ素樹 脂系塗装材や光触媒機能を有する酸化チタンを利用した NO_xガス吸収性のある塗装材が開発されている(日本コ ンクリート工学協会,2007)。

港湾施設である桟橋では、主に塩害により低下した耐 久性の回復・向上を目的とした対策が講じられている。 例えば、塩化物イオンによるコンクリート中の鉄筋の腐 食反応を停止させるための工法として電気防食工法があ る。電気防食工法は、外部に電源を設け、強制的に電流 を流し続ける外部電源方式と、内部鋼材よりイオン化傾 向の大きい亜鉛などの金属を陽極材として鋼材と導通さ せることにより防食電流を確保する流電陽極方式に大別 される。また、既にコンクリート中に浸透した塩化物イ オンを、外部電極と鋼材との間に直流電流を流し、コン クリート外へ取り出す脱塩工法や、アルカリ性溶液をコ ンクリート中に強制浸透させてアルカリ性を回復させる 再アルカリ化工法などの電気化学的補修工法がある(日 本コンクリート工学協会、2007)。

下水道施設では、主に化学的腐食により低下した耐久 性および機能性の回復・向上を目的とした対策が講じら れている。下水道施設のうち汚水処理槽などの補修にお いては、コンクリートと防食シートが一体化することに よりコンクリートを被覆するシートライニング工法が用 いられることが多い。シートライニング工法は、コンク リート打設前に型枠に薄肉のシートを貼り付ける型枠工 法、工場製作された成形板を型枠として使用し、そのま まコンクリートに固着させる埋設型枠工法、打設済みの 躯体コンクリートに工場製作された成形板を取り付けて 一体化させる後貼り工法などがある(日本下水道事業団、 2007)。また、最近では、耐酸性に優れるアクリロイル 樹脂やポリウレア樹脂が被覆材として用いられるように なっている(日本コンクリート工学協会、2007)。

一方、コンクリート構造物の補強工法には、コンクリ ート部材断面の増厚工法、鋼板接着工法、連続繊維シー ト接着工法などがある。橋梁床版における上面増厚工法 には鋼繊維補強コンクリートが、下面増厚工法にはポリ マーセメントモルタルが増厚材として主に用いられる。 鋼板接着工法は、コンクリート部材の引張応力作用面に 鋼板を取り付け、接着剤によりコンクリートと鋼板を一 体化させる工法である。連続繊維シート接着工法は、シ ート状の補強材をコンクリート部材に接着することによ り耐荷性能の向上を図る工法である。繊維シートには、 炭素繊維やアラミド繊維などがあるが、最近では、品質 が安定し、高強度、高弾性の炭素繊維の使用が望ましい とされている(日本コンクリート工学協会、2007)。

農業水利コンクリート構造物においても,近年,様々 な補修工法が開発され,現地に適用されている。例えば, 耐摩耗性とひび割れ追従性に優れる光硬化型 FRP シー トによる補修技術(浪花ら,2006),水路トンネルの内 面に超高強度繊維補強コンクリートパネルを施工した事 例(西場,2008)などが報告されている。また,目地材 の劣化や脱落などに関しても,既に様々な補修工法が開 発(例えば,長束ら,2007;加藤ら,2008)され,現地 への適用が進められている。

1.3 本論文の構成

本研究では、農業水利施設の中でも多数を占めるコン クリート水路に焦点を当て、主に開水路および水路トン ネルを対象として、以下のことを目的に研究を行った。

- (1)農業用コンクリート開水路における変状とその発生 原因の分析
- ②通水状態における農業用水路トンネルの機能診断技術の開発
- ③農業水利施設の劣化予測手法の構築
- ④農業用小規模コンクリート開水路の簡易補修工法の 開発

本論文は、これらの研究結果をまとめたものであり、 第 I 章の序論から第 VI章の結論まで全 VI章で構成されて いる。各章の内容を以下に示す。

第Ⅱ章では、農業用コンクリート開水路における変 状とその発生原因の分析について述べる。まず、農業用 コンクリート開水路に見られる変状について整理し、そ れぞれの変状の発生原因について考察する。次に、近年 各地で施設被害を伴う地震の発生が相次いでいることか ら、地震による農業用開水路の損傷に着目し、過去に発 生した地震による農業用開水路の損傷形態の分析を行 う。特に、平成19年(2007年)新潟県中越沖地震で多 数確認されたコンクリート開水路目地部の損傷について は、過去の地震での報告事例が少なく、損傷メカニズム についての研究事例も見当たらない。そこで、本研究で は. コンクリート開水路の目地部を模擬した供試体を新 たに考案・製作し、静的載荷試験により地震時の目地部 損傷の再現を試みる。そして、目地部の形状や止水板が コンクリート躯体の損傷に与える影響について検証し. 地震による目地部の損傷メカニズムを解明する。

第Ⅲ章では,通水状態における農業用水路トンネルの 機能診断技術の開発について述べる。まず,農業水利コ ンクリート構造物の機能診断に用いられる調査技術につ いて,目視調査などの簡易的な調査技術,高精度化や効 率化を目指した調査技術,近接調査が困難な施設を対象 にした調査技術に分類し,これらの技術の現状について 分析する。次に,通水状態における水路トンネル内部の 変状調査システムの開発について述べる。従来,通水状 態における水路トンネルの調査には,有線操縦方式によ るロボットカメラなどが用いられていた。しかし,有線 操縦方式の場合,操縦用ケーブルの長さにより,調査可 能な範囲が数百 m 程度と制限されるため,延長が数 km にも及ぶような水路トンネルの調査事例はほとんど見当 たらない。そこで、本研究では、水路トンネルの延長に 左右されずに調査が可能な自然流下方式による画像撮影 システムを新たに開発する。そして、開発した調査シス テムや、他分野で用いられている水中調査技術について 現地実証試験による性能の検証を行い、今後の課題につ いて考察する。

第Ⅳ章では、農業水利施設の劣化予測手法の構築につ いて述べる。まず、農業水利施設以外の他分野の構造物 における劣化予測手法の現状について分析する。次に、 農業水利施設の劣化予測モデルの作成について述べる。 農業水利施設の劣化予測モデルについては、機能保全の 手引きに、鉄筋コンクリート開水路の標準的な性能低下 を表した「単一劣化曲線」が示されている。しかし、鉄 筋コンクリート開水路以外の農業水利施設について劣化 予測モデルを作成し、工種ごとの劣化傾向を分析した事 例は見当たらない。そこで、本研究では、全国的な規模 で実施された機能診断のデータを用いて、鉄筋コンクリ ート開水路のみならず、パイプライン、水路トンネル、 ダム,頭首工,用排水機場,水門,建屋,機械設備,電 気設備について、マルコフ連鎖を適用した劣化予測モデ ルを作成する。そして、作成した劣化予測モデルを用い て、開水路やダムといった工種区分別、土木施設や機械 設備といった施設区分別に劣化傾向の分析を行う。さら に、マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線による劣化予測 モデルの特徴について比較を行うとともに、より精度の 高い劣化予測手法の構築に向けた今後の課題について考 察する。

第V章では、農業用小規模コンクリート開水路の簡 易補修工法の開発について述べる。まず、農業用コンク リート開水路の補修に適用されている工法の現状につい て分析する。次に、小規模コンクリート開水路を対象と した簡易補修工法の開発について述べる。一般に、従来 の補修工法は専門業者による大規模な水路の補修を対象 としており、農家や地域住民の直営施工による小規模な 水路の補修を目的とした補修工法はほとんど見当たらな い。そこで本研究では、補修に関する専門知識を持たな い農家や地域住民でも施工可能な、施工が簡易で低コス トの補修工法を新たに開発する。そして、開発した工法 について性能評価や現地水路における施工性の検証を行 い、今後の課題について考察する。

第Ⅲ章では,本研究における成果を総括し,結論を述 べる。

なお,本論文は,鳥取大学大学院連合農学研究科学位 審査論文であることを付記する。

1.4 本論文における用語の定義

本論文では、標準示方書、機能保全の手引き、農業水 利施設のコンクリート構造物調査・評価・対策工法選定 マニュアル(農林水産省農村振興局整備部設計課施工企 画調整室,2007)などを参考に、論文中で用いる用語を 以下のように定義する。

変状:初期欠陥,劣化,損傷の総称

- 初期欠陥:施工時あるいは施工後短時間で発生するひ び割れや豆板,コールドジョイント,砂す じなどの症状のこと
- 劣化:時間の経過に伴って進行する構造物や部材の異 常
- 損傷:地震や衝突などによるひび割れや剥離など,短 時間のうちに発生し,その後は状況が大きく変 化しないもの
- 構造物の機能:目的または要求に応じて構造物が果た す役割
- 構造物の性能:目的または要求に応じて構造物が発揮 する能力
- 使用性能:構造物の使用性および機能性に関する性能
- 耐久性:想定される作用のもとで,構造物中の材料の 劣化により生じる性能の経時的な低下に対し て構造物が有する抵抗性
- 構造性能:水理性能および水利用性能を実体化するた めの水利構造物の形態を保持する性能
- 水理性能:用水を輸送する水理学的性能
- 水利用性能:管理者が用水を送配水し,農家がその用 水を利用できるための性能
- 要求性能:目的および機能に応じて構造物に求められ る性能
- 耐用年数:施設の性能が低下することなどにより,必 要とされる機能が果たせなくなり,当該施 設が供用できなくなるまでの期間として期 待できる期間
- 標準耐用年数:「土地改良事業における経済効果の測 定に必要な諸係数について(昭和61 年7月1日60構改C第690号)」で 示されている施設の区分,構造区分ご との設計時に規定した供用目標期間
- 補修:主に構造物の耐久性を回復または向上させるこ と
- 補強:主に構造物の構造的耐力を回復または向上させ ること
- 更新:施設全体または設備全体を新しい施設で置き換 えること

なお,施設系全体を対象とした場合は,施設 系を構成する施設の改築だけでなく,補修,補 強,改修,改築を包括して行うことも更新という

- ライフサイクルコスト:施設の建設に要する経費に,
 - 供用期間中の運転、補修など
 - の管理に要する経費および廃
 - 棄に要する経費を合計した金

額

機能診断調査:施設の機能の状態,劣化の過程および その原因を把握するための調査

- 機能診断評価:機能診断調査の結果から劣化要因およ び性能低下を判定し,機能保全対策を 検討するための根拠とする行為
- 機能診断:機能診断調査と機能診断評価を合わせた概 念
- 機能保全:施設または施設系の機能が失われたり,性 能が低下したりすることを抑制または回復 すること
- 機能保全コスト:施設を供用し,機能を要求する性能 水準以上に保全するために必要とな る経費の総額
- 直営施工:農家や地域住民などが直接自らの手で補修 などの工事を行うこと
- 簡易補修工法:補修工事に関する専門知識を持たない 農家や地域住民でも施工可能な,簡便 かつ低コストの補修工法

I 農業用コンクリート開水路における変状 とその発生原因の分析

2.1 緒論

農業水利施設の大部分は、コンクリート開水路をはじ めとするコンクリート構造物が占めている。一般にコン クリート構造物は高い耐久性を有しているが、長期間に わたる供用により様々な変状が発生する。変状の中には、 コンクリート構造物の性能を低下させるものもあり、将 来にわたり適切な性能を維持していくためには、発生し た変状が性能の発揮に影響を及ぼすものであるか否かの 判断が重要になる。

標準示方書ではコンクリート構造物に生じる変状を, 施工時に発生するひび割れや豆板, コールドジョイント, 砂すじなどの「初期欠陥」、時間の経過に伴って進行す る変状である「劣化」、地震や衝突などによるひび割れ や剥離のように短時間のうちに発生し、その後はその状 況が大きく変化しない「損傷」に分類している。これら 3 種類の変状のうち、劣化は、ある時点において軽微な 状態であっても、そのまま放置すると構造物の性能に重 大な影響を及ぼす状態にまで進行することがある。この ため、発見された変状が劣化機構から推定される劣化現 象か否かを判定し、初期欠陥や損傷と区分する必要があ る。例えば、標準示方書では、構造物の性能低下に影響 を及ぼす劣化機構として、中性化、塩害、凍害、化学的 侵食, ASR, 疲労(床版およびはり部材)ならびにすり 減りを規定しているが、発見された変状が劣化機構ごと に示されている症状に合致しているか否かにより劣化現 象の判定を行うことになる。この判定結果に基づき、劣 化機構および症状の軽重に応じた補修対策を検討する必 要がある。ただし、初期欠陥や損傷であっても、それら を契機として劣化が生じる場合もあることから、変状の 程度や発生部位に応じて、継続的な監視や補修などの対

策を検討しておく必要がある。また,地震により発生す る損傷は,規模が大きく,施設の大幅な性能低下あるい は機能喪失に至る場合が多いため,施設の重要度や想定 される損傷の内容に応じて,耐震対策を検討する必要が ある。

そこで本章では、まず農業水利コンクリート構造物の 中でも多数を占めるコンクリート開水路を対象として, コンクリート開水路に見られる主な変状の特徴およびそ の発生原因について分析する。次に、近年各地で施設被 害を伴う地震の発生が相次いでいることから、地震によ る農業用開水路の損傷に着目し、過去に発生した地震に よる農業用開水路の損傷形態を分析する。特に、平成 19年(2007年)新潟県中越沖地震で多数確認されたコ ンクリート開水路目地部の損傷については、過去の地震 での報告事例が少なく、損傷メカニズムについての研究 事例も見当たらない。そこで、コンクリート開水路の目 地部を模擬した供試体を新たに考案・製作し、静的載荷 試験により地震時の目地部損傷の再現を試みる。そして, 目地部の形状や止水板がコンクリート躯体の損傷に与え る影響について検証し、地震による目地部の損傷メカニ ズムを解明する。

2.2 農業用コンクリート開水路における主な変状とその 発生原因

農業用コンクリート開水路の変状は、①水路躯体そ のものに発生する変状(ひび割れ,骨材露出,断面欠損 など),②水路躯体以外に発生する変状(目地材の脱落, 堆砂など),③①や②の変状に起因して水路周辺環境に 発生する変状(目地からの漏水による背面土砂の流亡な ど),の三種類に大別される(森ら,2006)。以下に,各 地の現地調査で確認された農業用コンクリート開水路の 変状事例を示し,その発生原因について考察する。

(1) コンクリート躯体に発生するひび割れ

鉄筋コンクリート構造物の耐久性上有害となるひび 割れは,①鉄筋腐食が進行した結果,生じたひび割れ(鉄 筋腐食先行型)。②鉄筋腐食を促進させる原因となるひ び割れ(ひび割れ先行型). ③コンクリート自体の劣化 を表す進行性のひび割れ(劣化ひび割れ),の3種類に 分類される(日本コンクリート工学協会, 2007)。鉄筋 腐食先行型のひび割れは、中性化や塩害などにより鉄筋 が腐食し、かぶりコンクリートがひび割れるものである。 ひび割れ先行型のひび割れは、何らかの原因で生じたひ び割れが鉄筋位置に達し、ひび割れから劣化因子が侵入 して鉄筋腐食が進行するものである。ひび割れ先行型の ひび割れの中には、セメントの水和熱による温度ひび割 れのようにコンクリート打設直後に発生し、短期間で成 長が止まるものや、乾燥収縮ひび割れのように通常は数 年で成長が終了するとされているものがあるが、これら の進行性でないひび割れについては、施工中や竣工後の 早い時点に補修を行えば耐久性低下の問題には対処可能

とされている(日本コンクリート工学協会,2007)。劣 化ひび割れは、凍害やアルカリ骨材反応などにより発生 するものであり、ひび割れの進行によりコンクリート自 体の組織が緩み、強度低下を生じる。また、上記以外に、 地震や車両荷重などの外力が原因で発生するひび割れが ある。この種類のひび割れは、短時間で発生し、一般に 進行性を伴わず、「損傷」に該当するものである。

農業用コンクリート開水路に特徴的に見られるひび 割れの事例を Fig. 2-1 に示す。Fig. 2-1 は、現場打ちコ ンクリート開水路側壁の目地間のほぼ中央部に見られる 鉛直方向のひび割れであり、天端から底版付近まで伸び ている。Fig. 2-1 のようなひび割れは, 目地間の中央部 だけでなく、目地間の長さの約1/4間隔でほぼ等間隔に 見られることもある。このようなひび割れには、水路側 壁上部から水面付近まで連続しているもの、水路側壁下 部にのみ見られるもの、あるいは水路側壁上部から底版 までつながっているものが存在する。水路側壁上部に見 られるひび割れは、施工後初期の乾燥収縮や供用開始後 の温度変化などの要因によるものであると考えられる。 また、水路側壁下部に見られる鉛直方向のひび割れは、 セメントの水和熱による温度ひび割れで、水路底版を先 に打設し、側壁を後から打設したことにより底版が外部 拘束となって発生したと考えられる。これらのひび割れ は、先に述べたようにひび割れ先行型のひび割れの一種 であり、進行性がないものである。しかし、貫通ひび割 れになると躯体内部の鉄筋腐食を発生させるだけでな く、ひび割れからの漏水や背面土の吸出しを引き起こす 可能性があるため、補修の必要がある。

次に,劣化ひび割れの一種である凍害によるひび割れ の事例を Fig. 2-2 に示す。水路側壁に網の目状のひび割 れが広がっており、凍害の進行によるものと思われるコ ンクリート表面のスケーリングや断面欠損も見られる。 凍害は、コンクリート中の水分が凍結膨張することによ り発生し、長年にわたる凍結融解の繰り返しによってコ ンクリートが劣化する現象である。凍害の発生要因は, 内的要因(設計条件,施工条件など)と外的要因(環境 条件、使用条件)に分けられる(日本コンクリート工学 協会, 2007)。内的要因の例としては、コンクリートの 水セメント比や空気量などが挙げられる。水セメント比 が大きい場合や空気量が不十分な場合には、凍害発生の 可能性が高いとされている。外的要因の例としては、最 低気温,日射,水分の供給が挙げられる。実際,凍害は, 最低気温が氷点下を下回る日数の多い北海道や東北地方 などの寒冷地でよく見られる。また、凍害の発生には日 射が大きく影響しており、同じ水路であっても南側に面 した部位は日射を受ける時間が長いため、凍結融解を繰 り返す回数が多くなり、凍害が発生しやすい。水分の供 給についても、農業用コンクリート開水路は屋外に曝露 された状態にあり、非灌漑期であっても降雨や降雪によ りコンクリート表面に水分が供給されるため、凍害が発



Fig.2-1 水路側壁目地間の中央部付近に発生したひび割れ Cracks that occurred at the center of sidewall of irrigation canal



Fig.2-2 凍害により水路側壁に発生した網の目状のひび割れ Map Cracks at the sidewall of irrigation canal due to frost attack



Fig.2-3 ASR により水路側壁に発生したひび割れ Cracks on the sidewall of irrigation canal due to ASR



Fig.2-4 外力(車両荷重)により発生したひび割れ Cracks according to external (vehicle) loads

生しやすいと考えられる。

Fig. 2-3 に ASR によるひび割れの事例を示す。ひび割 れが縦横に発生し、一部では網の目状になっているのが 分かる。ASR は、アルカリシリカ反応性鉱物を含有す る骨材(反応性骨材)が、コンクリート中の高いアルカ リ性を示す水溶液と反応して、コンクリートに異常な膨 張およびそれに伴うひび割れが発生する現象である(日 本コンクリート工学協会、2007)。農業用コンクリート 開水路における ASR については四国地方の事例(長束 ら、1995)が、水路以外では北陸地方における排水機場 の事例(筧、2004)が報告されている。

ASR 対策として、1989 年にアルカリ骨材反応に関す る骨材の試験方法および判定基準,ならびにアルカリ骨 材反応抑制対策の方法が JIS に規定されたため、それ以 降に建設されたコンクリート構造物については ASR が 発生する可能性は低くなったと考えられる。しかし、数 十年にわたり ASR が進行し、補修しても再劣化する事 例も報告されている(大代・鳥居、2009)ことから、ひ び割れ対策の実施に当たっては残存膨張量の適切な予測 が重要になる。

Fig. 2-4 に外力が原因と考えられるひび割れの事例を示す。ひび割れが側壁を斜めに走り、段差を伴っているのが分かる。この水路は道路脇に設置されていることから、重車両が水路脇を通過したときに設計荷重を超える力が作用し、ひび割れが発生したと推察される。

(2) 摩耗によるコンクリート表面の骨材露出

農業用コンクリート開水路における変状の中でも特 徴的なものが, Fig. 2-5 および Fig. 2-6 に示すような摩 耗によるコンクリート表面の骨材露出である。摩耗は一 般的に、①個体と個体との相対運動である、すべり、こ ろがり、衝撃、振動による摩耗、②液体と固体の相対運 動に起因するキャビテーション摩耗、③粒子を含んだ液 体と固体との相対運動による液体エロージョンによる 摩耗に分類される(日本コンクリート工学協会, 2007)。 水利施設の中でも頭首工のように河川内に設置されてい る構造物は、②のような摩耗現象が考えられるが、農業 用コンクリート開水路は、土地改良事業計画設計基準設 計「水路工」(農林水産省農村振興局, 2001;以下「設 計基準水路工」と記す)で、最大許容流速を 3m/s と規 定しているため、②のようなキャビテーション摩耗が 発生する条件にはない。また、石神ら(2005)は、Fig. 2-6のようにモルタルが選択的に流出し、粗骨材のみが 残存し露出する選択的摩耗現象の要因の一つとして,水 路内の流水に曝されることによりコンクリート中のカル シウムが溶出する化学的な変質を挙げている。さらに, 渡嘉敷ら(2010)は、カルシウム溶脱と摩耗との関係を 把握するため、電気的促進法でカルシウムを溶脱したセ メントペースト硬化体を用いて水噴流摩耗試験による摩 耗促進試験を実施している。この試験により渡嘉敷らは、 カルシウムを溶脱した試験体の表層付近の摩耗速度は、



Fig.2-5 摩耗により側壁および底版コンクリートの粗骨材が露 出した水路 Sidewall and base concrete of irrigation canal that coarse aggregates were exposed



Fig.2-6 選択的摩耗による粗骨材の露出状況 Exposed coarse aggregates due to abrasion



Fig.2-7 ジャンカが徐々に洗掘されてできたと思われる断面欠損 Losses in concrete cross-sectional area with progress of honeycomb



Fig.2-8 凍害による断面欠損 Losses in concrete cross-sectional area due to frost attack

未溶脱領域の最大 19.4 ~ 27.6 倍の摩耗速度であり,耐 摩耗性が著しく低下していることを明らかにしている。 そして,摩耗速度の大きな領域はカルシウム溶脱領域と ほぼ一致し,カルシウムの溶脱による表層の脆弱化が摩 耗速度増加の原因であるとしている。

以上のことから、農業用コンクリート開水路におい て見られる骨材露出は、③の液体エロージョン摩耗とコ ンクリートの化学的変質が複合的に組み合わされて発生 していることが考えられる。

(3) コンクリート躯体の断面欠損

コンクリート躯体の断面欠損の事例を Fig. 2-7 および Fig.2-8 に示す。Fig. 2-7 は、粗骨材が剥落して欠損が躯 体深部にまで達している事例である。これは、初期欠陥 の一つであるジャンカが、長期間にわたる洗掘を受けた ことにより断面欠損に発展したものと考えられる。一方、 Fig.2-8 は、凍害による断面欠損の事例である。凍害の進 行により側壁天端の一部が崩落し、断面欠損が生じてい る。

(4) 地震によるコンクリート躯体の損傷

地震により発生したコンクリート躯体の損傷事例を Fig. 2-9 および Fig. 2-10 に示す。Fig. 2-9 では、目地付 近のコンクリートが大きく剥落しており、鉄筋が露出し ている。鉄筋が座屈したように変形していることから、 目地部で躯体が水路縦断方向に強く圧縮されたことによ り破壊したことが推察される。また、Fig. 2-10 では、側 壁から底版にかけて目地付近のコンクリートが剥離して おり、側壁には大きなひび割れや変形が見られる。

(5) 目地材の劣化・脱落

農業用コンクリート開水路では、躯体自体には変状は ないものの、躯体と躯体の間に設置されている目地材の 劣化や脱落の事例が多く見られる。目地材の劣化の事例 を Fig. 2-11 に、目地材の脱落の事例を Fig. 2-12 に示す。 農業用コンクリート開水路の目地材には、ゴム製の伸縮 目地材が一般に使用されているが、流水、紫外線、温度 変化などの影響を受けて Fig. 2-11 のように目地材が劣 化することが多い。また、ゴム製の伸縮目地材が使用さ れるようになる以前に設置された水路の中には、目地材 に木材を使用しているものがあり、長期間にわたる供用 中に目地材が腐食し、Fig. 2-12 のように脱落してしまう ことがある。

目地材の劣化や脱落は、漏水(Fig. 2-13)や背面土の 吸出し(Fig. 2-14)を発生させることになる。特に目地 からの漏水は灌漑用水の減少のみならず、①水路周辺の 地盤を浸食し、水路自体が不安定な状態になる、②隣接 する道路や宅地などへの浸水被害を生じさせる、③農地 への漏水により湿田化し、農業機械の作業性に支障を来 したり、転換畑に湿害を発生させたりする、などの様々 な問題を引き起こすことがある。

(6) コンクリート躯体の変位・不同沈下

農業用コンクリート開水路は、1バレル長が数mの



Fig.2-9 地震による側壁コンクリートの剥落 Exfoliation of sidewall concrete due to earthquake



Fig.2-10 側壁から底版にかけて発生した躯体コンクリートの損傷 Damages of canal joint at the sidewall and base concrete



Fig.2-11 劣化した目地材 Deterioration of joint materials



Fig.2-12 目地材の脱落 Loss of joint materials

躯体が複数個連なって構成されている。このため、1バレルごとのコンクリート躯体そのものに変状は生じていなくても、地震や地盤沈下などの影響により目地部での躯体のずれや不同沈下が生じることがある。Fig. 2-15は地震により躯体が水路縦断方向に変位したため、目地部が大きく開いている事例である。Fig. 2-16は地盤沈下により水路が不同沈下を起こしている事例である。このような変状は、漏水や溢水などによる水理性能の大幅な低下を引き起こすことが多い。

2.3 地震による農業用コンクリート開水路の損傷メカニ ズムの分析

2.2 で述べたように、農業用コンクリート開水路に損 傷を発生させる原因の一つに地震が挙げられる。特に近 年,甚大な被害を伴う地震が相次いで発生しており、農 業用施設の被害状況についても多数報告されている(例 えば、農村工学研究所、2008)。そこで、過去に発生し た地震被害をもとに、農業用開水路の損傷形態について 分析するとともに、新潟県中越沖地震の特徴的な損傷形 態であるコンクリート開水路目地部の損傷メカニズムに ついて考察を行う。

2.3.1 過去に発生した地震における農業用開水路の損 傷形態の分析

まず,過去に発生した地震による農業用開水路の損傷 形態を把握するため,文献調査を行った。文献調査の対 象については,農業用開水路の被害が甚大であり,水路 構造や地質条件などによる被害形態の差異が把握できる 文献が残されている「昭和 39 年(1964 年)新潟地震」 と「昭和 58 年(1983 年)日本海中部地震」を選定した。 また,「平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震」にお ける農業用開水路の被害について現地調査を行った。以 下に,「昭和 39 年新潟地震震害調査報告」(土木学会, 1966),「1983 年日本海中部地震 – 土地改良施設の災害 と復旧 – 」(東北農政局, 1984),および「1983 年日本 海中部地震震害調査報告書」(土木学会, 1986)の文献 調査による農業用開水路の損傷形態の分析結果,ならび に新潟県中越沖地震における農業用開水路の被害調査結 果を示す。

(1) 昭和 39 年(1964 年)新潟地震

1964年6月16日に発生した新潟地震は,新潟市の北 北東約55km,深さ約44kmを震源とする地震規模マグ ニチュード7.5の地震である。「昭和39年新潟地震震害 調査報告」によると、この地震による農業用施設の被害 は、砂地盤が広く分布している新潟県の平野部に集中し ていた。また、被害のほとんどが旧河道内で発生してお り、沖積層の厚さよりも地表から10~15,16mくらい までの表層の土質(砂地盤)によって被害様相が支配さ れていると報告されている。近傍の農地では噴砂や噴水 が確認されていることから、地盤の液状化が施設被害の



Fig.2-13 目地からの漏水 Leakage from canal joint



Fig.2-14 目地からの土砂の吸出しによる背面地盤の陥没 Sinking of ground at the back area of canal joint due to erosion of foundation soil



Fig.2-15 地震により目地部が大きく開いた状態 Opening of canal joint by earthquake



Fig.2-16 地盤沈下により不同沈下した水路 Differential settlement due to sinking of foundation

大きな要因となったと推察されている。

農業用施設の被害のうち開水路の被害は、新潟県内だ けでも延長 757km, 被害額 51 億円(当時の金額) にも 及んでいる。開水路の被害形態は、その様相から水路構 造そのものに変形や破壊が生じた「形状被害」,水路構 造そのものには被害はないが、広範囲にわたる沈下・隆 起などの地形変動により水路の縦断勾配が変わり通水機 能に支障をきたした「機能被害」、および「両者の併発 被害」に分類されている。この地震では, Fig. 2-17 に示 すように、「形状被害」が全体の74%、「機能被害」が 10%,「両者併発」が16%となっている。「形状被害」は, 「水路堤防(素掘り水路の盛土部分)の亀裂」、「沈下」、 「法崩れ」、「護岸の崩壊」、「はらみ出し」、「傾斜」など のほか、「水路底の隆起と両岸の沈下」、「水路全体の屈 曲」、「両岸が相寄って通水不能」などの例があげられて いる。また, Fig. 2-18 ~ Fig. 2-20 に示すように, 断層 による躯体のずれや目地の損傷、躯体の浮上りによるず れ、張ブロック水路における張ブロックの崩落などが確 認されている。一方、開水路の構造別の被害率(構造別 の水路延長に対する被災延長の比率)は, Fig. 2-21 に示 すように鉄筋コンクリート開水路の被害率が31%と最 も低く、無筋コンクリート、コンクリート柵渠、ブロッ ク積は 50% 以上の被災率となっており、鉄筋コンクリ ート開水路の耐震性が高いことが分かる。

(2) 昭和 58 年(1983 年)日本海中部地震

1983年5月26日に発生した日本海中部地震は、秋田 県能代市の西方約100km,深さ14kmを震源とする地震 規模マグニチュード7.7の地震である。東北農政局(1984) が行った被災状況調査(災害復旧が国庫補助対象となる 被災施設を対象)によると、この地震による農業用施設 の被害は、青森・秋田両県の日本海沿岸を中心に広範囲 に及んでおり、砂地盤地域に被災が集中している。この うち農業用開水路の被害は、1791ヵ所、200億円(当時 の金額)に及ぶと報告されている。

東北農政局の調査により明らかとなった開水路の構造別被害形態を Fig. 2-22 に示す。Fig. 2-22 より,素掘り水路を除く開水路全体の被害形態は,「倒壊」が多く,「崩壊」,「陥没」の順となっている。これを水路構造別にみると,石積・ブロック積水路では「倒壊」,コンクリート開水路では「倒壊」,柵渠では「破損」,フリュームでは「陥没」が多い。Fig. 2-23 および Fig. 2-24 に開水路の被害例を示す。Fig. 2-23 は、地盤の液状化によるものと思われる不同沈下により躯体がずれている状態である。また、Fig. 2-24 は、掛樋式の二次製品水路の躯体が台座からずれて落下している状態である。

次に基礎地質別の被害割合を Fig. 2-25 に示す。開水 路全体では砂質土が多く,粘性土・有機質土の順となっ ている。この傾向は,水路構造別にみても同様である。 いずれの水路構造においても砂質土における被災が多い ことから,地盤の液状化現象が被災の原因であると推察



より作成) Damage classification of open canal by the Niigata Earthquake in 1964



Fig.2-18 断層による躯体のずれ,目地の損傷(土木学会, 1966) Gap of concrete body and damage of canal joint due to the fault



Fig.2-19 躯体の浮上りによるずれ(土木学会, 1966) Damage of canal joint due to uplift of canal body



Fig.2-20 張ブロックの崩落(土木学会, 1966) Collapse of concrete lining



Fig.2-21 新潟地震における開水路の構造別被害率(土木学会(1966)より作成) Damage rate according to the structural classification of open canal by the Niigata Earthquake in 1964



Fig.2-22 日本海中部地震における開水路の構造別被害形態(東北農政局(1984)より作成) Damage rate according to the structural classification of open canal by the Middle Japan Sea Earthquake in 1983



Fig.2-23 不同沈下による躯体のずれ(土木学会, 1986) Shift of canal body due to differential settlement



Fig.2-24 台座からの躯体の落下(土木学会, 1986) Falling of canal from a pedestal



Fig.2-25 日本海中部地震における開水路の基礎地質別被害割合(東北農政局(1984)より作成) Damage rate according to the geological features of open canal foundation by the Middle Japan Sea Earthquake in 1983

されている(東北農政局, 1984)。

(3) 平成 19 年(2007 年)新潟県中越沖地震

2007年7月16日に発生した新潟県中越沖地震は,新 潟県上中越沖の深さ約17kmを震源とする地震規模マグ ニチュード6.8の地震である。この地震による被害は新 潟県内に集中しており,新潟県農地部発表の資料による と農業用施設の被災箇所は506ヵ所,このうち農業用水 路は277ヵ所に及んでいる(新潟県農地部,2007)。

地震から約2ヵ月半経った2007年10月4日~5日に, 被害が集中した新潟県柏崎地域振興局管内における農業 用開水路の被害状況調査を行った。調査は開水路を対象 として,柏崎市内17ヵ所,刈羽村1ヵ所の計18ヵ所で 行った。調査の結果,この地震による水路の損傷は,① 現場打ちコンクリート開水路における目地部の損傷,② 張ブロック水路における張ブロックの崩落,③コンクリ ート柵渠における柵板の崩落,④コンクリート二次製品 水路における躯体のずれ,⑤水路脇高盛土の影響による 水路側壁などの変形,⑥分水枡など付帯構造物の損傷に 概ね分類された。以下に,各損傷の内容について述べる。

1) 現場打ちコンクリート開水路における目地部の損傷

現地調査の結果、7ヵ所の現場打ちコンクリート開水 路において Fig.2-26 および Fig. 2-27 に示すような目地 部コンクリートの剥落や、Fig. 2-28 に示すようなひび割 れが多数確認された。損傷の原因は、目地部両側の躯体 同士の衝突が考えられる。なお、目地部が損傷した現場 打ちコンクリート開水路は全て平野部に位置しており、 目地部の損傷以外には側壁の傾きや躯体の浮上りなどの 目立った変状は見られなかった。

2) 張ブロック水路における張ブロックの崩落 張ブロック水路では、地震力による背面地盤の変形に



Fig.2-26 目地部コンクリートの剥落 Stripping of concrete at a canal joint



Fig.2-27 コンクリートが連続して剥落した状態 Repeated breakage of concrete at successive canal joints

よるブロックの崩落(Fig. 2-29)や,水路上下流方向に 地震力が作用した結果生じたと推察されるブロックの捲 れあがり(Fig. 2-30)が見られた。張ブロック水路は, 目地部のモルタルによりブロック同士が固定されている ため,地震による背面土の沈下や隆起に追従できず崩落 したものと考えられる。

3) コンクリート柵渠における柵板の崩落

柵渠では, Fig. 2-31 に示すような柵板の崩落が見られた。柵板そのものの破損はほとんど見られないことから, Fig. 2-32 に示すように柵留め杭が背面地盤の変形に対抗できず破損や倒壊したため,柵板が崩落したと考えられる。

4) コンクリート二次製品水路における躯体のずれ

コンクリート二次製品水路では, Fig. 2-33 および Fig. 2-34 に示すような躯体の浮上りや変位による目地部の ずれが見られた。コンクリート二次製品水路は,現場打 ちコンクリート開水路と比較すると1バレル当たりの躯 体延長が短く,壁厚も薄いため,重量が軽い。このため, 地震力に対して変位しやすく,目地部でずれたと考えら れる。

5) 水路脇高盛土の影響による水路側壁などの変形

水路脇に高盛土が存在する水路では、地震力による 盛土の変形の影響を受けて、側壁が倒壊した事例(Fig. 2-35)や、側壁が変形した事例(Fig. 2-36)が見られた。



Fig.2-28 止水板から伸びるひび割れ Crack extended from the end of a water stop



Fig.2-29 ブロックの崩落 Breakage and collapse of concrete brocks



Fig.2-30 ブロックの捲れあがり Damage of concrete blocks



Fig.2-31 柵渠における柵板の崩落 Breakage and collapse of fence boards of a drainage canal



Fig.2-32 柵留め杭の破損状況 Damage to guard pile of a concrete drainage canal



Fig.2-33 二次製品水路における躯体のずれ Gap of a precast concrete canal

6) 分水枡の損傷

分水枡側壁の損傷を Fig. 2-37 に示す。地震力により 水路躯体が縦断方向に滑動し,分水枡側に押し出された ため生じたと考えられる。

以上の文献調査および新潟県中越沖地震の現地調査 により明らかとなった農業用開水路の損傷形態および損 傷原因について,以下に整理する。

- ①砂質土地盤上に設置された開水路の場合,液状化によるものと考えられる浮上りや不同沈下が多く見られた。特にコンクリート二次製品水路では躯体のずれが多いが,これは、二次製品水路は小型で重量の軽いものが多く、地盤の液状化の影響を受けやすいためであると考えられる。
- ②水路脇に高盛土がある場合には、フリューム水路側 壁の変形や倒壊が見られた。これは、地震時に盛土 が水平方向に変形しようとして水路側壁に作用する 水平土圧が増大したためと考えられる。
- ③現場打ちコンクリート開水路では、目地部コンクリ ートの損傷が多く見られた。これは、目地部に止水 板が埋込み式に設置されていることにより躯体コン クリートが二分されて薄くなり、構造上の弱部とな っているためと考えられる。
- ④張ブロック水路や柵渠では、ブロックや柵板の崩落、 はらみ出しが見られた。これは、地震時に背面地盤 が水平方向に変形しようとして水平土圧が増大した ためと考えられる。特に張ブロック水路は、ブロッ クが背面地盤にもたれた形で設置されているため、 背面地盤の変形の影響を受けやすい。

2.3.2 コンクリート開水路目地部の損傷メカニズムの 解明

2.3.1 で述べたように,新潟県中越沖地震における農業用開水路の被害について現地調査を行った結果,現場 打ちコンクリート開水路において目地部に損傷が集中している被害状況が明らかとなった。目地部の損傷が確認 された水路は,いずれも側壁高の半分以上が地盤に埋設 されており,伸縮目地材と止水板(150mm × 5mm)が 5m間隔で設置されていた。目地部が損傷した水路の標 準的な形状を Fig. 2-38 に示す。

目地部損傷の原因としては、水路の構造上の問題と地 震力による水路躯体への急激な荷重の作用が考えられ る。現場打ちコンクリート開水路の目地部は、止水板が 水路躯体に埋め込まれた形状となっているため、止水板 により壁厚が二分されて薄くなり、止水板近傍が構造 上の弱部となっている。そこへ地震力が作用した結果、 目地部両側の躯体同士の衝突あるいは急激な圧縮によ り、止水板で部材が薄くなっている部分が損傷したと考 えられる。このことは、目地部が損傷した水路の中に、 Fig.2-37 に示すような水路躯体そのものが水路縦断方向 に滑動したと思われる痕跡を残すものがあったことから



Fig.2-34 二次製品水路における目地の開き Separation of a precast concrete canal joint



Fig.2-35 高盛土に近接した水路における側壁の倒壊 Collapse of canal sidewall besides a high embankment



Fig.2-36 高盛土に近接した水路における側壁の変形 Deformation of canal sidewall besides a high embankment



Fig.2-37 水路の突出による分水枡側壁の損傷 Damage to a diversion device by movement of the building frame

も推察される。また、コンクリートの剥落とひび割れの 関係については、まず止水板端部にひび割れが発生し、 地震力がより大きく作用した部分については、部材の変 位も大きくなり、ひび割れが側壁表面にまで達して剥落 に至ったものと考えられる。

そこで,地震力による現場打ちコンクリート開水路目 地部の損傷メカニズムを解明するため,水路の目地部を 模擬した供試体を作製して静的載荷による破壊試験を行 った。そして,目地部の形状や止水板がコンクリート躯 体の損傷に与える影響について検証した。

2.3.2.1 破壊試験①

本試験は、供試体を長軸方向に圧縮したときに止水板 周辺部コンクリートに生じる変位を計測し、止水板の有 無による供試体コンクリートの挙動や損傷形態の相違に ついて確認することを目的として実施した。

(1) 供試体

供試体は、曲げ試験用の供試体をもとに作製した 150mm×150mm×530mmの直方体である。中央部に 止水板と伸縮目地材を設置した供試体(Aタイプ)を Fig.2-39に示す。止水板は軟質塩化ビニル製(JIS 記号 FF-F 150mm×5mm),伸縮目地材はゴム発泡体製(厚 さ10mm)で、どちらも現場打ちコンクリート開水路の 目地部に使用されている材料である。止水板と目地材 の物性値を Table 2-1 に示す。また、破壊試験における 比較対象用として、Aタイプの供試体の止水板部を空洞 にした Bタイプ(Fig.2-40)および伸縮目地材のみの C タイプ(Fig.2-41)を作製した。供試体のコンクリート は Table 2-2 に示す配合とし、普通ポルトランドセメン トを使用した。円柱供試体(φ 100mm×h200mm)を 用いた材齢 28 日の圧縮強度は、3 体の平均値が 33.3 N/ mm²であった。

(2) 試験方法

破壊試験は、供試体の材齢28日に、圧縮試験機(インストロン Fast Track 8800)により行った。Fig. 2-42 に示すように供試体を圧縮試験機に設置し、長軸方向の力を加えることにより、地震発生時の現地水路において目地部が両側の躯体側壁から圧縮される状況を模擬した。供試体表面に π 型変位計を取り付け、データロガーにより試験時の止水板周辺コンクリートの変位を記録した。 π 型変位計は、目地中心から25mm および100mmの位置に、目地を挟んで2ヵ所ずつ、表裏両面で合計8ヵ所に設置した。

まず予備試験として、Aタイプの供試体を用いて圧縮 試験機のほぼ最大能力値である 5N/mm²/s の載荷速度で 試験を行った。しかし,瞬時に供試体が圧壊してしまい, 破壊時の止水板付近の挙動を確認することができなかっ た。地震時には、より大きな速度で地震力が水路躯体に 作用していると考えられるが,試験では止水板付近の挙 動を確認できるように載荷速度を,0.6N/mm²/s,0.1N/



Fig.2-38 目地部が損傷したコンクリート開水路の標準的な形状 Standard cross section of the damaged concrete canal



Fig.2-39 供試体 (A タイプ)の形状および寸法 The shape and size of test specimen (Type A)



Fig.2-40 供試体 (B タイプ)の形状および寸法 The shape and size of test specimen (Type B)





	止水板	目地材
tt 匠	軟質塩化	エラスチック
	ビニル樹脂	フィラー
引張強さ (N/mm ²)	14.7	0.98
引張破断伸び(%)	320	200

 Table 2-1
 止水板と目地材の物性値

 Physical properties of the water stop and the joint material

Table 2-2 供試体のコンクリート配合 Mix proportions of concrete

粗骨材の 最大寸法	スランプ	水セメント比	空気量	細骨材率			単位量(kg	/m ³)	
(mm)	(cm)	(70)	(%)	(%)	水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
20	8	60	5	44.3	165	275	810	1,030	0.688

 mm^2/s , 0.05N/mm²/s と小さくして試験を行った。その 結果, 0.6N/mm²/s ではまだ速度が大きく,止水板付近の ひび割れの発生を確認できなかったが, 0.1N/mm²/s およ び 0.05N/mm²/s では新潟県中越沖地震で見られたものと 同様のひび割れの発生を確認できた。よって,本研究で は, 0.1N/mm²/s を荷重条件として設定した。供試体は, A タイプと B タイプを各 3 体と, C タイプを 2 体の計 8 体を用いた。

(3) 試験結果および考察

1) 試験後の供試体の破壊状況

破壊試験後の供試体の状況を Fig.2-43 ~ Fig.2-50 に 示す。供試体番号の A-1 ~ A-3 は A タイプ, B-1 ~ B-3 は B タイプ, C-1 ~ C-2 は C タイプの供試体である。 止水板を有する A タイプの供試体については,止水板 の端部を起点とするひび割れが発生した。ただし,供試 体 A-2 については, A-1 および A-3 と比較してひび割れ の規模が大きく,供試体端部までひび割れが達しており, 圧縮荷重の偏心の影響が考えられる。一方,止水板部を 空洞にした B タイプについては, B-1 で破壊面が空洞部 を通るように破壊しているが, B-2 および B-3 では斜め に走る複数のひび割れが顕著であり, A タイプのひび割 れとは様相が異なる。また,伸縮目地材のみ設置した C タイプについては,止水板の位置に相当する部分での破 壊は見られなかった。

2) 止水板周辺コンクリートの変位

破壊試験時の供試体長軸方向の圧縮応力と止水板周 辺コンクリートにおける供試体短軸方向の変位の関係を Fig. 2-51 ~ Fig. 2-57 に示す。変位の符号は,正が供試 体短軸方向外側に,負が内側に変位したことを示してい る。また,各供試体の最大圧縮応力を Table 2-3 に示す。 さらに,Aタイプの供試体における圧縮応力と供試体長



Fig.2-42 破壊試験の状況 Destructive test



Fig.2-43 供試体 A-1 の破壊状況 Broken specimen (A-1)



Fig.2-44 供試体 A-2 の破壊状況 Broken specimen (A-2)



Fig.2-45 供試体 A-3 の破壊状況 Broken specimen (A-3)



Fig.2-46 供試体 B-1 の破壊状況 Broken specimen (B-1)



Fig.2-47 供試体 B-2 の破壊状況 Broken specimen (B-2)



Fig.2-48 供試体 B-3 の破壊状況 Broken specimen (B-3)



Fig.2-49 供試体 C-1 の破壊状況 Broken specimen (C-1)



Fig.2-50 供試体 C-2 の破壊状況 Broken specimen (C-2)



Fig.2-51 圧縮応力と変位の関係(A-1) Relation between compression stress and displacement (A-1)

軸方向の変位の関係をFig. 2-58 ~ Fig. 2-60 に示す。なお, 供試体長軸方向の変位は, 圧縮試験機の上下載荷版の間 隔の変化量を計測することにより算出している。

供試体 A-1 については, Fig. 2-51 に示すように目地 に近い部分(表裏上下 25mm)が圧縮応力1~2N/mm² で急激に 0.1mm 程度変位し, 5~10N/mm²で 変位量が 0.2mm に達している。一方,目地から遠い部分(表裏上 下 100mm)は、5~8N/mm²で変位量が 0.1mm に達し ており、変位量が 0.2 mm に達するのは 17~20N/mm² である。

供試体 A-2 については, Fig. 2-52 に示すように目地 に近い部分が圧縮応力 1~2 N/mm²で急激に 0.1mm 程 度変位し, 3~9N/mm²で 変位量が 0.2mm に達している。 一方,目地から遠い部分は,3.5~7N/mm²で変位量が 0.1mm に達しており,変位量が 0.2mm に達するのは 9 ~15N/mm²である。

供試体 A-3 については, Fig. 2-53 に示すように目地 に近い部分が圧縮応力 1 ~ 2N/mm² で急激に 0.1mm 程 度変位し, 5 ~ 17N/mm²で変位量が 0.2mm に達している。 一方, 目地から遠い部分は, 4.5 ~ 11.5N/mm² で変位量 が 0.1mm に達しており, 変位量が 0.2mm に達するのは 15 ~ 27 N/mm² である。

以上の結果から, A タイプの供試体については, 圧縮 応力に対する変位量の変化の割合を比較した場合, 目地 に近い部分が, 目地から遠い部分よりも急激に供試体短 軸方向外側に広がるように変位していることが分かる。

供試体 B-1 については, Fig. 2-54 に示すように表上 25mm, 表下 25mm および裏上 25mm において負の変位 を示している部分がある。表上 25mm, 表下 25mm およ び裏上 25mm 以外では, 圧縮の途中では変位がほとん ど見られず, 最大圧縮応力付近になってから急激に変位 している。

供試体 B-2 については, Fig. 2-55 に示すように表上 25mm および裏上 25mm において負の変位を示してい る部分がある。また, 裏下 25mm では, 18N/mm²付近 から急激に変位量が増加し, 21N/mm²付近で変位量が 0.25mm に達しているが, その他の部分では最大圧縮応 力付近になってから急激に変位している。

供試体 B-3 については, Fig. 2-56 に示すように表上 25mm および裏上 25mm において負の変位を示している 部分がある。また, 裏上 25mm では, 16N/mm² 付近で 正の変位に転じて急激に変位量が増加し, 23N/mm² 付 近で変位量が 0.2mm に達しているが, その他の部分で は最大圧縮応力付近になってから急激に変位している。

以上の結果から, Bタイプの供試体については, 供試 体長軸方向に圧縮することによりAタイプの止水板に 相当する空洞部分が閉じるように挙動していることが分 かる。

一方, Cタイプについては, Fig. 2-57 に示すように A タイプやBタイプのような変位の形態は見られなかった。



Fig.2-52 圧縮応力と変位の関係(A-2) Relation between compression stress and displacement (A-2)



Fig.2-53 圧縮応力と変位の関係(A-3) Relation between compression stress and displacement (A-3)



Fig.2-54 圧縮応力と変位の関係(B-1) Relation between compression stress and displacement (B-1)





これは, Fig. 2-49 および Fig. 2-50 の破壊状況写真に示 すように, A タイプの止水板位置に相当する部位以外で 大きく変位し破壊したためと考えられる。なお, C-1の 試験結果より破壊が生じる部位の想定が困難であったた め, C-2 では π 型変位計による計測は行っていない。

さらに, Fig. 2-58 ~ Fig. 2-60 より, A タイプの供試 体における長軸方向の変位は, 圧縮応力が 1N/mm² で 5 ~ 6mm 程度変位し, 5N/mm² で 9mm の変位量に達して いることが分かる。この急激な変位は, 供試体の中心部 に設置された伸縮目地材の変位であると考えられる。

一方,縦ひずみについては,いずれの供試体において も,横ひずみと比較して,圧縮応力に対する増加の割合 が小さく,最大圧縮応力に達する時点でも1,000µ程度 である。

3) 考察

A タイプおよび B タイプの供試体は,いずれも止水 板部で二分されている。しかし,供試体長軸方向に圧縮 すると,A タイプでは現地水路と類似したひび割れが発 生し,目地に近い止水板付近が供試体短軸方向外側に広 がるように変位するが,止水板がない B タイプは目地 に近い部分が供試体短軸方向内側(止水板部空洞が閉じ る向き)に変位することが確認された。このことから, 供試体が二分された形状よりも,止水板の存在がひび割 れの発生に大きく影響していることが推察される。

また, Fig. 2-51 ~ Fig. 2-53 において目地に近い止水 板付近が供試体短軸方向外側に 0.1mm 程度急激に変位 している時期と, Fig. 2-58 ~ Fig. 2-60 において供試体 が長軸方向に急激に変位する時期が, いずれも圧縮応力 1 ~ 2N/mm² の時期であり一致している。

以上のことから,供試体を長軸方向に圧縮すると止水板 も供試体内に押し込まれるよう圧縮され,周りのコンク リートを押し広げるように挙動したと考えられる。

2.3.2.2 破壊試験②

本試験は、供試体を長軸方向に圧縮し始めてからひび 割れ発生に至るまでの止水板端部や止水板周辺コンクリ ートのひずみの発生状況を計測し、止水板の挙動とひび 割れ発生との関係を明らかにすることを目的として実施 した。

(1) 供試体

供試体は、破壊試験①で用いた A タイプを4体作製 した。コンクリートの配合,止水板および伸縮目地材は、 破壊試験①と同仕様である。円柱供試体(ϕ 100mm × h200mm)を用いた材齢 28 日の圧縮強度は、3 体の平 均値が 31.8N/mm² であった。なお、本試験においては、 材齢 32 日目に全ての供試体について破壊試験を実施し たが、破壊試験時の材齢におけるコンクリート圧縮強度 の測定は行っていない。

(2) 試験方法

破壊試験は、破壊試験①と同様に、圧縮試験機(イン



Fig.2-56 圧縮応力と変位の関係 (B-3) Relation between compression stress and displacement (B-3)



Fig.2-57 圧縮応力と変位の関係 (C-1) Relation between compression stress and displacement (C-1)

 Table 2-3
 最大圧縮応力

 Maximum compression stress

供試体番号	最大圧縮応力(N/mm ²)	平均值 (N/mm ²)
A-1	27.7	_
A-2	28.7	28.2
A-3	28.1	-
B-1	26.7	
B-2	26.1	26.2
B-3	25.8	-
C-1	28.8	28.0
C-2	29.0	- 20.9





ストロン Fast Track 8800) を使用して供試体長軸方向に 圧縮することにより行った。止水板端部に接したコンク リート部分の短軸方向のひずみを計測するために、ひず みゲージ(1軸計測,検長60mm)を表裏上下合わせて 4ヵ所,供試体コンクリートの長軸方向のひずみを計測 するため表側下部に1ヵ所設置した。また、止水板端部 円形部分(コンクリート硬化後の止水効果を確保するた めの形状)のひずみを計測するため、表側下部に縦横2 軸計測タイプのひずみゲージ(検長 縦横各 2mm)を1 ヵ所設置した。さらに、止水板で二分されている部分の 短軸方向の変位を計測するため,表側下部に π 型変位計 を目地中心から25mm下側の位置に1ヵ所設置した。な お,ここでは, π型変位計を設置した面を「表側」,そ の反対側を「裏側」と呼ぶ。Fig. 2-61 にひずみゲージお よび π 型変位計の設置状況を示す。本試験では止水板付 近の挙動を確認できるように、荷重制御により載荷速度 を 0.1N/mm²/s として行った。

(3) 試験結果および考察

1) 試験中および試験後の供試体の破壊状況

試験中のひび割れの発生状況および試験後の破壊状 況を Fig. 2-62 ~ Fig. 2-69 に示す。なお, Fig. 2-62, Fig. 2-64, Fig. 2-66 および Fig. 2-68 における圧縮応力は, 目 視でひび割れを確認できた時点の値(圧縮荷重より換算) であり, 圧縮試験機の荷重表示の読み上げにより圧縮荷 重を確認したため, 幅を持った概略の値となっている。

Fig. 2-62 は供試体1の裏側における載荷途中の状況 を示しており、上部および下部ともに、止水板端部から 伸びるひび割れが確認できる。また、試験後の供試体1 の表側の状況を Fig. 2-63 に示す。止水板端部から伸び



Fig.2-59 圧縮応力と供試体長軸方向変位の関係(A-2) Relation between compression stress and displacement along the major axis (A-2)



Fig.2-60 圧縮応力と供試体長軸方向変位の関係 (A-3) Relation between compression stress and displacement along the major axis (A-3)



Fig.2-61 ひずみゲージなどの配置状況 Arrangement of strain gauge

るひび割れが明確になっており,止水板から離れた部分 にも大きなひび割れが発生し,コンクリートが剥離して いるところもある。

Fig. 2-64 は供試体 2 の裏側における載荷途中の状況 を示しており、上部および下部ともに、止水板端部から 伸びるひび割れが確認できる。また、試験後の供試体 2 の表側の状況を Fig. 2-65 に示す。止水板端部から伸び るひび割れが明確になっており、供試体下部において部 分的に粗骨材が露出し、剥落している。さらに止水板先 端の円形部分が横方向につぶれており、止水板全体が波 形にうねるように曲がっている。

Fig. 2-66 は供試体3における裏側下部の載荷途中の 状況を示しており、止水板端部から伸びるひび割れが 確認できる。また、試験後の供試体3の状況をFig. 2-67 に示す。止水板を挟んで斜めに大きくひび割れが発生し、 止水板がうねるように曲がっている。

Fig. 2-68 は供試体 4 における裏側上部の載荷途中の状況を示しており、止水板端部から伸びるひび割れが確認できる。また、試験後の供試体 4 の状況を Fig. 2-69 に示す。止水板から伸びるひび割れが顕著になっており、上部左側が大きく損傷し、止水板がうねるように曲がっている。

2) コンクリートのひずみ挙動

破壊試験における各供試体の最大圧縮応力を Table 2-4 に示す。4 供試体の平均値は 22.9N/mm² であったが, 最大値と最小値で 5.6N/mm² の差があり, ばらついてい た。ばらつきの原因としては,供試体がコンクリート, 止水板,伸縮目地材からなる複合構造であり,構造自体 がばらついていたことが考えられる。例えば,供試体は 縦長の直方体であり,載荷荷重が偏心する可能性がある が,載荷面の平面度や,載荷面と長軸方向軸線との角度 などのばらつきから,供試体ごとに荷重の偏心の程度が 異なることが想定される。この結果,供試体ごとに最大 圧縮応力のばらつきが生じたと考えられる。

次に, 圧縮応力と供試体短軸方向および長軸方向のひ ずみの関係を Fig. 2-70 ~ Fig. 2-73 に示す。ここで,供 試体短軸方向のひずみを「横ひずみ」,長軸方向のひず みを「縦ひずみ」と呼ぶ。ひずみの符号は,正が引張を, 負が圧縮を表している。なお,供試体 2 (Fig. 2-71) お よび供試体 3 (Fig. 2-72) は,裏側上部横ひずみのデー タが欠測になっている。

Fig. 2-70 より、供試体1については、圧縮応力が1N/ mm² に達する前に表側上部や裏側上部の横ひずみが急 激に増大し、2N/mm²で1,000µに達している。その後、 12N/mm²付近まで横ひずみは緩やかに増大しているが、 表側下部と裏側下部では、表側上部や裏側上部よりも、 ひずみの増加の割合が大きくなっている。さらに、12N/ mm²付近では、表裏の上下いずれの箇所においても横 ひずみが瞬間的に4,000~5,000µ程度増加しており、 このときにひび割れ幅が一挙に拡大した可能性が高い。



Fig.2-62 供試体1の載荷途中のひび割れ発生状況 Occurrence of cracks during the loading test (specimen1)



Fig.2-63 供試体 1 の試験後の破壊状況 Destruction situation of the test specimen1 after the loading test



Fig.2-64 供試体 2 の載荷途中のひび割れ発生状況 Occurrence of cracks during the loading test (specimen2)



Fig.2-65 供試体 2 の試験後の破壊状況 Destruction situation of the test specimen2 after the loading test



Fig.2-66 供試体 3 の載荷途中のひび割れ発生状況 Occurrence of cracks during the loading test (specimen3)



Fig.2-67 供試体 3 の試験後の破壊状況 Destruction situation of the test specimen3 after the loading test



Fig.2-68 供試体 4 の載荷途中のひび割れ発生状況 Occurrence of cracks during the loading test (specimen4)



Fig.2-69 供試体 4 の試験後の破壊状況 Destruction situation of the test specimen4 after the loading test

Table2-4 最大圧縮応力 Maximum compression stress

供試体	最大圧縮応力(N/mm ²)
供試体1	23.0
供試体2	25.7
供試体3	20.1
供試体4	22.9
平均值	22.9

Fig. 2-71 より、供試体 2 についても、圧縮応力が 1N/ mm² に達する前に横ひずみが急激に増大しており、表 側上部が 6N/mm² と 11N/mm² 付近でひずみの増加割合 が上昇している。また、表側下部と裏側下部が 10N/ mm² 付近でひずみの増加割合が上昇しており、この時 点でひび割れ幅が拡大したと考えられる。

Fig. 2-72 および Fig. 2-73 より,供試体3と供試体4 についても, 圧縮応力が1N/mm²に達する前に横ひずみ が急激に増大しているが,ひずみの増加割合が供試体1 や供試体2のように段階的に変化することもなく,2N/ mm²で1,000µに達した後は,ひずみが終局値に達する まで比較的緩やかに推移している。ただし,供試体4に ついては,裏側上部のひずみが7N/mm²付近で急激に 増加しているが,他の箇所よりもかなり小さな圧縮応力 であるため,この時点でひずみゲージが供試体から剥離 した可能性がある。

3) 止水板端部のひずみ挙動

圧縮応力と止水板端部円形部分の縦横のひずみ,およ び止水板を挟んだ躯体短軸方向の変位の関係を Fig. 2-74 ~ Fig. 2-77 に示す。すべての供試体において,圧縮応 力が 1N/mm² 付近で止水板端部の横ひずみが急激に増大 し,1~2N/mm² で 1,000~2,000μ に達している。また, 止水板端部の縦ひずみについても,圧縮応力が 1N/mm² 付近で急激に増大し,1~2 N/mm² で 2,000μ に達して いる。これは,止水板端部の円形部分が横方向につぶれ るように変形していることを示している。

一方,止水板端部のひずみには、急激に増加した後、 一旦減少している部分がある。例えば、Fig. 2-74 では圧 縮応力9~10N/mm², Fig. 2-75 では1~2N/mm²である。 これは、止水板端部付近のコンクリートに発生したひび 割れが、このとき拡大したため、止水板端部の応力が一時的に緩和されたことが考えられる。

さらに, Fig. 2-74 ~ Fig. 2-77 より,止水板端部の横 ひずみおよび π 型変位計の変位量は, Fig. 2-70 ~ Fig. 2-73 におけるコンクリート躯体の横ひずみの変化に呼 応した動きを示していることが分かる。

4) 考察

Fig. 2-70 ~ Fig. 2-73 に示すように、供試体コンクリ ートの横ひずみは、いずれの供試体においても圧縮応 力が 1N/mm² に達する前に急激に増大し、最大圧縮応力 の 1/10 以下の 2 N/mm² 付近で 1,000µ 程度に達している。 一般に、コンクリートの伸び限界ひずみは 100 ~ 200µ といわれているが(日本コンクリート工学協会、1986)、 本試験ではいずれの供試体においても 2N/mm² 程度の圧 縮応力で伸び限界ひずみの 5 ~ 10 倍もの引張ひずみが 発生しているように見える。しかし、実際にはコンクリー ト自体のひずみが 1,000µ に達しているのではなく、伸 び限界ひずみ付近でコンクリートにひび割れが発生し、 その後のひび割れ幅の拡大をひずみゲージが計測してい ることが考えられる。ここで、Fig. 2-78 に供試体 1 の圧



Fig.2-70 圧縮応力とひずみの関係(供試体 1) Relation between compression stress and strain (specimen1)



Fig.2-71 圧縮応力とひずみの関係(供試体 2) Relation between compression stress and strain (specimen2)



Fig.2-72 圧縮応力とひずみの関係 (供試体 3) Relation between compression stress and strain (specimen3)



Fig.2-73 圧縮応力とひずみの関係(供試体 4) Relation between compression stress and strain (specimen4)



Fig.2-74 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位の関係(供試体1)

Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis (specimen1)



Fig.2-75 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位 の関係(供試体 2) Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis (specimen2)











Fig.2-78 供試体 1 の圧縮応力とひずみの関係 Relation between compression stress and strain (specimen1)

縮応力とひずみの関係(Fig. 2-70を拡大)を示す。圧縮 応力が 0.4N/mm²を過ぎる当たりから横ひずみが急激に 増大しており、 $0.5 \sim 0.7 \text{N/mm}^2$ で100µに、 $0.6 \sim 0.8 \text{N/mm}^2$ で100µに、 mm²で200µに達していることが分かる。よって、0.5 ~ 0.8N/mm² でひび割れが発生している可能性が高い。

Fig. 2-79 に供試体1の圧縮応力と止水板端部円形部 分の縦横のひずみの関係(Fig. 2-74のひずみ部分を拡大) を示す。

Fig. 2-79 より, 圧縮応力 0.4N/mm² 付近から止水板端 部の横ひずみが急激に増大しており、Fig. 2-78 において 供試体コンクリートの横ひずみが急激に増大する時期と 一致している。このことから、供試体コンクリートの横 ひずみの発生は、止水板端部の変形の影響を受けてい ることが推察される。また、Fig. 2-79 において圧縮応力 0.4N/mm²付近から止水板端部の横ひずみが急激に増大 しているのは、0.4N/mm²付近に達するまでは止水板端 部以外の本体部の圧縮が先行し、その後端部円形部分が 圧縮されたためであると考えられる。

次に, Fig. 2-80 に供試体1における圧縮応力と供試体 長軸方向変位の関係を示す。Fig. 2-80 において、 圧縮応 力が 3N/mm² 付近に達するまでは長軸方向変位が急激に 増大しているが、これは供試体中心部の伸縮目地材の変 位であると考えられる。これに対して, 圧縮応力の増加 に比べて変位が小さくなっている部分(3~23N/mm²) は、主としてコンクリート躯体の変位であると考えられ る。

ここで、コンクリートにひび割れが発生したと思われ る圧縮応力は、先に述べたように 0.5 ~ 0.8N/mm² 付近 と推察されるが、このときの長軸方向変位は Fig. 2-80 か ら3~5mm 程度であることが分かる。したがって、ひ び割れが発生したのは、主に伸縮目地材が変位している 時点であり、コンクリート躯体の変位が始まる前である と考えられる。

以上のことから, 伸縮目地材が長軸方向に大きく変位

1000 止水板端部ひずみ(n) 500 止水板端部縦ひずみ 止水板端部横ひずみ

-500 1.5 2 0 0.5 压縮応力(N/mm²) Fig.2-79 供試体1の圧縮応力と止水板端部のひずみの関係

0

Relation between compression stress and strain at the end of water stop (specimen1)

しているときには、止水板がコンクリート躯体内に押し 込まれるように長軸方向に圧縮されるため、止水板端部 に応力が集中し、止水板端部の円形部分が横方向に変形 しようとして周りのコンクリートを押し広げるように挙 動したと考えられる。その結果、コンクリートの引張強 度を超える引張応力が発生し、止水板端部で二股に割け るようにひび割れが発生したと推察される。

2.3.2.3 破壊試験結果のまとめ

破壊試験①および破壊試験②の結果から明らかとな った知見は、以下のとおりである。

- (1) 圧縮試験機を用いた静的載荷試験においても, 新潟県中越沖地震で見られた、止水板端部を起点 とするひび割れが再現できる。
- (2) 1N/mm²未満の圧縮応力で、コンクリートの伸び 限界ひずみ(100~200µ)に相当する引張ひずみ が止水板端部付近のコンクリートに発生する。
- (3) 止水板端部の横ひずみの増加に合わせて、止水 板端部に接する部分のコンクリートの引張ひずみ も増加しており、供試体長軸方向の圧縮により止 水板端部に生じる横ひずみが、ひび割れの発生に 関与している。
- (4) ひび割れの発生メカニズムとして以下のことが 推察される。
 - ①供試体長軸方向に目地部が圧縮されたとき、止水 板も供試体内に押し込まれるように圧縮されるた め、止水板端部に応力が集中する。
 - ②このとき、止水板端部が供試体短軸方向に変形し ようとして周りのコンクリートを押し広げるよう に挙動する。
 - ③その結果,止水板端部付近のコンクリートに引張 強度を超える引張応力が生じてひび割れが発生す る (Fig.2-81)。



Fig.2-80 供試体1の圧縮応力と長軸方向変位の関係 Relation between compression stress and displacement along the major axis (specimen1)



Fig.2-81 ひび割れ発生のメカニズム Mechanism of occurrence of cracks

2.4 結論

本章では、農業用コンクリート開水路における主な変 状の特徴およびその発生原因について整理した。次に農 業用コンクリート開水路に発生する変状のうち、地震を 原因とする損傷に着目し、過去に発生した地震における 損傷形態の分析を行った。さらに、現場打ちコンクリー ト開水路の目地部を模擬した供試体を作製して静的載荷 による破壊試験を行い、新潟県中越沖地震における特徴 的な損傷形態である現場打ちコンクリート開水路目地部 損傷のメカニズムについて考察を行った。その結果、以 下の結論が得られた。

- (1) 農業用コンクリート開水路における変状には、コンクリート躯体のひび割れ、摩耗によるコンクリート表面の骨材露出、コンクリート躯体の断面欠損、目地材の劣化・脱落、コンクリート躯体の変位・不同沈下などが挙げられる。特に、摩耗によるコンクリート表面の骨材露出は、流水によりモルタルが流出し、残存した粗骨材が表面に露出する現象であり、農業用コンクリート開水路に特徴的な変状である。また、目地材の劣化や脱落も農業用コンクリート開水路に特徴的な変状の一つであり、漏水や背面土の吸出しを伴うことが多い。特に目地材の劣化や脱落による漏水は、周辺地盤の浸食、道路などの浸水被害、農地の湿田化などを引き起こすため、早急に補修を行う必要がある。
- (2) 過去に発生した地震による農業用開水路の被害調査の結果,以下のような損傷形態が明らかとなった。
 ①砂質土地盤上に設置された水路の場合,液状化による浮上りや不同沈下が多い。特にコンクリート二次製品水路は小型で重量の軽いものが多く,液状化の影響を受けやすいため,目地での躯体のずれが多い。
 - ②水路脇に高盛土がある場合には,盛土が水平方向

に変形しようとする影響を受けるため,フリュー ム水路側壁の変形や倒壊が発生する。

- ③現場打ちコンクリート開水路では、埋込み式に設 置された止水板により目地部が弱部となっている ため、コンクリートの剥落などが発生する。
- ④張ブロック水路や柵渠では、背面地盤が水平方向 に変形しようとしてブロックや柵板の崩落、はら み出しが発生する。
- (3) 新潟県中越沖地震において見られた現場打ちコン クリート開水路目地部の損傷原因として、以下のような損傷メカニズムが明らかとなった。
 - ①地震力により水路縦断方向に目地部が圧縮される とき、止水板も水路躯体内に押し込まれるように 圧縮されるため、止水板端部に応力が集中する。
 - ②このとき、止水板端部が水路横断方向に変形しようとして周りのコンクリートを押し広げるように挙動する。
 - ③その結果,止水板端部付近のコンクリートに引張 強度を超える引張応力が生じてひび割れが発生す る。

・ 通水状態における農業用水路トンネルの 機能診断技術の開発

3.1 緒論

第Ⅱ章で述べたように、農業水利施設の大部分はコン クリート開水路をはじめとするコンクリート構造物が占 めており、高い耐久性を有するコンクリート構造物であ っても長期間にわたる供用により、ひび割れや摩耗など 様々な変状が発生する。変状の中には施設の性能を低下 させるものもあり、将来にわたり適切な性能を維持して いくためには、定期的な機能診断調査と機能診断評価の 実施により、変状を早期に発見し、変状が施設の性能に 影響を及ぼすものであるか否かを判断する必要がある。 また,発見された変状が進行性のある劣化である場合, 劣化の進行を予測するために,変状の発生箇所や形状・ 規模を正確に計測し,記録していく必要がある。

農業水利施設のうち、線的な施設である農業用水路は 一つの路線でも延長が数km単位になる。このため、長 大な延長を有する農業用水路の機能診断調査には多大の 時間と労力を要する。一般に、農業用水路の機能診断調 査が可能な時期は非灌漑期に限定されるが、水道用水や 工業用水などとの共用施設においては、断水できる期間 が数時間から数日間と短い場合が多い。特にトンネルや サイホンは、調査機材の搬入・設置などにも時間を要す るため、開水路と比較して調査可能な時間は短くなる。 このため、短時間の断水もしくは通水状態でも変状の発 見、記録が可能な調査技術が必要になる。

一方,ダムや頭首工などの大規模施設は,人が接近し て行う調査(以下「近接調査」と記す)の実施が困難な 場合が多い。例えば,コンクリートダムの堤体,フィル ダムの洪水吐,頭首工の堰柱などの近接調査の実施には, 足場などの大規模な仮設の設置が必要であり,調査費用 も多大なものになる。このため,遠方からでも変状を発 見し,形状・規模を計測することが可能な調査技術が必 要になる。

Ⅲ章では、まず農業水利コンクリート構造物の機能診 断に用いられる調査技術について、目視調査などの簡易 的な調査技術,高精度化や効率化を目指した調査技術, 近接調査が困難な施設を対象にした調査技術に分類し、 これらの技術の現状について分析する。次に、通水状態 における水路トンネル内部の変状調査システムの開発に ついて述べる。従来、通水状態における水路トンネルの 調査には、有線操縦方式によるロボットカメラなどが用 いられていた。しかし、有線操縦方式の場合、操縦用ケ ーブルの長さにより、調査可能な範囲が数百 m 程度と 制限されるため,延長が数 km にも及ぶような水路トン ネルの調査事例はほとんど見当たらない。そこで、水路 トンネルの延長に左右されずに調査が可能な自然流下方 式による画像撮影システムを新たに開発する。そして. 開発した調査システムや、他分野で用いられている水中 調査技術について現地実証試験による性能の検証を行 い. 今後の課題について考察する。

3.2 農業水利コンクリート構造物の機能診断技術の現状 分析

農業水利コンクリート構造物の機能診断には,変状を 概略的に把握するための技術や,変状の形状・規模を正 確に計測・記録するための技術など,様々な調査技術が 用いられている。ここでは,それらの調査技術について, ①目視調査などの簡易的な調査技術,②高精度化や効率 化を目指した調査技術,③近接調査が困難な施設を対象 とした調査技術に分類し,それぞれの技術の概要と特徴 について述べる。

3.2.1 **簡易的な調査技術**

農業水利コンクリート構造物を対象に、一般に入手 できる計測器具を用いて簡便に行える主な調査方法とし て、目視調査、打音法による変状調査、リバウンドハン マーによるコンクリートの圧縮強度調査、ドリル法によ るコンクリートの中性化調査が挙げられる。以下にこれ らの調査方法の概要と特徴について述べる。

(1) 目視調査

目視調査は、対象構造物の状態を近距離から人間の目 で確認するものであり、ひび割れ、コンクリートの剥離・ 剥落、錆汁やエフロレッセンスなどの析出物、風化・摩 耗といった多くの変状を確認できる。特にひび割れは、 コンクリート構造物によく見られる変状の一つであり、 構造耐力、耐久性、防水性などの低下を引き起こすこと がある。これらの症状はひび割れ幅が大きくなるほど顕 著になる傾向があるため、補修・補強の要否の判定や、 補修・補強工法の選定に当たっては、ひび割れ幅の大小 が重要な判断基準となる(日本コンクリート工学協会、 2003)。

一般に、ひび割れの調査は、Fig. 3-1 に示すようなク ラックスケールを用いて最大ひび割れ幅の測定を行う。 クラックスケールによるひび割れ幅の測定は簡便な方法 であるが、測定者による読取り差が生じるなどの問題点 がある。最近では、小型の測定カメラと携帯型パーソナ ルコンピューターを使い、ひび割れ幅を0.01mm 単位で 表示でき、画像データと数値データをパーソナルコンピ ューターに保存できるひび割れ幅の測定器が開発されて いる(日経 BP 社、2007)。今後はこうした機器の活用 により、測定者ごとの読取り差の発生などを防止し、正 確なひび割れ幅の測定と測定データの保存・活用が可能 になると考えられる。



Fig.3-1 クラックスケールによるひび割れ幅の測定 Measurement of the crack width by crack scale

(2) 打音法による変状調査

目視による外観調査だけでは把握することが困難な コンクリートの浮きや空洞などについては、一般に打音 法が用いられる。打音法は、ハンマーでコンクリート表 面を叩いたときの音質により変状の有無を推定する方法 であり、目視調査と併用して簡便に実施できる調査方法 である。打音法による変状調査の状況を Fig. 3-2 に示す。



Fig.3-2 打音法による変状調査 Survey of effective events by hammer test

(3) リバウンドハンマーによるコンクリートの圧縮強度 調査

コンクリートの表面をリバウンドハンマーにより打 撃し、その反発硬度から圧縮強度を求めるものである。 コア採取による圧縮強度測定と比較して方法が簡便で、 構造物を破壊せずに圧縮強度を推定できるという利点 があるが、現場での測定に際しては、コンクリート面を 平滑にし、粗骨材を避けて打撃しなければならないな どの制約がある。リバウンドハンマーによる圧縮強度 の測定状況を Fig. 3-3 に示す。最近では、ハンマーでコ ンクリートを打撃したときの打撃力の時間波形を測定・ 解析することにより、簡便かつ迅速にコンクリートの圧 縮強度の推定や、表面付近の浮き・剥離の検知が可能な 携帯型の測定機器が開発されている(例えば、久保ら、 2006)。今後はこうした機器の活用により、従来よりも 簡便で正確な圧縮強度の測定が期待できる。



Fig.3-3 リバウンドハンマーによるコンクリート圧縮強度の測定 Measurement of concrete compression strength by rebound hammer

(4) ドリル法によるコンクリートの中性化調査

コンクリートの中性化の調査は、以前はコンクリート コアの採取やはつりによる方法が用いられていたが、現 在では構造物への影響が少なく、簡便に行えるドリル法 による調査が一般的である。ドリル法では、携帯型の電 動ドリルでコンクリートを削孔し、試薬(1%フェノー ルフタレイン溶液)をしみ込ませた試験紙に削孔粉が触 れて赤色に変色した時点の孔の深さを測定することによ り中性化深さ把握する。ドリル法による中性化深さの測 定状況を Fig. 3-4 に示す。



Fig.3-4 ドリル法による中性化深さの測定 Measurement of carbonation depth using drill

3.2.2 高精度化・効率化を目指した調査技術

目視調査には、ひび割れ幅などの測定値に個人差が 生じる、変状の見落としや計測に時間がかかる、などの 問題点がある。また、水道用水や工業用水との共用施設 については、調査のために断水できる時間が限られるた め、従来の目視調査では適切な調査を行うことが困難な 場合が多い。このため、短時間で精度良く変状を調査す る技術として、レーザー光や CCD ラインカメラなどを 用いた調査技術が開発されている。また、農業用コンク リート開水路に特徴的な摩耗について、表層の凹凸形状 を計測し粗度係数を推定する技術の研究が進められて いる。以下に、これらの調査技術の概要と特徴について 述べる。

(1) レーザー光による壁面画像連続撮影技術

レーザー光による壁面画像連続撮影は、レーザー光 を壁面に照射し、壁面で反射する光量の大小をフォトマ ル(光検出器)で捉えることにより、ひび割れなどの変 状を連続的に検出する調査技術である。レーザー光によ る壁面画像撮影の概要を Fig. 3-5 に示す。照射したレー ザー光が計測対象壁面にあたり、反射してくる光量の強 弱を連続的にフォトマルで計測することにより、ひび割 れの方向や長さ、位置が検出される。画像は4,096 階調 のグレースケールで撮影される。フォトマルは微弱な光 量を計測する装置であるため、できるだけ光の少ない場 所で用いる必要がある。したがって、外光の影響を受け ない水路トンネルや暗渠の調査に有効であるが、開水路 などの明るい場所での使用は困難である。およそ 1km/ hr の計測速度で調査が可能であり、断水期間が限られ ている水路トンネルにおいても迅速な壁面画像撮影が 可能である。Fig. 3-6 に本技術により撮影した水路トン ネル展開画像を示す。壁面に泥や苔などがなければ、幅 0.2mm のひび割れを検出できることが確認されている (森ら, 2006)。



Fig.3-5 レーザー光による壁面画像撮影の概要(森ら, 2004) Outline of continuous digital scanning system using laser beam



Fig.3-6 レーザー光による水路トンネルの展開画像(森ら, 2006) Continuous digital pictures of irrigation tunnel lining using laser scanning system

(2) CCD ラインカメラによる壁面画像連続撮影技術

CCD ラインカメラによる壁面画像連続撮影は,画素 が直線上に一列に配置されている CCD ラインカメラを 壁面に沿って移動させ,連続画像として撮影することに より,ひび割れや摩耗状況を連続的にデジタル画像と して記録する調査技術である。画像は1,677 万色カラー で撮影されるため,錆汁やエフロレッセンスなどの変 状の把握にも有効である。また,幅0.2mm以上のひび割 れが画像上で検出できることが確認されている(森ら, 2006)。

CCD ラインカメラによる壁面画像撮影状況を Fig. 3-7 に示す。本調査技術は長い距離の調査を短時間で行える ことから、断水時間が限られている水路の調査に有効で ある。さらに、結果がデジタル情報として記録できる ことから、経年的な変状のモニタリングが可能である。 Fig. 3-8 に CCD ラインカメラにより撮影した水路トンネ ルの壁面画像を示す。



Fig.3-7 CCD ラインカメラによる壁面画像撮影状況(森ら, 2006) On-site survey using CCD line camera system



Fig.3-8 CCD ラインカメラによる水路トンネルの壁面画像(森 ら, 2006) Continuous digital pictures of irrigation tunnel lining using CCD line camera system

(3)携帯型粗さ測定装置によるコンクリート開水路の粗 度係数推定技術

第Ⅱ章で述べたように農業用コンクリート開水路に 特徴的な変状として摩耗が挙げられる。摩耗により凹凸 が生じている水路表面は、水理性能の低下に影響を与え ると考えられる。水理性能を表す指標としてマニングの 粗度係数が挙げられるが、現地で流量観測を行い粗度係 数を算定する場合は労力と費用が掛かる上に、計測には 人為的誤差が生じやすい。そこで、中矢ら(2008a)は、 摩耗を模擬したコンクリート板水路を製作し、この模擬 摩耗水路における粗度係数 n を水理模型実験から求める とともに、模擬摩耗コンクリート板の表層の凹凸形状か ら水理模型実験で得られた粗度係数 n を説明できる変数 を明らかにした。具体的には、模擬摩耗コンクリート板 の凹凸形状の最大高さ R。(粗さ曲線の平均線から最も 高い山頂と最も深い谷の合計)および算術平均粗さ R。 (粗さ曲線の平均線からの高さの絶対値の平均値)を用 いて、式(3-1)(日野、1983)および式(3-2)で粗度 係数nを推定できることを示した。

$$n \approx 0.13 \frac{k_s^{1/6}}{\sqrt{g}} = 0.042 k_s^{1/6}$$
(3-1)

$$\mathbf{k_s} = 0.26 \times \mathbf{R_z}, \text{ is } \mathsf{L} \triangleleft \text{ is } \mathbf{k_s} = 2 \times \mathbf{R_a} \tag{3-2}$$

ここに、k_s:相当粗度、g:重力加速度である。

現地水路における凹凸形状の最大高さ R_z や算術平均 粗さ R_a を正確かつ効率的に算定する方法として,携帯 型粗さ測定装置を用いる方法がある。携帯型粗さ測定装 置による水路表面の凹凸形状の計測状況を Fig.3-9 に示 す。携帯型粗さ測定装置は、内蔵するレーザー変位計に より水路表面の凹凸の振幅を 0.01mm の精度で測定でき る。1 回の測定で 50cm 区間の凹凸を計測でき、測定ピ ッチは任意に設定可能である。測定装置は軽量で 1~2 人で測定作業を行うことが可能であり、測定データを容 易にパーソナルコンピューターやフラッシュメモリに記 録できる。携帯型粗さ測定装置を用いたコンクリート開 水路の表面凹凸の計測結果例を Fig. 3-10 に示す。この ように、携帯型粗さ測定装置を用いて水路表面の凹凸を 計測することにより、通水することなしに、水路の粗度 係数を推定することが可能である。

3.2.3 近接調査が困難な施設を対象とした調査技術 機能診断調査の実施において,施設の構造や利用形



Fig.3-9 携帯型粗さ測定装置による水路表面の凹凸形状の計測 状況(中矢ら, 2008b)

Measurement of roughness of concrete surface using mobile measurement system with laser range finder



Fig.3-10 携帯型粗さ測定装置による水路の表面凹凸の計測結果 例(中矢ら, 2008b) Result of roughness of concrete surface using mobile

measurement system with laser range finder

態から、従来の調査手法では対応できない場合がある。 例えば、人が容易に近づけないコンクリートダムの堤 体、フィルダムの洪水吐、頭首工の堰柱などの調査であ る。以下に、他分野で用いられている遠隔調査技術の農 業水利施設への適用例として、赤外線サーモグラフィ、 3次元レーザースキャナーおよびトータルステーション による変状調査技術について述べる。

(1) 赤外線サーモグラフィによる変状調査技術

赤外線サーモグラフィは、物体表面から放射される 赤外線放射エネルギーを検出し、これを見かけの温度に 換算して温度分布を画像表示することにより内部の異 常点などを把握する方法である。赤外線サーモグラフィ は、航空機や電子基板などの異常発熱部の検出方法とし て、また、医学における健康診断法の一つとして早くか ら利用されてきた(日本コンクリート工学協会, 2007)。 赤外線サーモグラフィには、非破壊かつ非接触で広範囲 にわたる表面温度の差を感知できるという特徴がある。 このため、大規模な構造物や人が容易に近づけない高所 における調査などにおいて、コンクリートの浮きや空洞 などの検出に有効な方法である。ただし、太陽光を熱源 とする温度変化を前提とした調査方法であるため、調査 は晴天時に限られ、また、計測する時間帯によってはコ ンクリート表面の温度差が小さくなり、変状部と健全部 の区別が難しくなることもある点に留意する必要があ る。頭首工の堰柱で実施した赤外線サーモグラフィによ る画像を Fig. 3-11 に示す。堰柱の上部に高温部が見ら れたため、この部分について打音検査を行った結果、浮 きが確認されている。さらに、赤外線撮影装置を移動さ せながら壁面全体の赤外線画像をラインスキャンする システムが開発されており、先述した CCD ラインカメ ラによる壁面画像撮影と組み合わせることにより、広範 囲にわたり可視画像と赤外線画像を同時に撮影するこ とが可能になっている。赤外線ラインスキャンシステム によりダムの洪水吐躯体を計測した結果を Fig. 3-12 に 示す。補修モルタルの浮きの範囲が、高温異常部として 検出された。



Fig.3-11 頭首工堰柱の赤外線画像(森ら, 2002) Infrared image about a pillar of a headwork



Fig.3-12 ダム洪水吐躯体の赤外線ラインスキャン画像(森ら, 2006) Infrared line scan of concrete at the surface of spillway

(2) 3次元レーザースキャナーやトータルステーションによる変状調査技術

3次元レーザースキャナーは、対象物の表面形状の 3次元座標値をリアルタイムに取得できる機器であり、 複雑な形状の構造物や文化財の計測,精密な地形測量 などに用いられている(例えば、ニコン・トリンブル、 2010)。3次元レーザースキャナーは、数m~数百m離 れた距離から対象物の3次元スキャンデータを取得する ことが可能であり、構造物の変位・変形、コンクリート の剥落箇所などの把握に活用できる。また、離れた位置 からひび割れ幅と位置座標を計測できるトータルステー ションも開発されている。これにより、10m離れた場所 で 0.077mmのひび割れ幅が計測可能とされている(日 経 BP 社、2006)。今後は、人が容易に近づけない場所 における変状の計測にこれらの機器を活用することが期 待される。3次元レーザースキャナーによる頭首工の変 状計測状況を Fig.3-13 に示す。



Fig.3-13 3 次元レーザースキャナーによる計測状況 Measurement of a structure using 3D digital laser scanner

3.3 通水状態における農業用水路トンネル内部の変状調 査システムの開発

農業用水路トンネルやサイホンは,通常,外部から 内部の様子が確認できず,突発的な天端の崩落(Fig. 3-14)などにより断水が発生する危険性があることから, 定期的な機能診断が不可欠である。しかし,水道用水, 工業用水との共用施設となっている農業用水路や,畑地 灌漑,地域用水などのために通年通水している農業用水 路は,長時間断水して調査を行うことが困難である。

そこで,農業用水路トンネルを対象として,通水状 態でもトンネル内部の変状を把握可能なフロート式画 像撮影装置による調査システムを開発する。そして,現 地実証試験により,開発した調査システムの性能につい て検証する。さらに,満流状態にあるトンネルやサイホ ンの調査技術として,既存の水中ロボットカメラの適用 性について検証する。



Fig.3-14 トンネル覆工の崩落の例 Collapse of a tunnel concrete lining

3.3.1 農業用水路トンネルに見られる変状の特徴と調 査項目の設定

農業用水路トンネルに見られる変状として,覆工コ ンクリートのひび割れや,打ち継ぎ目からの湧水などが ある。これらの変状は,農業用水路トンネルばかりでな く,発電用の水路トンネル,鉄道トンネル,道路トンネ ルなどでも見られる変状であり,これら他分野における トンネルの劣化判定においては,ひび割れのパターンや 進行性,欠損,湧水など,目視で得られる項目が劣化度 判定の重要な指標となっている(森ら,2004)。

変状のうち、構造的な安定性に最も関連すると考えら れるひび割れの発生原因としては、塑性圧によるもの、 ゆるみ圧によるもの、偏圧によるものがあり、特に塑性 圧やゆるみ圧によるひび割れは、構造上トンネルアーチ 部に発生するとされている(土木学会,2003)。農業用 水路トンネルの覆工に発生したひび割れの例を Fig.3-15



Fig.3-15 トンネル覆工に発生したひび割れの例 Cracks at the surface of a tunnel concrete lining

に示す。

以上のことより, 主な調査対象部位はトンネルアーチ 部とし, 調査項目には, トンネル覆工のひび割れや断面 欠損などの発生状況, 湧水の有無を設定した。

3.3.2 フロート式画像撮影装置の概要

開発したフロート式画像撮影装置の構造を Fig. 3-16 に示す。大きさは、幅 301mm, 長さ 890mm, 高さ 459mm で, 重量は約35kg である。本装置には, 農業用 水路トンネル内の変状を撮影するための高感度 CCD カ メラを搭載している。高感度 CCD カメラの性能につい ては、流下中に撮影しなければならず、流速によっては 得られる画像から細かいひび割れ幅が検出できない可 能性があることから、幅2~3mm 程度のひび割れが画 像から検出できることを目標として、有効画素数約38 万画素,最低被写体照度 0.0002 ルクスの白黒 1/3 イン チ CCD カメラとした。本装置には、気中部撮影用 2 台、 水中部撮影用2台の計4台の高感度CCDカメラを搭載 しており、4台のカメラによる撮影画像はそれぞれ640 × 480 ピクセルの解像度で動画として記録できる。装置 前方に設けた開口部から流下時の動画を高感度 CCD カ メラで撮影するシステムとなっている。動画は、フロー ト式画像撮影装置内部にある小型のパーソナルコンピュ ーターに記録される。開口部周囲には、トンネルアーチ 部の変状をより鮮明に記録するため、トンネル内部を照 らす LED 照明を設置している。現地での調査は、本装 置を農業用水路トンネル上流部坑口から投入し、下流出 口において回収後, 高感度 CCD カメラによって撮影し た動画を確認する。

また,装置上面には,水路トンネル内での移動速度を 計測し,トンネル内での位置を特定するためのドップラ ー速度計(菅原ら,2005)を取り付けている。ドップラ ー速度計は,マイクロ波の電磁波を発射し,ドップラー



Fig.3-16 フロート式画像撮影装置 Floating apparatus for taking continuous digital view of tunnel lining

効果により移動速度を計測するものであり,移動速度を 積分することにより移動距離を算出する。さらに,装置 下面には,浮遊中の装置を安定させ,かつ流速が速い場 合に可能な限り装置が低速度となるように V 字型のフ ィンを取り付けている。

3.3.3 現地実証試験によるフロート式画像撮影装置の 性能確認

まず,開水路において本装置の基本性能の確認試験を 行った。基本性能確認試験では,①装置内が浸水しない こと,②装置が左右に傾かず,かつローリングせずに安 定して流下すること,③装置が水平方向に回転せず安定 して流下することを確認した。開水路における基本性能 確認試験の状況を Fig. 3-17 に示す。次に,実際に供用 されている農業用水路トンネル2ヵ所において現地実証 試験を行った。以下に,現地実証試験の結果について述 べる。



Fig.3-17 開水路での基本性能確認試験の状況 Check test of basic performance on an open canal

3.3.3.1 現地実証試験①

(1) 試験の概要

現地実証試験の対象とした水路トンネルは、2R = 1.7mの標準馬蹄形で、全長 791mである。農業用水だけ でなく、水道用水や畑地灌漑にも利用されていることか ら、断水時間が限定されている水路トンネルである。水 路トンネル下流坑口から連続する開水路において測定し た流速は約1.2m/sで、水深は約70cmであった。水路ト ンネル上流坑口よりフロート式画像撮影装置を投入し、 下流坑口の連続する開水路内で回収した(Fig. 3-18)。 なお、本水路トンネルでは、過年度にレーザー光を用い た連続壁面画像撮影を実施しており、今回高感度 CCD カメラによって得たひび割れなどの変状の画像を比較す ることによって、検出可能なひび割れ幅などを検証した。 (2) 試験結果

まず,自然流下による撮影を2回実施した。流下に要した時間は,1回目が14分41秒,2回目が14分53秒であった。これをフロート式画像撮影装置の流下速度に

換算すると 0.9m/s であり, 流速 1.2m/s よりも若干遅い 速度で坑内を流下したことが分かる。

得られた高感度 CCD カメラの画像を分析した結果, 水路トンネル内部でフロート式画像撮影装置が水平方向 に3回転したことが判明した。これは,装置前面先端部 が側壁に接触したとき,先端部を支点として回転を始め るためであることが推察された。しかし,横向きの姿勢 のままで流下する時間は短く,すぐに前向きあるいは後 ろ向きとなった。このことから,流水方向に対する姿勢 安定性は高いことが確認された。

Fig.3-19に本装置で撮影した水路トンネル上流坑口か ら407mの地点の高感度 CCD カメラ画像を,過年度に 実施したレーザー光による壁面画像と対比して示す。レ ーザー光を用いた連続壁面画像撮影のひび割れ検出精度 がひび割れ幅0.2mm以上であることに対して,フロー ト式画像撮影装置によるひび割れ検出精度はひび割れ幅 2mm以上であった。本装置による撮影画像は、レーザ ー光による撮影画像と比較すると精度は劣るが、気中部 の遊離石灰を伴ったひび割れや、漏水を伴ったひび割れ など、周囲の壁面状況との色調が異なるひび割れであれ ば、幅2mm 未満のひび割れでも検出可能であることが



Fig.3-18 トンネルでの現地実証試験の状況 Onsite survey



Fig.3-19 CCD カメラ画像とレーザー光画像との比較 Comparison between a picture by CCD line camera system and a picture by laser scanning system

分かった。なお,下水道の鉄筋コンクリート管では,軸 方向のひび割れ幅 2mm 以上(土木学会,2005a),電力 用水路トンネルでは,ひび割れ幅 3mm 以上(安保ら, 2000)を判定基準として異常や進行性などを評価してい る事例があり,フロート式画像撮影装置による調査は十 分な精度を有していると判断できる。一方,水中部の撮 影画像は,流水の透明度が低く,壁面を確認できる画像 は撮影できなかった。

ドップラー速度計による位置特定については、トンネ ルの延長 791m に対してドップラー速度計の測定結果か ら算定した延長(トンネル内移動距離)が 648m (2回 測定の平均値)と短い結果となった。この原因としては、 装置が途中で回転した場合などにトンネル壁面からのド ップラー反射信号が受信できず、その間の信号取得欠損 によることが推察された。

(3) 流下方式の変更による調査精度の向上対策

自然流下方式では、フロート式画像撮影装置が回転 し、部分的に変状の見落としなどが発生する可能性があ る。また、流速が速くなると、フロート式画像撮影装置 の流下速度も速くなるため、高感度 CCD カメラで記録 した動画から変状を抽出することが困難となる。そこで、 フロート式画像撮影装置の回転を抑制するとともに流下 速度を制御するため、装置尾部にポリエチレン糸を固定 し、ポリエチレン糸の他端を上流坑口から一定速度で繰 り出して流下させる方式で実証試験を行った。

この方式で記録した動画を分析した結果,フロート式 画像撮影装置の回転は発生せず,自然流下方式に比べて 画像のぶれも少なく,十分に変状を確認できる画像が得 られた。ただし,装置の流下速度を用水の流速よりも極 端に遅くした場合,トンネル坑口など水流に乱れがある 場所では流水の抵抗が大きくなり,装置が左右に振られ る現象が発生し,画像がぶれることが確認された。

3.3.3.2 現地実証試験②

(1) 試験の概要

現地実証試験の対象とした水路トンネルは、2R = 4.9mの標準馬蹄形で、全長3,400mである。本水路トン ネルは、水道用水や工業用水との共用施設となっており、建設以来約40年間、一度も断水しての調査を行っ たことがなく、正確な設計図面も残されていなかった。 周辺の地質状況から、水路トンネル内に有毒ガスが充満 している危険性などがあったため、断水後の有人目視調 査に先立つ概査にフロート式画像撮影装置を使用した。 本水路トンネルにおける実証試験では、装置投入から回 収までの所要時間が58分、水路トンネル全長から逆算 した流下速度は約1.0m/s であった。

(2) 試験結果

Fig. 3-20 にフロート式画像撮影装置による画像と断 水後目視調査時のデジタルカメラ画像を示す。撮影位置 は上流坑口から 3,170m 付近(距離は後の目視調査時に


Fig.3-20 フロート式画像撮影装置画像とデジタルカメラ画像の比較 Comparison between a picture by floating apparatus

and a picture by a digital camera

確認した値)の天端付近である。フロート式画像撮影装 置およびデジタルカメラのいずれの画像からも白色の析 出物を伴う亀甲状のひび割れが確認できた。

さらに、本水路トンネルでは、フロート式画像撮影 装置にガス検知計を搭載し、流下しながら酸素濃度、可 燃性ガス濃度、硫化水素および一酸化炭素濃度を計測・ 記録した。回収後に確認したデータでは、酸素濃度は 18.6 ~ 22.6% であり、酸素欠乏症など防止規則の安全 基準である 18% 以上が確保されていることが明らかに なった。また、硫化水素などの有毒ガスも検知されなか ったため、人が入坑可能な作業環境であることが確認さ れた。

以上の結果,本装置を用いた予備調査を実施するこ とにより,断水後の有人目視調査前の安全性確認にも活 用できることが分かった。

3.3.4 水中ロボットカメラの変状調査適用性確認試験

満流状態にあるトンネルやサイホンの調査に対して は、フロート式画像撮影装置の適用は不可能である。そ こで、満流状態にあるトンネルやサイホンの変状調査に おいて、Fig. 3-21 に示すような水中ロボットカメラの適 用性について検証を行った。水中ロボットカメラは、海 洋調査分野で既に確立されていた探査機械を応用したも のであり、抜水ができないダムの放流管や発電用水路の 水中点検用として従来から利用されている。

今回現地実証試験に用いた水中ロボットカメラは,



Fig.3-21 水中ロボットカメラ Remotely operated vehicle



Fig.3-22 水中ロボットカメラに取り付けたクラックスケール Remotely operated vehicle with crack scale



Fig.3-23 水中ロボットカメラによるサイホンのひび割れ調査 状況

Crack survey inside a siphon by remotely operated vehicle



 Fig.3-24
 透明度の低い流水下での水中ロボットカメラによる 撮影画像

73

A picture by a remotely operated vehicle under the condition of low transparency 1/3 インチ CCD カメラ, 投光器 (ハロゲンランプ) 3 器, 推進用スラスター4 機を装備しており,有線操縦により 最大 150m 離れた箇所の撮影が可能である。現地実証試 験に当たり,水中ロボットカメラに Fig. 3-22 に示すよ うなクラックスケールを取り付け,ひび割れ幅の確認が できるようにした。

現地実証試験の対象としたサイホンは、1.25m× 1.25mのボックス構造で、全長61mである。水中ロボ ットカメラによるサイホンのひび割れの調査状況を Fig. 3-23に示す。本サイホンを流下する農業用水は透明度 が高く、サイホン躯体に接近して撮影することによりひ び割れ幅の計測を行うことができた。しかし、3.3.3.1 で述べた現地実証試験①における水路トンネル下流坑口 付近の開水路で撮影試験を行ったところ、流水の透明度 が低く(濁度5.8)、カメラの直前に設置した箱尺の目盛 りを確認することはできなかった。このときの撮影画像 を Fig. 3-24 に示す。

3.3.5 通水状態における農業用水路トンネル内部の変 状調査システムの課題

フロート式画像撮影装置による通水状態での農業用 水路トンネルの調査システムについては、現地実証試験 を通して、以下のような課題が明らかとなった。

- ①自然流下方式のため装置の姿勢制御ができず,側壁 に接触した場合,装置が水平方向に回転し,部分的 に変状の見落としなどが発生する可能性がある。
- ②水路トンネル内での変状箇所の正確な位置や規模の 特定が困難である。
- ③流下速度が速い場合は記録画像の分析が困難であ る。
- ④水中部の撮影は流水の透明度が高くなければ困難である。

このため,安定した画像が得られる姿勢制御技術,流速 の影響を受けない画像撮影技術などの研究を進める必 要がある。

また,水中ロボットカメラによるトンネルやサイホン の調査については,流水の透明度の高い水路での使用に 限定されるという課題がある。ただし,水中ロボットカ メラは自由に調査箇所を移動できるため,例えば音響セ ンサーを搭載し,壁面に接近しての漏水音検知など,画 像撮影以外の機能を組み合わせることにより水中での変 状調査に活用できる可能性がある。このため,画像撮影 以外の変状探知技術の研究を進める必要がある。

3.4 結論

本章では,まず,主に農業水利コンクリート構造物の 機能診断に用いられる簡易的な調査技術,高精度化・効 率化を目指した調査技術,近接調査が困難な施設に対応 した調査技術の現状について分析した。次に,通水状態 における水路トンネル内部の変状を把握可能なフロート 式画像撮影装置による調査システムを開発し,開発した 調査システムの概要と性能の検証結果について述べた。 さらに,満流状態にある水路トンネルやサイホンの調査 技術として,既存の水中ロボットカメラの適用性につい て検証を行った。そして,開発したフロート式画像撮影 装置による調査システム,および既存の水中ロボットカ メラを水路トンネルの機能診断へ適用するに当たっての 課題について考察した。その結果,以下の結論が得られ た。

- (1) 簡易的な調査技術の事例として、目視調査、打音法 による変状調査、リバウンドハンマーによるコンク リートの圧縮強度調査、ドリル法によるコンクリ ートの中性化調査が挙げられる。最近では、正確 なひび割れ幅の測定と測定データの保存・活用が 可能な測定機器や、簡便かつ迅速にコンクリート の圧縮強度の推定および表面付近の浮き・剥離の 検知が可能な携帯型の測定機器が開発されており, 今後はこのような機器の活用により、簡便かつ正 確な機能診断調査の実施が期待できる。また、高 精度化・効率化を目指した調査技術の事例として, レーザー光による壁面画像連続撮影技術, CCD ラ インカメラによる壁面画像連続撮影技術、携帯型粗 さ測定装置によるコンクリート開水路の粗度係数 推定技術が挙げられる。これらの調査技術の活用 により、断水時間が限られる施設においても短時 間で精度の高い調査の実施が期待できる。さらに、 近接調査が困難な施設に対応した調査技術の事例 として、赤外線サーモグラフィ、3次元レーザース キャナー, トータルステーションを活用した変状 調査技術が挙げられる。赤外線サーモグラフィは, 天候条件により使用が制限されるものの, 大規模 な構造物や人が容易に近づけない高所における調 査などへの活用が期待できる。3次元レーザース キャナーやトータルステーションについても、離 れた位置からひび割れ幅を詳細に計測できるなど, 高精度かつ効率的な変状調査が可能であり、ダム や頭首工など大規模施設の機能診断調査への活用 が期待できる。
- (2) 通水状態おける農業用水路トンネルの変状を把握可能なフロート式画像撮影装置による調査システムを開発した。現地実証試験の結果、本装置のひび割れ検出精度はひび割れ幅2mm以上であり、遊離石灰を伴ったひび割れや漏水を伴ったひび割れなど、周囲の壁面状況との色調が異なるひび割れであれば、幅2mm未満のひび割れでも検出可能であることが分かった。また、有人目視調査前に本装置を用いた予備調査を実施することにより、有毒ガスの有無など安全性確認にも活用できることが分かった。

一方、以下のような課題が明らかとなった。

- ①自然流下方式のため装置の姿勢制御ができず,側 壁に接触した場合,装置が水平方向に回転し,部分 的に変状の見落としなどが発生する可能性がある。
- ②水路トンネル内での変状箇所の正確な位置や規模の特定が困難である。
- ③流下速度が速い場合は記録画像の分析が困難であ る。

④水中部の撮影は流水の透明度が高くなければ困難である。

このため,今後,安定した画像が得られる姿勢制 御技術,流速の影響を受けない画像撮影技術など の研究が必要である。

さらに、満流状態にあるトンネルやサイホンの 調査技術として、既存の水中ロボットカメラの適用 性について検証したところ、透明度の高い流水中で は、壁面に接近して撮影することにより、ひび割れ 幅の計測を行うことができることが確認できた。た だし、透明度の低い流水中では画像撮影が困難であ るため、漏水音探知などの変状探知技術の研究が必 要である。

▶ 農業水利施設の劣化予測手法の構築

4.1 緒論

農業水利施設に対して適切な機能保全対策を実施する ためには、劣化の進行に伴う施設の性能低下が、いつ、 どのレベルに達するかを予測することが重要である。劣 化の進行は施設の立地環境や使用条件に大きく影響され るため、対象とする施設の劣化機構を推定し、劣化機構 別に劣化予測手法を設定する必要がある。例えば、鉄筋 コンクリート構造物の劣化機構である中性化と塩害につ いては、鉄筋が腐食するまでの段階で問題となる二酸化 炭素や塩化物イオンといった、鋼材腐食要因のコンクリ ート中への侵入に関する予測モデルが提案されている (土木学会, 2007)。

一方,農業水利施設については,鉄筋コンクリート開 水路の標準的な性能低下曲線である「単一劣化曲線」が, 機能保全の手引きの中で示されている。単一劣化曲線 は,農林水産省が全国的な規模で実施した機能診断結果 を統計処理することにより作成された劣化予測モデルで ある。機能保全の手引きでは,実際の劣化予測において, 個々の施設の機能診断結果に基づき,単一劣化曲線を補 正して将来の性能低下を推定する方法を用いるとしてい る。しかし,農業水利施設には,鉄筋コンクリート開水 路以外にも,パイプライン,水路トンネル,ダム,頭首工, 用排水機場,水門といった様々な工種が存在し,構造も コンクリートだけでなく,鋼構造や土構造物など様々で ある。さらに,これらの施設に付帯する機械設備や電気 設備,管理棟などの建屋も存在する。このため,様々な 工種・構造にも適用可能な劣化予測手法の確立が急務で あると考える。

本章では、まず、農業水利施設以外の他分野の構造物 における劣化予測手法の現状について分析する。次に、 全国的な規模で行った農業水利施設の機能診断結果を用 いて、開水路、パイプライン、水路トンネル、ダム、頭首工、 用排水機場、水門、建屋、機械設備、電気設備について、 マルコフ連鎖を適用した劣化予測モデルを作成する。そ して、開水路やダムといった工種区分別、土木施設や機 械設備といった施設区分別に劣化傾向の分析を行う。さ らに、マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線による劣化予 測モデルの比較を行うとともに、より精度の高い劣化予 測手法の構築に向けた今後の課題について考察する。

4.2 他分野の構造物における劣化予測手法

道路施設や港湾施設など他分野の構造物では,従来か ら劣化予測手法についての研究が進められている。特に 道路橋の分野では,劣化予測モデルを作成し,実際の維 持管理計画の策定に活用している事例がある。以下に, 他分野の事例として,道路橋,道路舗装および港湾施設 における劣化予測手法の研究状況について述べる。

(1) 道路橋における劣化予測手法

道路橋における劣化予測モデルとしてマルコフ連鎖 モデルがある。マルコフ連鎖モデルは、ある状態から次 の状態にある確率をもって推移する現象を表す手法であ る(マルコフ連鎖モデルの詳細については、4.3 で述べ る)。マルコフ連鎖モデルを実際に適用している事例と しては、アメリカにおける標準的な橋梁の維持管理シス テムである「PONTIS」がある。PONTISとは、ラテン 語で橋を意味する「PONS」に由来する(藤井・前川, 1995)。PONTIS においては、2年ごとに実施される橋梁 の点検結果に基づく各部材の損傷度をいくつかの損傷ラ ンクに分類することによって離散的に表現している。そ して、各損傷ランクが年数を経るごとに損傷度の大きい ランクに徐々に移行する速度を,2年間で状態iから状 態 j に移行する確立 P"(推移確率)を用いて表している (宮本ら、1997)。また、PONTISでは、あらかじめ何人 かの橋梁技術者の経験を基にして得られた損傷劣化予測 モデルを用いるが、2回以上の橋梁点検データが蓄積さ れると自動的に回帰分析を行い、損傷劣化予測モデルが 修正される仕組みになっている(藤井・前川, 1995)。 つまり、点検回数が増えるごとに劣化予測モデルの予測 精度が向上することになる。

PONTIS における RC 床版の損傷劣化進行予測の例を Table 4-1 に示す。Table 4-1 の例から,建設当初は全て が健全であった床版が,供用年数を経るごとに大きな損 傷度ランクの占める割合が増加している傾向が分かる。 ただし,この劣化予測モデルは,ある特定の部位の劣化 を予測するものではなく,複数の橋梁における RC 床版 群を対象とした予測であることに留意する必要がある。

一方,我が国における道路橋の劣化予測手法には,北

 Table 4-1
 損傷劣化進行(RC 床版)(藤井・前川, 1995)

 Deterioration progress (RC slab)

(単位:%)

±日	供用年数(年)					
	0	10	20	30	40	50
1. 無欠陥	100	73	56	40	30	21
2. 小さなクラックまたは表面剥離	0	17	19	15	11	8
3. 鉄筋露出, 断面欠損	0	6	8	7	6	4
4. さらに進行した損傷	0	4	12	16	17	13
5. 崩壊	0	0	5	22	36	54

Table 4-2 橋梁部材の健全度評価基準(北海道建設部, 2006) Soundness evaluation standard of bridge materials

損傷度 判定区分	一般的状況	点検健全度
Ι	損傷が著しく、交通安全確保の支障となる恐れがある。	1
П	損傷が大きく、詳細調査を実施し補修・補強の要否の検討を 行う必要がある。	2
Ш	損傷が認められ、追跡調査を行う必要がある。	3
IV	損傷が認められ、その程度を記録する必要がある。	4
ОК	点検の結果から、損傷は認められない。	5

海道建設部によるものがある。北海道建設部の事例では, 各部材の健全度(点検健全度)を点検結果から得られた 損傷度判定区分に基づき1~5の5段階で評価している (Table 4-2)。劣化予測モデルの作成に当たっては,まず, 北海道全体で過去に蓄積された橋梁点検結果を用いて, 点検健全度ごとに経過年ごとの損傷橋梁数を集計し,各 点検健全度への平均到達年数を求めている。その上で, 各点検健全度への平均到達年数をもとに二次曲線による 近似式を求めて,劣化曲線を設定している。

2004 年度までに蓄積された北海道全体の橋梁点検結 果のうち, PC 橋 658 橋分の床版の点検健全度データを 使用して作成した劣化予測モデルの例を Fig.4-1 に示す。 この劣化予測モデルは, ①劣化要因が特定できない場合



Fig.4-1 PC 橋床版の劣化予測モデル(北海道建設部, 2006) Deterioration prediction model of PC slab at a bridge

や複合的な劣化要因による劣化の場合でも予測が可能, ②個別橋梁の部材ごとに補修時期が確定的に算定でき る,③各橋梁の環境条件や交通条件などにより点検デー タを分類することで予測精度の向上が可能,といった特 徴がある。しかし一方で,各点検健全度の分布のピーク が分散している部材があり,平均到達年は真の平均値と は限らないといった課題があるとしている(北海道建設 部,2006)。

(2) 道路舗装における劣化予測手法

道路舗装の分野においては,武山ら(1990)がマルコ フ連鎖モデルを用いてアスファルト舗装の経年的な破 損の遷移を表現し,交通供用に伴う舗装の破損状態の推 移を予測する手法を提案している。具体的には,ひび割 れ率,わだち掘れ深さおよび縦断凹凸量の測定データか ら算定される PSI (Present Serviceability Index)と呼ばれ る指標を用いて舗装の状態を5段階のランクで評価し, 各ランクの占める割合が経年的に推移する状況を,マル コフ連鎖を用いて予測するものである。PSIの算定式を 式(4-1)に,舗装の状態の評価基準を Table 4-3 に示す。

Table 4-3 舗装の状態の評価(武山ら, 1990) Soundness evaluation of payement

Soundiless evaluation of pavement						
ランク	PSI	対応工法				
1	$4\sim$	—				
2	3~4	—				
3	$2 \sim 3$	表面処理				
4	1~2	オーバーレイ				
5	~ 1	打換え				

$$PSI = 4.53 - 0.518 \log \sigma - 0.371 \sqrt{C} - 0.174 D^2$$
 (4-1)

ここに, σ:縦断方向の凹凸量の標準偏差 (mm), C: ひびわれ率 (%), D:わだち掘れ深さの平均 (mm) である。 また, 武山ら (1990) が, 建設省東北地方建設局 (当時)



Fig.4-2 舗装状態の推移確率の経年変化 Secular change of transition probability of pavement

の路面性状調査のデータを使用して作成した舗装状態の 推移確率の経年変化(10年間)を Fig. 4-2 に示す。Fig. 4-2 より,舗装が良好な状態から徐々に供用性が低下し ていく状況がよく分かる。

(3) 港湾施設における劣化予測手法

港湾施設における劣化予測手法として、中川ら(2003) は、マルコフ連鎖を用いた鉄筋コンクリート製桟橋上部 工の劣化予測モデルを提案している。そして、劣化予 測モデルの作成に当たり、桟橋の劣化度を床版や梁部材 ごとに劣化度0~劣化度Vまでの6段階で評価している (Table 4-4)。評価結果に基づき、全部材数に対する各劣 化度の部材数の割合(劣化度分布)を作成している。供 用開始から35年が経過した桟橋床版のマルコフ連鎖モ デルによる劣化予測結果をFig. 4-3に示す。Fig. 4-3より、 経過年数に伴って劣化の進行した部分の割合が徐々に増 加していく傾向が分かる。

Table 4-4	桟橋の劣化度判定基準(中川ら,	2003)
Dete	rioration evaluation standard of a pier	

劣化	度部材 頁目	0	Ι	П	Ш	IV	V
表	面積	なし	コンクリート表面 に点錆が見られる (鉄筋腐食発生)	一部に錆汁が見ら れる	錆汁多し	浮き錆多し	浮き錆著しい
露出	出鉄筋	なし	なし	露出した鉄筋が1~ 3箇所程度見られる	露出した鉄筋が数 箇所見られる	露出した鉄筋の腐 食及び断面減少が 見られる	露出した鉄筋の腐 食が著しく,断面 が5%以上減少して いる
ひ び	床版	なし	1方向にひび割れが 見られる	1方向にひび割れが 多く見られる	2方向に幅0.05mm以 上のひび割れが見 られる	2方向に幅lmm以上 のひび割れが広い 範囲に見られる	_
われ	梁	なし	垂直方向にひび割 れが見られる	垂直方向にひび割 れが多く見られる	軸方向に幅 0.05mm 以上の腐食ひび割 れが見られる	軸方向に幅1mm以 上の腐食ひび割れ が見られる	_
遊園	准石灰	なし	部分的な遊離石灰 の溶出が1~3箇所 程度見られる	遊離石灰の溶出が 数箇所見られる	遊離石灰の溶出が 広い範囲に見られ る	_	_
洞離	^{孚き} ・剝落	なし	なし	小規模な浮き,剥 離・剥落が見られ る (20%未満)	20~50%未満の浮 き,剥離・剝落が 見られる	50~70%未満の浮 き,剥離・剥落が 見られる	70%以上の浮き, 剥離・剥落が見ら れる



Fig.4-3 桟橋床版の劣化進行予測結果(中川ら(2004)を一部修正) Result of a prediction of deterioration progress at a slab of a pier

4.3 農業水利施設の劣化予測モデルの作成

農業水利施設の劣化予測モデルの作成に当たっては, 施設別あるいは部材別に劣化機構や経年的な劣化の状 況が分かる機能診断データが必要になる。これまでに農 業水利施設の機能診断を行った事例としては,広域基盤 整備計画調査における機能診断がある。広域基盤整備計 画調査においては,部材別の詳細な機能診断は行われて いないが,全国で統一された定性的な評価基準に基づ き,ダム,頭首工,パイプラインなどの多工種にわたり 機能診断が行われている。ここで,広域基盤整備計画調 査とは,「国営かんがい排水事業等により基幹的農業水 利施設が整備されている大規模かつ優良な農業地域に おいて,食料生産の重要な基盤である農業水利施設を適 切に維持・更新していくため,施設の長寿命化に配慮し つつ,計画的かつ機動的に更新整備を行うための基礎調 査」とされている(例えば,関東農政局,2010)。

そこで、本研究では、農業水利施設についての多数 の機能診断データを有する広域基盤整備計画調査の結 果を用いて、他分野での適用事例が多く、劣化機構を問 わず構造物の経年的な劣化の進行を表すことが可能な マルコフ連鎖による劣化予測モデルを作成することに した。

4.3.1 広域基盤整備計画調査の機能診断データによる 農業水利施設の劣化傾向の把握

広域基盤整備計画調査では統一的な判定基準により 機能診断が行われており,目視を主体とした機能診断の 結果から明らかとなった施設の状態に基づき,施設の劣 化度を A, B, C の 3 段階で評価している。3 段階評価 に当たっては,Table 4-5 に示す総合判定基準を用いて いる。なお,劣化予測モデルの作成に用いたデータは, 1999 ~ 2004 年度に全国の国営造成水利施設を対象に行 われた機能診断結果に基づくものである。

工種区分別,施設区分別のデータ数を Table 4-6 に示 す。Table 4-6 中の施設区分は、コンクリート構造物や

Table 4-5 広域基盤整備計画調査の総合判定基準 Comprehensive evaluation standard of wide area master plan survey

改修の 総合判定	А	В	С
判定基準 の内容	施設の劣化が比設 酸的多く, して が して や は た し に や 対 が 必 で に 早 し 、 の で に や は が の 、 の し て や た は た し て や お が に し こ の で に も た は た し て や た は た し た た は た し た た し た た し た た は た し た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た は た た お が に 、 し に で た に な た は た た お た に な た た は た た お た に た は た た は た た た は た た か た に た に た に た に た に た に た に た に た に た に た た は た た か た に た た は た か た た た は た た た は た た お た た に た た た は た た た た た た た た た た た た た	現状症設施になった。 現状ではそれに支 にないもののが 見受状態を整備の影響 急性は低い)	施設構造でした。 施設構造でした。 などの健心である。 にない健心である。 にないので、 たいで、 ない ないで、 ない ないで ないで ない ない ない ない

パイプラインの管本体などを「土木」に、ゲートやポン プなどを「機械」に、制御システムや受配電盤などを「電 気」に、そして管理棟や操作室などの建築部分を「建屋」 に分類している。「土木」のうち水路系については1路 線当たり1件のデータとなっている。

ここで、広域基盤整備計画調査の総合判定結果である A ~ C の出現頻度を 10 年間隔で供用年数別に整理し、 時系列による劣化傾向の有無を検討した。工種区分別、 施設区分別の各供用年数における劣化度の割合を Fig. 4-4 および Fig. 4-5 に示す。

Fig. 4-4 および Fig. 4-5 より,いずれの工種区分,施 設区分においても、供用年数の経過に従い、劣化度 A においても、供用年数の経過に従い、劣化度Aや劣化 度 B の占める割合が増加する傾向が認められる。また、 施設区分で比較すると、土木施設よりも機械設備や電気 設備の方が劣化の進行が速い傾向にある。さらに、土 木施設の中でも工種の相違により劣化速度が異なって いることが分かる。例えば、健全な状態である劣化度 C の割合が 50% を下回る供用年数が、開水路(土木)は 20 年以上,パイプライン(土木)と水路トンネル(土木)は30 年以上,頭首工(土木),機場(土木),水門(土木)は40 年以上,ダム(土木)は50年以上となっている。一方, 電気設備については、ダム(電気),頭首工(電気),機場(電 気)のように供用開始後20~30年以上になると、逆に 健全な施設が増加する傾向が見られる。これは、 電気設 備の耐用年数が短く、土木施設や機械設備よりも早い時 期に更新されるケースが多いためであると考えられる。

以上のように,個々の施設の立地環境や施工条件は異 なるものの,マクロ的な機能診断データを分析すること により,工種区分あるいは施設区分ごとに特徴的な劣化 傾向があることが分かった。

4.3.2 マルコフ連鎖を用いた劣化予測モデルの作成 4.3.1 で整理した供用年数別劣化度の割合を各劣化度 の割合の経年的な変化とみなし、マルコフ連鎖を適用し

Table 4-6 広域基盤整備計画調査の既往データ A number of soundness data of wide area master plan survey

			-	-
施設区分	工種区分	デ	ータ数	
	機場	464		
	水門	65		
	水路 (開水路)	1,797		
土木	水路(パイプライン)	1,558	4,712	
	水路(トンネル)	229		
	ダム	167		
	頭首工	432		
	機場	1,753		8 082
松石	水路	493	2 508	0,982
17支 17天	ダム	70	2,398	
	頭首工	282		
	機場	441		
雷与	水路	165	725	
电刈	ダム	47	135	
	頭首工	82		
建屋	全工種	937	937	



Fig.4-4 供用年数別劣化度の割合① A rate of deterioration stage according to a service period (1)



Fig.4-5 供用年数別劣化度の割合② A rate of deterioration stage according to a service period (2)

た劣化予測モデルを作成した。ここで、マルコフ連鎖は、 ある時点 m での状態が i のとき、次の時点 m+1 に状態 j に推移する確率は、時点 m-1 以前にどの状態にあった かには無関係であるという仮定に基づいている。マルコ フ連鎖 X_m の推移確率を

$$p_{ij} = P \{ X_{m+1} = j \mid X_m = i \}, \quad 1 \le i, \quad j \le M$$
(4-2)

とおくと, 確率の基本性質から

~

$$0 \leq p_{ij} \leq 1, \sum_{j=1}^{M} p_{ij} = 1$$
 (4-3)

となる。これを行列にすると式(4-4)で表される(森 村・高橋, 1979)。

$$\boldsymbol{P} = \begin{pmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1M} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{M1} & p_{M2} & \cdots & p_{MM} \end{pmatrix}$$
(4-4)

本研究では、広域基盤整備計画調査の機能診断結果を もとに、劣化度ランクごとの推移をモデル化するので、 劣化度ランクは $C \rightarrow B$, $B \rightarrow A$ の過程で推移する。こ こで、 $C \rightarrow B$ の推移確率を p_1 , $B \rightarrow A$ の推移確率を p_2 とすると、次の段階に推移せずに C, Bに留まる確率は それぞれ 1- p_1 , 1- p_2 と表される。マルコフ連鎖による劣 化の概念を Fig. 4-6 に示す。また、以上の条件を式(4-4) に当てはめると A, B, Cの3段階評価から式(4-5) に 示す 3 行 3 列のマトリクスとなる。

$$\boldsymbol{P} = \left(\begin{array}{cccc} 1 - p_1 & 0 & 0 \\ p_1 & 1 - p_2 & 0 \\ 0 & p_2 & 1 \end{array} \right)$$
(4-5)

ここで, 推移確率を1年ごとの確率とし, 初期状態を q(0) とした場合, m 年後の状態 q(m) は式(4-6) で表さ れる。

 $q(m) = P^m q(0) \tag{4-6}$

初期状態では全ての施設が健全な状態にあるので,式 (4-5)に式(4-6)を当てはめると各劣化度の割合は式(4-7) で表される。



 Table 4-6
 広域基盤整備計画調査の既往データ

 A number of soundness data of wide area master plan survey

$$q(m) = \begin{pmatrix} P(X_m = \mathbf{C}) \\ P(X_m = \mathbf{B}) \\ P(X_m = \mathbf{A}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - p_1 & 0 & 0 \\ p_1 & 1 - p_2 & 0 \\ 0 & p_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$
(4-7)

以上の条件に基づき,劣化予測モデルを作成した。モ デルの作成に当たっては,Table 4-7 に示す劣化度推移 表を作成した。推移確率の決定は,表計算ソフトを用い ることにより,推移確率を入力すると各劣化度の占める 割合が自動的にTable 4-7 の形式で算出されるようにし た。なお,各劣化度の占める割合の実データについては Fig. 4-4 および Fig. 4-5 の供用年数別劣化度の割合を用 いるが,Fig. 4-4 および Fig. 4-5 では供用年数を 10 年間 ずつに区切っているため,各劣化度割合は各 10 年間の 中間年におけるものとした。

推移確率の決定に当たっては、各劣化度の占める割合 が実データの数値に近づくように、Table 4-7 の劣化度 推移表を用いて「任意の推移確率の入力 → 劣化度割合 の計算値と実データの照合」の作業を繰り返し、計算値 が実データの劣化度割合に近い値になる推移確率を選定 した。推移確率選定の具体例として、開水路(土木)に おける劣化度の推移確率候補を Table 4-8 に示す。

推移確率の選定に当たっては、最小二乗法を用いて推 移確率の組み合わせごとに劣化度割合の計算値と実デー タの相関を表す決定係数を算定し、決定係数が最も高く なる推移確率を選定した。劣化度割合の実データと計算 値の決定係数算定例を Table 4-9 に示す。このとき、デ ータ数の少ない供用年数の影響による相関のばらつきを 低減するため、供用年数ごとのデータ数の大小による重 み付けを行った上で、決定係数を算定した。具体的には Table 4-9 の①、②、③に示すように、分散や共分散の 算定において、各供用年数それぞれのデータ数を各デー タの偏差の二乗などに乗じた値を用いて計算を行った。

Table 4-7 劣化度推移表の例 Example of transition probability

	Drump	ne or transition	produoi	inty	
経過年数		0	1	2	3
各劣化度の	С	100	99	98.01	97.0299
占める割合	В	0	1	1.97	2.9107
(%)	А	0	0	0.02	0.0594
	推移確率	$(C \rightarrow B : 1\%)$	$B \rightarrow A$:	2%)	

 Table 4-8
 開水路(土木)の劣化度推移確率候補

 Temporary transition probability for a prediction of deterioration progress of open canal

推移確率 C→B (%)	推移確率 B→A (%)
2.2	3.2
2.3	3.3
2.4	3.4
2.5	3.5
2.6	3.6

Table 4-9	開水路	(土木)	における決定係数算定例
Example to calculate determinati	on coeffic	eient for a	a prediction of deterioration progress of open canal

推移確率	$(C \rightarrow B;$	2.2%, B→A	; 3.2%)					
体化库	データ	供用年数	供用年数	実データx _i	計算值Vi	$(x_i - x_{\Psi = \psi})^2$	$(y_i - y_{\pm i})^2$	$(x_i - x_{\text{FB}})(y_i - y_{\text{FB}})$
务化皮	数 N	(10年間隔)	(中間年)	(%)	(%)	×N ①	×N ②	$\times N$ (3)
А	218	0-9	5	0.9	0.7	229071.9	232624.2	230841.2
А	364	10-19	15	1.6	5.9	365432.7	274763.1	316871.3
А	455	20-29	25	6.6	14.1	325335.0	168762.9	234317.0
А	550	30-39	35	25.5	23.6	34141.1	52283.3	42249.4
А	195	40-49	45	37.9	33.3	4153.9	0.1	-17.4
А	14	50-59	55	28.6	42.6	317.5	1211.0	-620.0
А	0	60-69	65	0.0	51.2	0.0	0.0	0.0
А	1	70-79	75	0.0	58.9	1111.1	651.4	-850.8
В	218	0-9	5	2.3	9.9	210035.2	120116.3	158835.3
В	364	10-19	15	12.6	22.5	155909.1	42611.0	81507.4
В	455	20-29	25	25.9	28.6	24910.6	10261.0	15987.7
В	550	30-39	35	38.4	30.5	13917.4	4377.2	-7805.1
В	195	40-49	45	28.7	29.9	4153.8	2248.8	3056.3
В	14	50-59	55	50.0	27.9	3888.9	406.1	-1256.8
В	0	60-69	65	0.0	25.2	0.0	0.0	0.0
В	1	70-79	75	0.0	22.3	1111.1	122.0	368.1
С	218	0-9	5	96.8	89.5	877804.2	687082.0	776610.2
С	364	10-19	15	85.7	71.6	998731.4	533808.5	730158.5
С	455	20-29	25	67.5	57.3	530296.5	262272.4	372937.2
С	550	30-39	35	36.2	45.9	4462.7	86930.2	19696.4
С	195	40-49	45	33.3	36.7	0.0	2275.8	0.0
С	14	50-59	55	21.4	29.4	1984.1	214.4	652.2
С	0	60-69	65	0.0	23.6	0.0	0.0	0.0
С	1	70-79	75	100.0	18.9	4444.4	209.6	-965.2
				$x_{_{\overline{Y}}$ 均	y _{平均}	計①	計2	計③
				33.3333	33.333	3791212.75	2483231.349	2984088.187
					決	定係数 $R^2 = 3$	$(1)^{2}/(1)\times(2)$ =	0.945862415

決定係数 $R^2 = 3^2 / (1 \times 2) =$

また, Table 4-8 の推移確率の組み合わせ 5 × 5=25 通 りについて決定係数を算定した結果を Table 4-10 に示 す。**Table 4-10**より,決定係数の最大値は R² = 0.9496 であり、このときの推移確率は、劣化度C→Bが 2.4%,劣化度 B→A が 3.4% となった。

以上の手順に基づき, Fig. 4-4 および Fig. 4-5 の供用 年数別劣化度の割合について劣化予測モデルを作成し た。モデルの作成に当たっては、対象期間を実データの ある供用年数までとし、 推移確率は基本的に最終年まで 一定とした。

ただし, 電気設備については, 土木施設と比較して耐 用年数が短いため,本体の土木施設の供用途中で更新さ れることが多い。このため、劣化予測モデルの適用期間 については, Fig. 4-5 に示す全ての電気設備の供用年数 別劣化度の割合をもとに、20年~30年とした。

マルコフ連鎖を適用して作成した劣化予測モデルを Fig. 4-7 および Fig. 4-8 に示す。なお, 実データとの比 較のため, Fig. 4-4 および Fig. 4-5 の供用年数別劣化度 分布を重ね合わせて表示している。

Fig. 4-7 および Fig. 4-8 に示すように,劣化予測モデ ルを作成することで、より明確に工種区分別、施設区分 別の劣化傾向が確認できるようになった。例えば、土木

Table 4-10 推移確率の決定係数算定例 Example to calculate determination coefficient of a transition probability

推移確率	推移確率	
$C \rightarrow B$	$B \rightarrow A$	決定係数R ²
(%)	(%)	
2.2	3.2	0.9459
2.2	3.3	0.9462
2.2	3.4	0.9461
2.2	3.5	0.9456
2.2	3.6	0.9448
2.3	3.2	0.9488
2.3	3.3	0.9493
2.3	3.4	0.9493
2.3	3.5	0.9488
2.3	3.6	0.9480
2.4	3.2	0.9489
2.4	3.3	0.9495
2.4	3.4	0.9496
2.4	3.5	0.9492
2.4	3.6	0.9484
2.5	3.2	0.9460
2.5	3.3	0.9468
2.5	3.4	0.9470
2.5	3.5	0.9466
2.5	3.6	0.9457
2.6	3.2	0.9404
2.6	3.3	0.9409
2.6	3.4	0.9412
2.6	3.5	0.9409
2.6	3.6	0.9400



Fig.4-7 劣化予測モデル① A deterioration prediction model (1)









Fig.4-8 劣化予測モデル② A deterioration prediction model (2) 施設については、劣化度 C → B の推移確率から、開水 路 (2.4%) >パイプライン (2.3%) >水路トンネル (2.0%) >機場 (1.7%) >頭首工 (1.6%) >水門 (1.5%) >ダ ム (1.2%) の順で劣化が進行しやすい傾向にあるとい える。開水路とダムでは推移確率に 2 倍の差があり、推 移確率を劣化速度と見なすと、開水路はダムの 2 倍の速 さで劣化が進行していることが分かる。

機械設備については、劣化度 $C \rightarrow B$ の推移確率から、 ダム(4.6%)>機場(3.7%)>水路(3.6%)>頭首工 (3.4%)という結果になったが、工種による推移確率の 差はあまりないことが分かった。また、土木施設の劣化 度 $C \rightarrow B$ の推移確率(1.2%~2.4%)と比較して明らか に劣化速度が速いことが分かる。

電気設備については、土木施設と同じ供用期間でモデ ルを作成すると実データとの相関が低くなる。このため、 土木施設の供用途中で更新されると仮定し、劣化予測モ デルの適用期間を 20 年~30 年とした。この結果、適合 性の高いモデルとなった。電気設備の推移確率は、ダム を除けば劣化度 C → B が 3.5% ~ 3.7% とほとんど差が ない。しかし、劣化度 B → A の推移確率については水 路が 38.0%、頭首工が 35.5% となっており、他の工種と 比較しても極端に大きいことが分かる。これは、劣化が 確認された後に短期間で更新される設備が多いことを示 している。

建屋については,推移確率が劣化度 $C \rightarrow B$: 2.0%, 劣化度 $B \rightarrow A$: 4.2% となっており,土木施設と類似し た劣化傾向を示していることが分かる。

4.3.3 マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線モデルとの 比較

4.3.2 で作成したマルコフ連鎖モデルと機能保全の手 引きに示されている単一劣化曲線モデルの比較を行っ た。機能保全の手引きでは鉄筋コンクリート開水路のモ デルしか示されていないため、今回比較する対象は「開 水路(土木)」のモデルになる。機能保全の手引きに示 されている単一劣化曲線による劣化予測モデルを Fig. 4-9 に示す。また、単一劣化曲線モデルは式(4-8)で表 される。

健全度
$$(S) = -0.00216t^2 + 5$$
 (4-8)

ここに, t:供用年数である。

なお, Fig. 4-9 において, 健全度 S-2 はマルコフ連鎖 モデルの劣化度 A に, 健全度 S-3 は劣化度 B に, 健全 度 S-4 は劣化度 C にそれぞれ対応している。

式(4-8)を用いて健全度がS-5→S-4,S-4→S-3, S-3→S-2,S-2→S-1と推移するまでに要する年数を計 算すると,Fig. 4-10に示すようにそれぞれ21年,9年, 7年,6年となる。Fig. 4-10より,単一劣化曲線モデル においては,健全度が低下するほど次の健全度へ推移す るまでの時間が短くなる傾向にあることが分かる。 次に、開水路(土木)におけるマルコフ連鎖モデル による劣化度 C の割合の推移を Fig. 4-11 に示す。Fig. 4-11 より、劣化度 C の割合が、供用開始から 20 年 で 100% → 62% (38% 減少)、供用後 20 年から 40 年 で 62% → 38% (24% 減少)、供用後 40 年から 60 年で 38% → 23% (15% 減少)と推移しており、劣化度 C の 減少割合が徐々に小さくなる傾向にあることが分かる。



Fig.4-9 単一劣化曲線モデル Single curve type prediction model of deterioration



Fig.4-10 単一劣化曲線モデルにおける健全度推移時間の変化 A change of soundness using single curve type prediction model of deterioration



Fig.4-11 開水路 (土木) における劣化度 C の割合の推移 A rate change of deterioration grade "C" for an open canal

このように同じデータを用いてもモデルによって劣 化傾向が異なるように見えるのは、劣化速度を判断する 視点の相違によるものと考える。単一劣化曲線モデルの 場合. ある健全度が次の健全度へ推移するまでに要する 時間の変化を劣化速度と見なせるため、健全度が低下す るほど次の健全度へ推移する時間が短くなり、劣化の進 行が速いことになる。一方、マルコフ連鎖モデルの場 合, 健全な状態である劣化度 C の占める割合の経年変 化を劣化速度と見なすと、供用年数が経つほど劣化度 C の減少割合が徐々に小さくなり、劣化の進行が遅いこと になる。しかし、マルコフ連鎖モデルにおいて、ある劣 化度から次の劣化度へ推移する割合である推移確率を劣 化速度と見なすと, Fig. 4-11 において, 劣化度 C→B の推移確率 2.4% に対し、劣化度 B→Aの推移確率は 3.4% であり、劣化度 C が劣化度 B になる速度よりも、 劣化度 B が劣化度 A になる速度の方が大きいことを示 している。これは、単一劣化曲線モデルにおいて、劣化 が進むほど劣化の進行が速くなる傾向にあることと合致 している。

さらに、開水路(土木)以外の施設について劣化傾向 を見てみると、Fig. 4-7 および Fig. 4-8 より、他の工種 の土木施設については、開水路と同様に劣化度 C → B の推移確率よりも劣化度 B → A の推移確率が大きくな っており、劣化が進むほど劣化の進行が速くなる傾向が あることが分かる。一方、機械設備や電気設備について は、土木施設と同様に加速的に劣化が進行するものもあ れば、頭首工(機械) やダム(電気)のように、劣化度 C → B の推移確率よりも劣化度 B → A の推移確率が小 さいものがあり、全ての施設について劣化が進むほど劣 化の進行が速くなる傾向があるとはいえない。

以上のように、マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線モ デルを比較した場合、それぞれのモデルが異なった劣化 傾向を示すように見えても、マルコフ連鎖モデルにおけ る推移確率を劣化速度とみなすと、両モデルは劣化が進 むほど劣化の進行が速くなるという同じ傾向を示してい ることが分かった。

4.4 農業水利施設の劣化予測手法の確立に向けた課題

本章では,農業水利施設以外の他分野の構造物にお ける劣化予測手法の現状を分析し,定性的な判断基準に 基づき全国的な規模で診断を行った広域基盤整備計画 調査の機能診断結果を用いて,マルコフ連鎖を適用した 劣化予測モデルを作成した。しかし,今回作成した劣化 予測モデルについては,以下のような課題が残されている。

- ①劣化傾向を供用年数ごとの劣化度分布で代替したものであり、実際の経年的な劣化傾向とは異なる可能性がある。
- ②施設の立地環境などが考慮されておらず,諸々の 条件が平均化されたモデルとなっている。
- ③特定の部位の劣化予測は困難である。

これらの課題を解決するためには、施設別や部材別の 経年的な機能診断データを蓄積し、劣化予測モデルの精 度向上を図る必要がある。例えば、杉山(2008)は、機 能診断データの蓄積に向けた取り組みとして、国営造成 施設を対象とした機能診断が2007年度より開始されて おり、5年間で全ての国営造成施設の診断を行うととも に、その後も定期的に継続して診断を行うとしている。 また、都道府県営造成施設や団体営造成施設を対象とし て、機能診断から対策工事までを一貫して実施する事業 制度も創設されている(野々村ら、2009)。今後はこれ らの取り組みにより、施設別、部材別の経年的な機能診 断データが全国的な規模で蓄積されていけば、より精度 の高い劣化予測モデルの構築が可能となる。

さらに、今回検討したマルコフ連鎖モデルのような確率 論的劣化予測モデルだけでなく、中性化や塩害の予測モ デルのように、個別の劣化機構に対応した劣化予測手法の 確立も重要な課題である。例えば、農業用コンクリート開 水路の主要な劣化機構である摩耗については、実際に供 用中の構造物から採取した供試体の摩耗試験結果から 摩耗試験機の促進倍率を明らかにすることにより、当該構 造物に対する摩耗の進行予測を行う研究がなされており (上野ら、2010)、その他の劣化機構についても適切な劣 化予測手法の確立に向けた研究を進めていく必要がある。

4.5 結論

本章では,農業水利施設以外の他分野の構造物にお ける劣化予測手法の現状を分析し,マルコフ連鎖を用い た農業水利施設の劣化予測モデルを作成した。さらに, 作成した劣化予測モデルを用いて,ダムや開水路といっ た工種区分別,土木施設や機械設備といった施設区分別 に劣化傾向の分析を行うとともに,機能保全の手引きに 示されている単一劣化曲線による劣化予測モデルとの 比較を行った。その結果,以下の結論が得られた。

- (1)他分野における劣化予測手法の動向として,道路橋, 道路舗装および港湾施設における劣化予測手法の 現状を分析したところ,施設の劣化状況を数段階 のランクに分類することによって離散的に表現し, あるランクから次のランクへ経年的に移行する状 況の予測にマルコフ連鎖を適用している事例が多 いことが分かった。
- (2)全国的な規模で農業水利施設の機能診断を行った広 域基盤整備計画調査の機能診断結果にマルコフ連 鎖モデルを適用し、工種区分や施設区分ごとに劣 化予測モデルを作成することができた。また、作 成した劣化予測モデルにより、工種区分や施設区 分ごとの劣化傾向を分析したところ、以下のこと が明らかとなった。
 - ①土木施設については、劣化度 C→Bの推移確率 から、開水路>パイプライン>水路トンネル>機 場>頭首工>水門>ダムの順で劣化が進行しやす

い傾向にある。

- ②機械設備については、劣化度 C→Bの推移確率から、ダム>機場>水路>頭首工という順で劣化が進行しやすい傾向にあるが、工種による劣化速度(推移確率)の差は小さい。また、土木施設と比較して劣化速度が速い。
- ③電気設備については、ダムを除けば劣化度 C→Bの推移確率が3.5%~3.7%とほとんど差がない。 劣化度 B→Aの推移確率については、水路が38.0%、頭首工が35.5%であり、他の工種と比較して極端に大きく、劣化が確認された後に短期間で更新される設備が多いことが示唆される。
- ④建屋については、土木施設と類似した劣化傾向を 示す。
- (3) マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線モデルの劣化傾向の差異について、共通の機能診断データをもとに作成したモデル同士で比較すると、両モデルとも劣化が進むほど劣化の進行が速くなるという同じ劣化傾向を示す。
- (4) 今回作成したマルコフ連鎖による劣化予測モデルについては、以下のような課題がある。
 - ①劣化傾向を供用年数ごとの劣化度分布で代替したものであり、実際の経年的な劣化傾向とは異なる可能性がある。
 - ②施設の立地環境などが考慮されておらず,諸々の条件が平均化されたモデルとなっている。
 ③特定の部位の劣化予測は困難である。

このため,施設別・部材別の経年的な機能診断デ ータの蓄積や個別の劣化機構に対応した劣化予測 手法の確立が必要である。

▼ 農業用小規模コンクリート開水路の簡易 補修工法の開発

5.1 緒論

第Ⅱ章で述べたように、農業用コンクリート開水路 には、コンクリート躯体のひび割れ、摩耗によるコンク リート表面の骨材露出、コンクリート躯体の断面欠損、 目地材の劣化・脱落など様々な変状が発生し、それらの 変状により水路の水理性能や構造性能が低下している 事例が見られる。このため、近年、低下した水路の性能 を回復することを目的とした様々な補修工法の開発が 進められている。中には、ビルなどの建築物や道路施設 など他分野での適用を目的として開発された工法をそ のまま農業用コンクリート開水路に適用している事例 も見られる。しかし、農業用コンクリート開水路の場合、 温度変化や乾湿の繰返し、流水下での使用、紫外線の影 響など、他分野と比べても過酷な供用環境となるため、 他分野で使用される補修工法が農業用コンクリート開 水路の要求性能を必ずしも満足するとは限らない。例え ば、農業用コンクリート開水路の補修工法には、通水性 能を確保するための平滑性を有していること、既存コン クリートと同等以上の耐摩耗性を有すること、止水性を 有することなどの性能が求められる。さらに、農業用コ ンクリート開水路の補修は、一般に非かんがい期となる 秋から冬にかけた時期に実施されることから、低温環境 下での施工性や材料の強度発現性が求められる。また、 当然のことながら、農作物に有害な物質が溶出しないこ とも重要な要求性能である。このように、農業用コンク リート開水路の補修工法には、他分野のコンクリート構 造物と比べて多種多様な性能が要求される。

一方,農業用コンクリート開水路には,国営事業で造成された大規模なものから,末端の圃場内小水路のように小規模なものまで,その役割に応じて大小様々な水路が存在する。国営造成施設のように大規模な水路では,各種機械を使った効率的な補修工法が適用できるが,圃場内小水路については,施工断面も小さく,大規模な水路と同じ工法を適用できないことが多い。ここで,設計基準水路工では,小規模な用排水路には鉄筋コンクリートベンチフリュームが多く用いられ,その適用範囲は最大幅1,000mm(=1m)としていることから,本章では,水路幅が1m以下の水路を「小規模水路」と定義する。

また、第1章で述べたように、農地・農業用水などの資 源や農村環境を保全するための施策である「農地・水・環 境保全向上対策」が全国で展開されており、農家や地域 住民による共同活動の一環として、圃場内小水路をはじ めとする小規模水路の補修が行われている。このため、農 業用コンクリート開水路の補修工法については、施設規 模や施工者の技量レベルに応じた補修工法が必要である。

本章では、まず農業用コンクリート開水路の補修に適 用されている工法の現状について分析する。次に、小規 模コンクリート開水路を対象とした簡易補修工法の開発 について述べる。一般に、従来の補修工法は専門業者に よる大規模な水路の補修を対象としており、農家や地域 住民の直営施工による小規模水路の補修を目的とした補 修工法はほとんど見当たらない。そこで、補修に関する 専門知識を持たない農家や地域住民でも施工可能な、施 工が簡易で低コストの補修工法を新たに開発する。そし て、開発した工法について性能評価や現地水路における 施工性の検証を行い、今後の課題について考察する。

5.2 農業用コンクリート開水路における補修工法の現状 分析

第Ⅱ章で述べたように,農業用コンクリート開水路の 主要な変状は,コンクリート躯体のひび割れ,摩耗によ るコンクリート表面の骨材露出,コンクリート躯体の断 面欠損,目地材の劣化・脱落などであり,これらの変状 を対象とする補修工法には,ひび割れ補修工法,断面修 復工法,表面被覆工法,目地補修工法がある。以下に, これらの補修工法の概要と特徴について述べる。

5.2.1 ひび割れ補修工法

ひび割れ補修工法は、ひび割れからの劣化因子の侵 入防止,水密性および耐久性の向上,躯体の一体化を目 的とする工法であり, 主として, 注入工法, 充填工法, ひび割れ被覆工法がある。以下に注入工法,充填工法, ひび割れ被覆工法の概要と特徴を示す。

(1) 注入工法

注入工法は、ひび割れに樹脂系あるいはセメント系の 材料を注入してひび割れ内部を閉塞し、劣化因子の侵入 防止、水密性および耐久性を向上させる工法である。従 来は、グリースポンプによる手動注入方式だったが、現 在は、ゴムの復元力などを利用した専用の注入器具を用 いて、注入圧力 0.4MPa 以下の低圧かつ低速で注入する 方式が主体となっている。この低圧低速方式は、①注入 精度が作業員の熟練度に左右されない、②注入量の管理 が容易である、③ひび割れ深部のひび割れ幅が 0.05mm と狭い場合でも確実に注入できる、などの特徴を有して いる(日本コンクリート工学協会, 2007)。Fig. 5-1 に低 圧低速注入工法による補修例を示す。



Fig.5-1 注入工法によるひび割れ補修の例 Example of grouting into cracks

注入工法で使用される材料は、エポキシ樹脂やアクリ ル樹脂などの樹脂系、セメント系、ポリマーセメント系 などがある。樹脂系注入材の中でも一般的によく用いら れるエポキシ樹脂は、①コンクリートとの接着性に優れ ている、②躯体の一体化を図ることができる、③種類が 豊富で目的に応じた粘性や伸び率を有する注入材を選定 できる,などの特徴がある。ただし,施工箇所が湿潤状 態にある場合、接着不良を起こすことがあるので、注意 が必要である。一方、セメント系およびポリマーセメン ト系の注入材は、①樹脂系注入材に比べ安価である、② 熱膨張率がコンクリートに近い、③鉄筋防錆効果がある、 ④湿潤箇所に適用できる、などの特徴がある(日本コン クリート工学協会,2007)。

(2) 充填工法

充填工法は、ひび割れ幅が 0.5mm 以上のひび割れの 補修に適する工法で、ひび割れに沿ってコンクリートを U字形またはV字形にカットし、その部分に補修材を 充填する方法である。一般に、鉄筋腐食を生じていない 場合の補修に用いられる。動きのあるひび割れに対して は、シリコーン樹脂やポリウレタン樹脂などのシーリン グ材や可撓性エポキシ樹脂など,追従性の大きな補修材 料が用いられる。一方,動きのないひび割れに対しては, ポリマーセメントモルタルが用いられることが多い。

(3) ひび割れ被覆工法

一般にひび割れ被覆工法は,幅0.2mm以下の微細な ひび割れ上に塗膜を形成させ、防水性および耐久性を向 上させる工法である。ひび割れの開閉幅が大きい場合や 進行性がある場合には、ひび割れ追従性の大きな補修材 料を用いる必要がある。補修材料には、従来、塗膜弾性 防水材やポリマーセメントモルタルなどが用いられてい たが,近年,コンクリート構造物の曲げ耐力や剪断耐力, 靱性などを向上させる目的で開発された炭素繊維シート やアラミド繊維シートなどの連続繊維シートも用いられ るようになっている(日経 BP 社, 2002)。

5.2.2 断面修復工法

断面修復工法は、劣化や損傷によって欠損した断面 の修復や、塩化物イオンなどの劣化因子を含むかぶりコ ンクリート部分を除去した後の断面を修復するために 用いられる工法である。特に農業用コンクリート開水路 では、躯体が摩耗してできた凹凸を平滑に修復するため に断面修復工法が用いられ,既存コンクリートを保護す るための表面被覆工法を兼ねることが多い。また、農業 用コンクリート開水路に適用する断面修復工法には,① 仕上がり面が平滑性を有していること, ②既存コンクリ ートと同等以上の耐摩耗性を有すること, ③止水性を有 すること、などの性能が要求される。一般に断面修復工 法には, 左官工法, 吹付け工法, 充填工法がある。以下に, 左官工法, 吹付け工法, 充填工法の概要と特徴を示す。

(1) 左官工法

左官工法は、左官職人が左官コテを使って断面修復 材を断面欠損部に充填する工法であり、一般に、小規 模な断面(10m²以下)の修復に適用される(土木学会、 2005b)。仕上がりは職人の技量によるところが大きくな るが、5mm 程度の厚さでも施工できるため、摩耗した コンクリート開水路表面の修復に適した工法といえる。 (2) 吹付け工法

吹付け工法は、中~大規模な断面(10~100m²)の 補修に適用され、事前に混練した断面修復材を専用の吹 付け機により断面欠損部に吹付けて所要の断面を回復さ せる工法である(土木学会, 2005b)。農業用コンクリー ト開水路に適用する場合は、平滑性を確保するため、 吹 付け後に左官コテで仕上げる必要がある。

(3) 充填工法

充填工法は、大規模な断面(100 m²以上)の修復に適 用され、補修断面に合わせた形状に型枠を組み、流動性 のある断面修復材をポンプ圧送やヘッド圧により型枠内 に充填する工法である(土木学会,2005b)。この工法は, 型枠の設置により細部の充填状況の確認が困難であるた め,充填不足が生じないよう入念な施工管理が必要である。 また,断面修復材の自重や充填圧により型枠が損傷しな いよう,支保工などの仮設が別途必要になることがある。

以上の断面修復工法に用いる断面修復材には,①圧 縮,曲げおよび引張強度などが既存コンクリートと同等 以上であること,②熱膨張係数,弾性係数およびボアソ ン比などが既存コンクリートと同等であること,③乾燥 収縮が小さく,躯体コンクリートとの接着性が高いこと, などの性能が要求される(日本コンクリート工学協会, 2007)。特に農業用コンクリート開水路に使用する断面 修復材については,①摩耗した水路表面の修復に必要な 数 mm から,凍害などによる断面欠損の修復に必要な 数 mm から,凍害などによる断面欠損の修復に必要な 10 数 cm 程度までの打設厚さに適応できること,②通水 性能が低下しないよう新設時のコンクリートと同等以上 の平滑性(粗度係数)を有していること,③既存コンク リートと同等以上の耐摩耗性を有すること,などの性能 も必要である。

一般に使用される断面修復材は、セメントモルタル、 ポリマーセメントモルタルおよびポリマーモルタルに大別 される。セメントモルタルは一般のコンクリートと同様 にセメント、混和剤、骨材などから構成され、既存コン クリートと同程度の強度,弾性係数,熱膨張係数を有し ている。ポリマーセメントモルタルは、セメントモルタ ルにセメント混和用ポリマーを加えたもので、曲げおよ び引張強度や既存コンクリートとの付着力が大きく、寸 法安定性に起因するひび割れ抵抗性や劣化因子の侵入に 対する抵抗性に優れている。ポリマーモルタルは、液状 樹脂(ポリマー),骨材および充填材から構成され,一般 的な液状樹脂の種類により、ポリエステル系、エポキシ系、 アクリル系、ビニルエステル系に分類される。セメント モルタルやポリマーセメントモルタルと比較して、 圧縮 強度、接着性、耐摩耗性などが優れているが、硬化収縮 率や硬化の温度依存性が大きい(土木学会. 2005b)。

また、上記の断面修復材の他に、既存コンクリートと 断面修復材の接着性を向上させるため、プライマー(下 地処理材)が用いられることが多い。プライマーには、 有機系プライマーとポリマーセメント系プライマーがあ り、断面修復材を施工する前に既存コンクリートに塗布 する。ポリマーセメントモルタルによる水路躯体の断面 修復工法の標準断面図を Fig. 5-2 に、左官工法による断 面修復の施工状況を Fig.5-3 に示す。

5.2.3 表面被覆工法

表面被覆工法は、コンクリート構造物の表面を表面被 覆材で覆うことにより、二酸化炭素や塩化物イオンなど の劣化因子の侵入を遮断して劣化進行を抑制し、構造物 の耐久性を向上させる工法である。農業用コンクリート



Fig.5-2 ポリマーセメントモルタルによる断面修復工法の標準 断面図

Typical cross section of patching using polymer cement mortar



Fig.5-3 左官工法による水路表面の断面修復 Patching of irrigation canal surface by plastering method

開水路に適用する表面被覆工法には、①仕上がり面が平 滑性を有していること、②既存コンクリートと同等以上 の耐摩耗性を有すること、③止水性を有すること、など の性能が要求される。表面被覆工法は、施工方法により、 塗装工法、シート工法、パネル取付け工法、埋設型枠工 法に分類される。以下にこれらの工法の概要を示す。

(1) 塗装工法

塗装工法は,主として有機系被覆材によりコンクリー ト表面を被覆する工法であり,一般に,①コンクリート 表面のレイタンス,汚れなどを高圧洗浄などにより除去 した後,②下地処理材であるプライマーの塗布,③パテ による不陸調整,④主材(中塗り材)塗布,⑤上塗り材(仕 上げ材)塗布,などの複数の工程で構成される。施工は, 刷毛塗り,ローラー刷毛塗り,吹付けなどにより行う。

被覆材の結合材に有機系樹脂を使用する塗装工法は, 無機系被覆工法に比べて被覆が緻密で劣化因子遮断性が 高く,被覆材の結合材に使用する樹脂の選定により,ひ び割れ追従性を付与できる。また,セメント材料を結合 材に使用する無機系被覆工法よりも乾燥,硬化速度が速 く,施工後,比較的早期に性能を発現できるため,早期 に通水を再開することが可能である。一方,有機系被覆 材は耐候性に劣るため,上塗り材には耐候性に優れた塗 料を用いる必要がある(土木学会, 2005b)。 塗装工法に用いる被覆材は,変状の原因・程度や表面 被覆材料の要求性能などにより異なる。一般に,主材に はエポキシ樹脂やビニルエステル樹脂が,上塗り材には アクリル樹脂やポリウレタン樹脂が用いられる。

(2) シート工法

シート工法は,連続繊維などにより成型されたシー トをコンクリート構造物の表面に接着剤を用いて張付 けることによりコンクリート表面を保護する工法であ る。シート工法は、一般にコンクリート片の剥落防止を 目的として使用されるが、農業用コンクリート開水路の 補修では、劣化因子の侵入防止や漏水防止を目的に使用 されることが多い。

シート工法は、塗布接着型シート工法と張付け接着型 シート工法に分類される。塗布接着型シート工法は、コ ンクリート表面の下地処理や素地調整を行った後、塗布 接着剤で繊維シートをコンクリート表面に張付け、さら にシートを覆うように接着剤を塗布することによってシ ートと接着剤を一体化させ FRP 化する方法である。ま た、一体化した塗布接着型シート張付け層を保護するた め、保護層と上塗り材を塗布する。張付け接着型シート 工法は、コンクリート表面の下地処理や素地調整を行っ た後、繊維シートと耐候性を有するシートをあらかじめ ラミネート加工したものをコンクリート表面に接着剤で 張付ける方法であり、塗布接着型シート工法と比べて工 程が少なく、施工が容易である(土木学会、2005b)。

シート工法に使用する繊維シートには、ガラス繊維シ ート、ビニロン繊維シート、アラミド繊維シート、炭素 繊維シートなどがあり、使用目的に応じて使い分けられ る。特にアラミド繊維シートや炭素繊維シートは引張強 度が大きく、ひび割れ拘束効果や耐荷性能向上効果が期 待できるため、補強工法の補強材として用いられること がある(日本コンクリート工学協会、2007)。

(3) パネル取付け工法

パネル取付け工法は、コンクリート表面をパネル状の 被覆材により被覆する工法である。一般に、①コンクリ ート表面の下地処理、②胴縁またはガイドレール取付け、 ③パネルの固定、④ジョイント部のシーリング処理、⑤ パネルと既存コンクリートとの間に注入材を充填、⑥養 生、という工程で実施する。パネル材には、ビニルエス テル樹脂 FRP 複層板、不飽和ポリエステル樹脂 FRP 板、 高密度ポリエチレン樹脂成型板などがあり、充填材には 樹脂系やセメント系の注入充填材などが使用される(コ ンクリート補修・補強マニュアル編集委員会、2003)。

パネル取付け工法は、主に下水道分野で用いられて いるが、近年、農業用コンクリート開水路においてもレ ジンコンクリートパネルを用いた工法が開発され、現地 に適用されつつある(長束ら、2002b)。レジンコンクリ ートパネルは、施工後の通水断面の縮小を極力抑えるた め、板厚を10mmと薄くしている。さらに、水理実験 により確認したレジンコンクリートパネルの粗度係数は 0.010 であり、現場打ちコンクリートの標準的な粗度係数 0.015 と比べて平滑性に優れ、施工後の通水能力が大きく向上する(森ら,2007)。また、レジンコンクリートパネルを貼付けたコンクリート部材の場合、部材の曲げ強度を 30% 以上補強する効果があるとされており(農業農村整備情報総合センター、2008)、レジンコンクリートパネル工法は水路の補強工法としても用いることができる。レジンコンクリートパネル工法の標準断面図をFig. 5-4 に、レジンコンクリートパネル工法の施工状況を Fig. 5-5 に示す。



Fig.5-4 レジンコンクリートパネル工法の標準断面図 Typical cross section of resin concrete panel lining method



Fig.5-5 レジンコンクリートパネル工法の施工状況 Irrigation canal repairing by resin concrete panel lining method

(4) 埋設型枠工法

埋設型枠工法は、コンクリート表面に型枠を設置し て、流動化コンクリートや無収縮モルタルを型枠内に充 填する工法で、型枠がそのまま被覆材として機能する工 法である。主に下水道や港湾施設などで用いられている。 一般に、①コンクリート表面の下地処理、②アンカーピ ンなどによる埋設型枠設置、③流動化コンクリートまた は無収縮モルタルなどの裏込め材を充填、④養生、とい う工程で実施する。埋設型枠に使用する材料には、ビニ ルエステル樹脂系レジンコンクリート板やビニルエステ ル樹脂 FRP 板などがある(コンクリート補修・補強マ ニュアル編集委員会、2003)。

5.2.4 目地補修工法

目地補修工法は, 目地材の充填や被覆材による目地

の被覆などにより,目地からの漏水や背面土の吸出しを防 止する工法である。農業用コンクリート開水路で主に用い られる目地補修工法には、シーリング材などの不定形の目 地材を目地に充填する工法(以下「目地充填工法」と記す), ゴム製品などの定形の目地材を目地に挿入する工法(以 下「目地挿入工法」と記す),シート状の目地材で目地 上を被覆する工法(以下「目地被覆工法」と記す)があ る。いずれの目地補修工法においても、補修材には、止 水性の他、水路躯体温度の変化による目地伸縮への追従 性が要求される。以下にこれらの工法の概要を示す。

(1) 目地充填工法

シーリング材などによる充填工法は、目地材が脱落し た目地や劣化した目地材を除去した目地に、シーリング 材やセメントモルタルなどを充填することにより止水性 を回復する工法である。目地補修材には、水路躯体温度 の変化による目地伸縮への追従性が要求されるため、硬 化後の伸縮性に優れたシーリング材が用いられることが 多い。シーリング材は、建築分野での使用を目的として 開発されたものが多く、主成分の種類によりシリコーン 系、変成シリコーン系、ポリサルファイド系、ポリウレタン 系などの種類がある。シーリング材は種類によって異な った特性を示すため、農業用コンクリート開水路での使 用に当たっては、躯体コンクリートとの付着性、耐水性、 耐候性を有している材料か否かを確認する必要がある。

(2) 目地挿入工法

ゴム製品などの目地材を目地にはめ込む工法には,既 存の目地幅のままで目地材をはめ込む工法と,コンクリ ートカッターなどで目地幅を広げて目地材をはめ込む工 法がある。いずれもゴムの弾性を利用して止水性や目地 伸縮への追従性を確保している。

既存の目地幅のままで目地材をはめ込む工法には,水 分を含むと膨張する機能のある止水材(以下「水膨張材」 と記す)を使用するものがある。水膨張材を用いた目地 補修工法の概要を **Fig. 5-6** に,施工状況を **Fig.5-7** に示す。

目地幅を広げて目地材をはめ込む目地補修工法の事 例として応力機能目地工法がある。応力機能目地工法は, 水路のコンクリート躯体を箱抜き状にはつり取り,目地 材側面に接着剤を塗布した目地材を圧縮状態ではつった 目地部に挿入する工法である(石神ら,2006)。目地材 には30年の耐久性があることが実証されているエチレ ン・プロピレンゴム(EPDM)を使用しており,ゴム弾 性の活用による躯体伸縮への追従性,高止水性,高耐 久性が確保されているとともに,水路側表面に引張応力 が発生しない断面形状を有しており,大気中のオゾンに よる劣化を受けにくくなっている(長束ら,2007)。応 力機能目地工法の標準断面図を Fig. 5-8 に,施工状況を Fig. 5-9 に示す。

(3) 目地被覆工法

目地被覆工法は,被覆材で目地を覆い,目地からの漏 水を防止する工法である。目地被覆工法に使用する被覆



Fig.5-6 水膨張材による目地補修工法の概要(関東農政局, 2008) Joint repairing method by water swelling materials



Fig.5-7 水膨張材による目地補修工法の施工状況 (関東農政局, 2008) Joint repairing method by water swelling materials



Fig.5-8 応力機能目地工法の標準断面図 Typical cross section of joint repair method for concrete canal by rubber elasticity



Fig.5-9 応力機能目地工法の施工状況 Construction situation of repairing joint method for concrete canal by rubber elasticity

材には、目地の動きに追従できる伸縮性があり、通水を 阻害しないよう厚さの薄い材料が用いられる。被覆材の 例として、ゴム系シートや連続繊維シートなどが挙げら れる。一般にゴム系シートの施工は、施工箇所の下地処 理を行い、押え板とアンカーピンを使用して躯体コンク リートに固定する方法で行う(例えば、加藤ら、2008)。 連続繊維シートの施工は、施工箇所の下地処理を行い、 接着剤を使用してシートを直接躯体コンクリートに張付 ける方法で行う。また、塗装工法やシート工法による表 面被覆工を施工するときに、目地で縁切りをせずに躯体 と目地を一体的に被覆し、目地被覆工法を兼ねる場合も ある。

5.3 小規模コンクリート開水路の簡易補修工法の開発

農業用コンクリート開水路のうち、国営造成施設のように大規模な水路については、5.2 で述べたような補修 工法を用いて、国をはじめとする行政機関の公共事業により補修が行われている。しかし、農家が日常利用する圃 場内小水路は、変状が発生したときに農家自らが応急的 に変状箇所の補修を行っている状況にある。また、5.1 で述べたように、農家や地域住民の共同活動により圃場 内小水路をはじめとする小規模水路の補修が行われてい る。圃場内小水路は、ほとんどがコンクリート製であり、 適切な補修を行うためには、変状内容に応じた工法・材 料の選択が必要である。しかし、中には適切な補修が行 われず、補修後短期間で再劣化する事例も見られる。

そこで,農家や地域住民,あるいは土地改良区職員の 直営施工による補修の原因となっている変状や既存の補 修工法について分析し,小規模コンクリート開水路の補 修における課題を明らかにする。さらに,既存の補修工 法における課題を解決するために,新たな簡易補修工法 を開発し,開発した工法の性能確認試験を行うとともに, 現地水路へ適用することにより簡易施工性や耐久性につ いて検証する。

5.3.1 小規模コンクリート開水路における直営施工の 対象となる変状

農業用水路を対象に実施した簡易補修などに関する 実態調査結果(全国土地改良事業団体連合会,2010)に よると、農家や土地改良区職員などの直営施工により補 修を行った開水路(204ヵ所)に見られた変状のうち, 最も多いものは目地損傷(62%)であり、次いでひび割 れ(15%),沈下(9%)、すり減り(骨材露出)(5%)の 順であった(Fig. 5-10)。調査した開水路の構造の内訳は, 現場打ちコンクリート製が34%、コンクリート二次製品 が60%、その他が6%であった。また、これらの開水路 の75%は水路幅が1m未満の小規模水路であった。

このように, 直営施工による補修の対象となる変状と しては目地損傷が最も多いことが分かる。第Ⅱ章で述べ たように, 目地損傷には, ほとんどの場合漏水を伴い,







Fig.5-11 目地補修に用いられる工法 Joint repairing method



Fig.5-12 セメントモルタル系補修材による補修箇所の変状 Defective events on repair materials (cement mortar)

漏水は灌漑用水の減少のみならず,①水路周辺の地盤を 浸食し,水路自体が不安定な状態になる,②隣接する道 路や宅地などへの浸水被害を生じさせる,③農地への漏 水により湿田化し、農業機械の作業性に支障を来したり、 転換畑に湿害を発生させたりする、などの様々な問題を 引き起こす。このため、農家や土地改良区にとっては最 優先で補修しなければならない変状となっていることが 考えられる(森ら, 2009)。

5.3.2 直営施工による目地補修の現状と課題

直営施工による目地補修で用いられる工法は, Fig. 5-11 に示すように,セメント(モルタル)系材料による補修が47%と最も多く,次いで樹脂系が31%であり,この2つの工法で全体の8割近くを占めている(全国土地改良事業団体連合会,2010)。セメントモルタル系補修材がよく用いられる理由としては,水を加えてかき混ぜるだけですぐに使用できる材料が,ホームセンターなどで容易に入手できることが挙げられる。しかし一方で,セメントモルタル系補修材により補修した箇所においては,Fig.5-12 に示すように,目地上の補修箇所にひび割れを生じているもの,補修材が剥離しているもの,あるいは両者を併発しているものなど,補修後何らかの変状が生じている場合が多い。

セメントモルタル系補修材料にひび割れが生じる理 由としては,水路躯体の温度変化による伸縮挙動が挙げ られる。水路躯体は,外気温の変化により伸縮を繰り返 し,その伸縮量は躯体を構成する材料の熱膨張係数に依 存する。農業用コンクリート開水路では,一定の間隔で 目地を設け,この伸縮を目地で吸収している。目地の伸 縮量は,式(5-1)により算出される。

$$\Delta W = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \tag{5-1}$$

ここに、 Δ W:目地部の伸縮量(m), a:コンクリートの熱膨脹係数(10×10⁶/C), Δ T:コンクリート開水路の躯体温度変化量(C),L:目地間隔(m)である。

躯体の年間温度変化量を 50℃, 目地間隔を 2m と仮 定して式(5-1)に当てはめると,目地の伸縮量は1mm となる。よって、目地補修に用いる材料にはこの伸縮量 に追従することが要求される。目地幅を仮に10mmと した場合, 1mmの伸縮は1mm/10mm=100,000 × 10⁻⁶の ひずみに相当する。一般にコンクリートの伸び限界ひず みは100~200×10⁻⁶とされており(日本コンクリート 工学協会、1986)、セメントモルタルの伸び限界ひずみ も同程度であると考えられる。このため、セメントモル タルで補修しても目地の伸縮挙動に追従できず、すぐに ひび割れることが推察される。ただし、実際の水路では 地盤などによる拘束を受けるため、目地の伸縮量は、式 (5-1) により算定される理論値よりも小さくなることに 留意する必要がある。実際、上野ら(2008)は、現場打 ちコンクリート開水路の目地幅の変動量を実測し、年変 動幅の理論値に対する実測値の割合が 0.54 や 0.60 とな った事例を報告している。そして、実測値が理論値より

も小さくなった理由として,躯体と地盤との摩擦の影響 などを挙げている。

一方、樹脂系の補修材としてよく用いられるものにシ ーリング材がある。シーリング材は、硬化後にゴムのよ うな弾性を示す性質があり、例えばシリコーン樹脂系シ ーリング材では100~400%の伸び能力を有する(日本 シーリング材工業会、2002)。このため、セメントモル タル系補修材に比べ、目地の伸縮への追従性に優れるも のが多く、同じ供用期間内であれば、セメントモルタル 系補修材よりもひび割れや剥離の発生する頻度は低くな る。しかし、市販されているシーリング材は、主に建築 分野での使用を想定して開発されており、農業用水路の ように乾湿を繰り返したり、直射日光に曝されたりとい った過酷な環境条件下での使用を想定していないものが 多い。実際、シーリング材の中には紫外線により劣化し やすいものもあり、Fig. 5-13に示すような剥離やひび割 れが生じることがある。

さらに、補修作業の簡易性についての課題がある。シ ーリング材を確実に充填するための最小目地幅は 10mm とされており(日本シーリング材工業会,2002),目地 幅が 10mm 未満の場合,Fig. 5-14 に示すようにディスク グラインダーによる U カット処理を行い、隙間を拡げ てからシーリング材を充填する必要がある。ここで、デ ィスクグラインダーは、円形の砥石を高速で回転させる ことによりコンクリートなどの硬い材料を切削するため の電動工具である。Fig. 5-15 に一般的なディスクグライ ンダーの例を示す。



Fig.5-13 シーリング材による補修箇所の変状 Defective events on sealant materials

Fig. 5-14 に示す方法では、ディスクグラインダーに 加え、別途電源設備も必要になる。また、ディスクグラ インダーの使用に当たっては、作業上の安全を図るため の技能講習が義務づけられており、Uカット処理は誰に でも手軽にできる作業とはいえない。よって、目地幅が 10mmより狭い場合の補修は、簡易補修としての範疇を 超えるものと判断される。なお、Fig. 5-14 中のバックア ップ材は、シーリング材の充填深さを調整するために設 置するものである。



Fig.5-15 ディスクグラインダー Disk grinder

5.3.3 目地の簡易補修工法の開発

5.3.2 で述べたように,現在,農家などにより行われ ている目地の補修においては,補修材料の耐久性や施工 の簡易性に課題があることが分かった。そこで,既存の 目地補修工法における課題の解決を図るため,補修工事 の経験のない農家や地域住民でも施工が可能な目地補修 工法の開発を行った。以下に,開発に当たっての目標の 設定,工法の内容,工法の性能評価,現地水路での簡易 施工性および耐久性の検証結果について述べる。

5.3.3.1 開発目標の設定

新たな目地補修工法の開発に当たっては、5.3.2 で述 べた既存の工法の現状と課題を踏まえ、①幅や深さが 1m以下の小規模コンクリート開水路の目地部を対象と する、②漏水を止める、または抑制する、③目地の伸縮 に追従できる、④紫外線による劣化を生じない耐候性を 有する、⑤電動工具などを使用した水路躯体のはつりや 研磨作業を伴わず、農家などによる直営施工が可能であ る、⑥普及可能な経済性と耐久性を有する、ことを目標 に設定した。なお、⑥の経済性と耐久性については、低 コストでかつ耐久性の高い補修材料が理想的であるが、 現状では低コストと高耐久性を両立させることは困難 である。そこで、簡易補修は応急的な対策として行われる 場合が多いことを踏まえ、耐用年数を3~5年に設定した。

5.3.3.2 目地の簡易補修工法の内容

5.3.3.1 の開発目標を踏まえ、被覆テープ(以下「接着型

テープ」と記す)と接着剤を組み合わせた目地被覆タイ プの簡易補修工法(以下「接着型テープ工法」と記す) を新たに開発した。Fig. 5-16 に接着型テープ工法の概要 を示す。接着型テープには、不織布、ビニロン製3軸連 続繊維シート,フッ素樹脂系フィルム,表面保護フィル ムの4つの構成材料を積層したものを選定した。接着型 テープの構成材料のうち,不織布は,接着剤を含浸させ ることにより接着効果を高め、テープと接着剤を一体化 させる機能を、ビニロン製3軸連続繊維シートは、通水 時の水圧や目地の伸縮時に発生する引張応力に抵抗する 機能を、フッ素樹脂系フィルムは、通水側表面に露出す る接着剤の紫外線劣化を防止する機能を有する。また, 表面保護フィルムは,施工時にテープ表面が汚れた場合, 接着剤の硬化後に保護フィルムを剥がすことにより完成 後の美観を確保するためのものである。接着型テープは, 幅 100mm × 厚さ 0.25 ~ 0.5mm で, 使用前は Fig. 5-17 に示すようなロール状となっている。

次に,接着型テープとコンクリート開水路との接着方 法について検討した。従来の目地被覆工法や,表面被覆 工法の一種である張付け接着型シート工法では、シート とコンクリート構造物の接着にエポキシ樹脂接着剤が用 いられることが多い(土木学会,2005b)。エポキシ樹脂 接着剤は一般にエポキシ樹脂と硬化剤の2液からなり、 一定の比率で混合してから使用しなければならないた め、作業手間を要する。また、エポキシ樹脂接着剤は強 い接着力を示す反面、弾性率が高く剛直で可撓性に欠け る(日本接着学会,2007)。このため、エポキシ樹脂接



Fig.5-16 接着型テープ工法の概要 Repair method with a structural bonding tape



Fig.5-17 開発した接着型テープ Developed structural bonding tape

着剤を接着型テープ工法に用いる場合,適用できるのは 目地の伸縮幅が小さな水路に限られる。これに対してシ ーリング材は,硬化後も大きな伸縮性を有しているため, エポキシ樹脂接着剤では対応できない目地の伸縮幅を有 する水路にも適用できると考えられる。

シーリング材には1成分形と2成分形があるが,練 混ぜの必要がなく,施工が簡単な1成分形のものが接着 型テープ工法に適しているといえる。1成分形のシーリ ング材の中では、シリコーン樹脂系やポリウレタン樹脂 系のものが値段も安価であり、入手しやすい。シリコー ン樹脂系は耐候性や耐疲労性に優れているが、ポリウレ タン樹脂系と比べて引裂強度が低く伸びも小さいとされ ている(日本規格協会、1979)。ポリウレタン樹脂系は, 耐候性に劣るが、耐疲労性は良好であり、コンクリート 壁への施工に適しているとされている(日本シーリング 材工業会、2002)。

以上のことから, 接着型テープと組み合わせる接着剤 として、ポリウレタン樹脂系シーリング材を選定した。 接着型テープ工法の施工手順は、①目地に沿って躯体表 面をワイヤーブラシなどで清掃する, ②シーリング材を 塗布する、③接着型テープを張付ける、④シーリング材 硬化後に保護フィルムを剥がす、という簡略化されたも のである。完成後には、施工範囲の目地上に耐候性に優 れるフッ素樹脂系フィルムに保護された FRP 層が形成 され、フィルムとシーリング材により止水性が、シーリ ング材の伸び能力により目地の伸縮挙動に対する追従性 が期待できる。Fig. 5-18 に接着型テープ工法の止水性お よび追従性メカニズムを示す。また、コンクリート表面 の摩耗による凹凸はシーリング材により充填されるた め、接着面の平滑処理の作業を省略することが可能であ る。このような特徴を有する接着型テープ工法は、目地 の補修のみならず, 5.2.1 で述べたひび割れ被覆工法と しても活用できる。

5.3.3.3 簡易補修工法の性能評価試験

(1) 止水性に関する性能評価試験

施工後の止水性に関する性能評価試験を行った。ま



Fig.5-18 接着型テープ工法の止水性および追従性メカニズム Mechanism of water-stoppage and elongation

ず,室内での漏水量測定試験として,Fig. 5-19 に示す 試験装置を用いて、単位時間当たりの漏水量により止 水性を確認した。基板にはコンクリート板(230mm× 300mm)を用い、この基板に水路目地を模擬した幅 10mm×長さ150mmの貫通孔を設け、この貫通孔を被 覆するように,幅100mm×長さ150mmの範囲に接着 型テープ工法を施工した。漏水量の測定は. φ 200mm × 1,000mm の塩化ビニル製パイプをコンクリート板の 直上に設置した後、パイプ内に水を満水状態になるよう 充填し、パイプ内の水位が 1m 降下するまでに要した時 間を計測することにより単位時間当たりの漏水量を算 出した。なお、試験時の水深 1m は、本工法の対象とす る深さ 1m 程度までの水路の最大水深を想定して設定し た。漏水が確認されない場合は、試験開始24時間後に 試験終了とした。コンクリート板は, ①平滑板, ②摩耗 板(コンクリート開水路の摩耗を模擬した凹凸面を有す る板:凹凸の最大高低差 3.7mm)の2 種類とした。

また、実際に供用されている水路においても試験施 工を行い、止水性を確認した。試験施工に使用した水路 は、茨城県つくばみらい市で供用されているコンクリー トフリューム水路(幅 50cm ×高さ 35cm ×長さ 2m/本) であり、漏水が見られる目地にポリウレタン樹脂系シー リング材による接着型テープ工法を施工した。施工から 1週間後に目地を挟んで止水板で仕切り、その中へ 10L の水を入れて水位の降下速度と目地外側の漏水状況を確 認した。現地水路での漏水量測定試験の状況を Fig. 5-20 に示す。

(2) 接着性に関する性能評価試験

接着型テープ工法には、流水、温度変化、紫外線の影響を受けても水路躯体から剥がれない接着性能が求めら れる。そこで、実際の供用環境に長期間曝露し、曝露前 と曝露後の接着強度を比較することにより工法の接着性 能を確認した。

試験は,先述の茨城県つくばみらい市で供用されてい るコンクリートフリューム水路において行った。まず, 接着型テープ工法の施工に先立ち,シリコーン樹脂系シ ーリング材とポリウレタン樹脂系シーリング材につい



Fig.5-19 漏水量測定試験 Water leak amount test



(a)目地への施工状況

(b)漏水量測定試験状況

Fig.5-20 現地水路での漏水量測定試験 Water leak amount test at canal joint

て、それぞれ単独で施工した場合の接着強度について性 能比較を行った。水面下に設置されたシーリング材には、 流水による掃流力が作用するため、シーリング材の上流 側端部からの引き剥がしに対する抵抗力を確認する必要 がある。このため、接着強度の確認は、180度引き剥が し試験 (JIS K6854-2)を参考にして行った。試験用の 供試体は、シーリング材を幅 50mm ×長さ 300mm ×厚 さ1~2mm に成形し、水路底版に塗布することにより 作製した。作製した供試体は、シリコーン樹脂系シーリ ング材4体、ポリウレタン樹脂系シーリング材4体の計 8体である。引き剥がしは人力で行い、引き剥がし時の 接着強度の測定には、デジタル式バネ秤を用いた。施工 直後(3日後)、5ヵ月後、12ヵ月後、21ヵ月後に接着 強度を確認した。引き剥がし試験の状況を Fig. 5-21 に 示す。

接着型テープ工法の接着性の確認については、水路 底版にシーリング材を幅 50mm×長さ 300mm×厚さ1 ~ 2mm に塗布し、その上からテープで被覆して行った。 この試験では、プライマー(シーリング材とコンクリー トとの接着性を向上させる下地調整剤)の有無による接 着強度の相違も合わせて確認した。作製した供試体は、 プライマーありが3体、プライマーなしが3体の計6体 である。施工直後(9日後)、6ヵ月後、15ヵ月後に180 度引き剥がし試験による接着強度の確認を行った。

(3) 目地の伸縮への追従性に関する性能評価試験

目地の伸縮に対する追従性の評価については、「表面 被覆材のひび割れ追従性試験方法(JSCE-K 532)」に準 じて行った。JSCE-K532-4 に規定されるモルタル試験 片(40mm × 120mm × 10mm)の表面をワイヤーブラ シにて処理した後、温度23℃・50%RHの恒温室内にお いてシーリング材を塗布し、その上からテープ(40mm × 60mm)を張付け、材齢7日まで養生を行った。供試 体は、ポリウレタン樹脂系シーリング材、シリコーン樹 脂系シーリング材、エポキシ樹脂接着剤について、それ



(a) 水路底版に施工したシーリング材

(b) デジタル式バネ秤による引き剥がし試験

Fig.5-21 180 度引き剥がし試験 Determination of peel strength:180° peel



Fig.5-22 目地伸縮追従性試験 Elongation performance test



(a)漏水量測定試験の状況



(b)施工 6 ヵ月後の状況

Fig.5-23 現地水路での止水性の確認状況 Water leak amount test in irrigation canal

ぞれ3体ずつ作製した。全ての供試体について材齢7日 経過後,万能試験機(インストロン・モデル5584)を 用いて載荷速度5mm/minで引張載荷し,最大荷重およ び変位量を測定した。目地伸縮追従性試験の状況をFig. 5-22に示す。

5.3.3.4 簡易補修工法の性能評価試験の結果(1)止水性に関する性能評価試験結果

漏水量測定装置による室内での漏水量測定では,平 滑板および摩耗板のいずれの基板を用いた場合において も24時間経過時までに水位降下は見られなかった。現 地水路における漏水量測定試験については,接着型テー プ工法施工前の目地からの漏水量は1.38L/minであった が,施工後の漏水量は0L/minであった(Fig.5-23 (a))。 また,施工から6ヵ月後の通水時に止水状況を確認した ところ,Fig.5-23 (b)に示すようにテープの剥がれは見 られず,目地からの漏水も確認されなかった。これらの 結果より,接着型テープ工法の止水性能は良好であるこ とを確認できた。

(2) 接着性に関する性能評価試験結果

シーリング材単独施工における 180 度引き剥がし試験 の結果を Fig. 5-24 に示す。Fig. 5-24 における接着強度は, 引き剥がし始めてからテープ全体が剥がれるまでの間に バネ秤で計測された引張力(引き剥がしに要した力)の 最大値である。ここで,接着強度の表示単位は,接着剤 の剥離強さの表示単位として一般的に用いられる供試体 の引き剥がし方向幅(ここでは 50mm)当たりの引張力 としている。

試験結果から,接着強度は、シリコーン樹脂系が13 ~ 29N/50mm,ポリウレタン樹脂系が69~115N/50mm となっている。ポリウレタン樹脂系の接着力はシリコー ン樹脂系に対して,施工直後で2.4倍、5ヵ月後で5.3 倍、12ヵ月後で4.2倍、21ヵ月後で5.5倍大きいことが 分かる。時間経過に伴う接着強度の変化については、シ リコーン樹脂系の場合,施工直後に対して、5ヵ月後が 45%、12ヵ月後が76%、21ヵ月後が72%となっている。 ポリウレタン樹脂系の場合は、施工直後に対して、5ヵ 月後が100%、12ヵ月後が133%、21ヵ月後が167%と



Fig.5-24 シーリング材単独の 180 度引き剥がし試験結果 Result of peel strength test of sealant:180° peel

なっている。しかし、今回の試験結果は、それぞれ供試体1体のみの値であり、シーリング材ごとの接着強度の ばらつきが不明であるため、時間経過と接着強度の関係 について一定の傾向があるか否かは断定できない。この ように、シーリング材単独施工の引き剥がし試験では、 シーリング材ごとの接着強度のばらつきは不明であるも のの、ポリウレタン樹脂系がシリコーン樹脂系の2.4~ 5.5 倍の接着強度を示したため、接着型テープ工法の試 験については、接着型テープの試作品完成後、ポリウレ タン樹脂系シーリング材を用いて行った。

次に,接着型テープ工法の180度引き剥がし試験の結 果をFig. 5-25 に示す。まず,接着力に対するプライマ ーの有無の影響をみてみると、プライマーありの接着強 度が189~336N/50mm、プライマーなしの接着強度が 108~197N/50mm となっている。時間経過に伴う接着 強度はばらついているが、プライマーありがプライマー なしよりも1.2~1.8 倍大きく、プライマーが接着力の 向上に寄与していることが分かる。また、ポリウレタン 樹脂系シーリング材単独施工の場合と接着型テープ工法 (プライマーなし)との接着力を比較すると、接着型テ ープ工法がシーリング材単独に対して、施工直後で2.7 倍、5(6)ヵ月後で1.6倍、12(15)ヵ月後で2.1倍の 接着強度を有していた。このことから、テープで被覆す ることによりシーリング材の接着力を向上させることが 確認された。

テープ被覆による接着力向上の理由として,以下のこ とが推察される。ポリウレタン樹脂系シーリング材は紫 外線により劣化しやすく,温度が高くなると硬化時間が 短くなり,伸び能力が低下する性質がある(日本シーリ ング材工業会,2002)。このため、テープで被覆するこ とによりシーリング材への紫外線の直射が防止され,温 度上昇も緩和される。その結果、シーリング材の劣化進 行が抑制され,高い接着力が維持されたと考えられる。 さらに、シーリング材の硬化時間の影響が考えられる。 ポリウレタン樹脂系シーリング材は空気中の水分と反応



Fig.5-25 接着型テープの 180 度引き剥がし試験結果 Result of peel strength test of structural bonding tape :180° peel

して硬化するため,表面をテープで被覆したことにより 水分の供給が減少し,硬化速度が遅くなる。このため, シーリング材の接着成分が時間をかけてより深くコンク リート内部へ浸透し,コンクリートとシーリング材の接 着力を高めたことが推察される。

(3) 目地の伸縮への追従性に関する性能評価試験結果

目地伸縮追従性試験の結果を Table 5-1 に示す。接着 型テープにおける最大荷重時の変位量の平均値は, エ ポキシ樹脂接着剤が 1.45mm, シリコーン樹脂系シーリ ング材が 6.55mm, ポリウレタン樹脂系シーリング材が 6.92mm であり,シリコーン樹脂系やポリウレタン樹脂 系シーリング材を用いた場合には,エポキシ樹脂接着剤 の4 倍以上の伸び能力を示した。

以上の試験結果より、今回試験に用いたいずれの接着 剤でも目地間隔2m以下のコンクリート開水路(目地の 伸縮量1mm以下)には適用できることが分かる。しか し、目地間隔4m以上の水路になると、目地の伸縮量は 式(5-1)より2mm以上になる可能性が高くなるため、 エポキシ樹脂接着剤は適用できないことになる。これに 対して、シーリング材を用いた場合、目地の伸縮量が

 Table 5-1
 目地伸縮追従性試験結果

 Result of elongation performance test

供試体		最大荷重 (N)	変位量 (mm)
エポキシ樹脂 接着剤+テープ	Nº1	1,012	1.51
	№2	1,104	1.50
	№3	986	1.35
	平均	1,034	1.45
シリコーン樹脂 系シーリング材 +テープ	Nº 1	361	6.72
	№2	345	6.51
	№3	386	6.42
	平均	364	6.55
ポリウレタン樹 脂系シーリング 材+テープ	Nº 1	452	6.74
	№2	451	7.22
	№3	444	6.79
	平均	449	6.92



Fig.5-26 目地補修の研修状況 Training for farmers to repair canal joint

6mm 程度の水路へも適用できる可能性がある。

5.3.3.5 簡易施工性に関する検証

簡易補修工法の施工性については、補修工事の経験の ない農家でも短時間に一連の作業が完了できる簡易性が 求められる。そこで、水路補修の現地研修会において、 開発した接着型テープ工法を実際に農家に施工してもら い、施工の簡易性を確認した。京都府内で行われた研修 会における目地補修の施工状況を Fig. 5-26 に示す。

現地研修会では,幅450mmの二次製品コンクリート フリュームを使い,7ヵ所の目地で接着型テープ工法を 施工した。清掃を除く一連の作業工程である「マスキン グテープの張付け→バックアップ材設置→必要長さのテ ープのカット→シーリング材の塗布→テープの張付け」 にかかった時間は,いずれの目地においても1ヵ所当た り30分以内であり,補修経験のない農家でも短時間で 施工が可能であることを確認できた。

5.3.3.6 現地水路における耐久性の検証

接着型テープ工法の耐久性を検証するために,現地 水路に施工した箇所の追跡調査を行ったところ, 5.3.3.3 で述べた茨城県つくばみらい市内の水路に施工した箇所 については、施工後2年を経過してもテープの剥がれや 目地からの漏水は生じていないことを確認できた。また, 土地改良区職員などを対象とした、水利施設の簡易補修 などに関する研修会で補修を行った箇所の追跡調査結果 (全国土地改良事業団体連合会,2010) によると,青森県, 京都府、宮崎県内で行われた研修会で接着型テープ工法 が施工された箇所の2年経過後,同じく長野県,福岡県, 熊本県内で施工された箇所の1年経過後のいずれにおい ても、テープの剥がれやひび割れなどの変状は生じてい ない。また、上記の宮崎県内で施工された箇所について 現地調査を行ったところ、施工後2年4ヵ月が経過し、 3シーズン目の通水期を迎えていたが、テープの剥がれ や漏水などの変状は確認されなかった(Fig.5-27)。この ように、接着型テープ工法は、施工後2年を経過しても

変状が生じない耐久性を有していることが確認された。

5.3.3.7 小規模コンクリート開水路の簡易補修工法の 課題

本研究では接着型テープと組み合わせるシーリング 材について,接着強度の相対比較からポリウレタン樹脂 系を選定したが,要求性能としてのシーリング材の接着 強度については検証していない。また,耐久性について は,施工後2年を経過しても変状が生じないことを確認 したが,目標とした3~5年の耐用年数を確保できるか 否かは検証していない。このため,接着型テープ工法に 用いるシーリング材の接着強度に関する具体的な要求性 能の設定と,現地施工箇所の追跡調査による耐久性の検 証が必要である。今後,接着強度の要求性能が設定され、 ポリウレタン樹脂系以外のシーリング材についても必要 な接着強度と3~5年の耐久性が確認されれば,接着型 テープ工法に適用可能なシーリング材の選択肢が増え, 接着型テープ工法の普及につながることが想定される。

5.4 結論

本章では、農業用コンクリート開水路の補修に主に適 用されている補修工法の概要と特徴について整理した。 次に、圃場内小水路に代表される小規模コンクリート開 水路を対象に、補修の原因となっている変状や既存の補 修工法について分析し、小規模コンクリート開水路の補 修における課題を明らかにした。さらに、既存の補修工 法における課題を解決するため、被覆テープとシーリン グ材を組み合わせた目地の簡易補修工法を開発した。そ して開発した補修工法の性能確認試験を行うとともに、 現地水路での簡易施工性や耐久性について検証した。そ の結果、以下の結論が得られた。

(1)農業用コンクリート開水路の主要な補修工法には、 ひび割れ補修工法、断面修復工法、表面被覆工法、 目地補修工法がある。特に断面修復工法は、農業 用コンクリート開水路に特徴的な変状である摩耗



Fig.5-27 目地補修から2年4ヵ月後の状況 Condition of structural bonding tape after two years and four months

による凹凸の修復と,劣化因子の侵入防止を目的 とする表面被覆工法を兼ねて行われることが多い。 また,断面修復工法や表面被覆工法には,劣化因 子の侵入防止,平滑性,耐摩耗性,止水性など,他 分野と比較して多種多様な性能が求められる。ひ び割れ補修工法や目地補修工法については,温度 変化による躯体挙動への追従性や止水性が求めら れる。さらに,農業用コンクリート開水路全体を 通じての要求性能として,低温環境下での施工性 や材料の強度発現性,農作物に有害な物質が溶出 しないことが挙げられる。

- (2)農家や土地改良区職員などの直営施工による簡易補 修の実態調査の結果から、以下のことが明らかと なった。
 - ①変状の中では目地損傷が最も多く,その他の主 な変状は,ひび割れ,沈下,すり減り(骨材露出) である。
 - ②目地補修に用いられる材料は、セメントモルタル系材料が最も多く、次いで樹脂系であり、両者で全体の8割を占める。

一方,セメントモルタル系補修材により補修し た箇所においては,ひび割れや補修材の剥離など の再劣化を生じている場合が多く,その原因とし ては,補修材が温度変化による目地の伸縮挙動に 追従できないことが推察された。また,樹脂系補 修材の一種であるシーリング材による補修箇所に おいても,ひび割れなどの再劣化が生じている場 合がある。その原因としては,耐候性に劣る種類 のシーリング材を使用したことによる紫外線劣化 が推察された。さらに,シーリング材による補修 の場合,ディスクグラインダーなどによる目地の 拡幅が必要になることもあり,施工の簡易性に課 題があることが明らかとなった。

(3) 開発した接着型テープ工法は、以下の性能を有して

いることが確認できた。

- ①室内および現地水路における漏水試験でも漏水 は確認されず、良好な止水性能を有している。
- ②接着剤として用いるシーリング材の接着力について、ポリウレタン樹脂系とシリコーン樹脂系を比較した結果、ポリウレタン樹脂系がシリコーン樹脂系よりも大きい。
- ③ポリウレタン樹脂系シーリング材を接着型テー プで被覆することにより、シーリング材単独の 場合よりも接着力が向上する。
- ④ポリウレタン樹脂系シーリング材と接着型テー プを組み合わせた場合, 6.92mmの伸び能力があ る。
- ⑤補修工事の経験がない農家でも短時間で施工で きる簡易性を有している。
- ⑥施工後2年を経過しても変状を生じない耐久性 を有している。

一方,本研究では,接着型テープと組み合わせ るシーリング材について,接着強度の相対比較から ポリウレタン樹脂系を選定したが,要求性能としての シーリング材の接着強度については検証していない。 また,耐久性の目標とした3~5年の耐用年数を確 保できるか否かについても検証していない。このた め,接着型テープ工法に用いるシーリング材の接着 強度に関する要求性能の設定と,現地施工箇所の追 跡調査による耐久性の検証が今後の課題である。

Ⅵ 結 論

現在までに国営土地改良事業などにより建設された 基幹的な農業水利施設は、ダム、頭首工、用排水機場な どが約7,100ヵ所、農業用用排水路の総延長が約4万5 千kmに達する。さらに、末端施設である圃場内小水路 まで含めた農業用用排水路の総延長は約40万kmにも のぼり,基幹から末端までの農業水利施設の総資産額は 再建設費ベースで約25兆円と試算されている。しかし, これらの農業水利施設の大部分は,建設から数十年が経 ち,老朽化の進行により更新が必要な時期を迎える施設 が増加してきている。一方,農産物価格の低迷による農 業経営の悪化や国・地方公共団体の財政上の制約から, 施設の更新整備を担う公共事業への投資が抑えられて いる。また,施設の老朽化に伴い,維持管理に要する費 用も年々増加しつつあるとともに,管理組織である土地 改良区では,合併や職員の高齢化などにより,従来のよ うな管理水準の維持が困難な状況にある。

このような背景の下,膨大な数にのぼる既存施設の有 効活用や長寿命化を図り,ライフサイクルコストを低減 するための仕組みである「ストックマネジメント」の手 法が導入され,全国で農業水利施設の機能保全対策が実 施されることになった。しかし,ストックマネジメント の実践には,農業水利施設に適した機能診断技術,劣化 予測手法,補修・補強工法など様々な技術の研究・開発 が必要である。

本研究では、農業水利施設の中でも多数を占めるコン クリート水路に焦点を当て、主に開水路および水路トン ネルを対象として、以下のことを目的に研究を行った。

- ①農業用コンクリート開水路における変状とその発 生原因の分析
- ②通水状態における農業用水路トンネルの機能診断 技術の開発
- ③農業水利施設の劣化予測手法の構築
- ④農業用小規模コンクリート開水路の簡易補修工法 の開発

具体的には, 第Ⅱ章では, 農業用コンクリート開水 路における主な変状の特徴およびその発生原因について 整理するとともに、変状の一種である損傷に着目し、過 去に発生した地震による損傷形態の分析を行った。さら に、現場打ちコンクリート開水路の目地部を模擬した供 試体による破壊試験を行い、新潟県中越沖地震における 特徴的な損傷形態であるコンクリート開水路目地部損傷 のメカニズムについて考察を行った。第Ⅲ章では、主に 農業水利コンクリート構造物の機能診断に用いられる調 査技術の現状について分析した。次に、通水状態におけ る水路トンネル内部の変状を把握可能な調査システムの 開発について述べるとともに、開発した調査システムの 性能や,既存の水中ロボットカメラのトンネル調査など への適用性について検証を行った。第Ⅳ章では、農業水 利施設以外の他分野の構造物における劣化予測手法の現 状を分析し、マルコフ連鎖を用いた農業水利施設の劣化 予測モデルを作成した。さらに、作成した劣化予測モデ ルを用いて、ダムや開水路といった工種区分別、土木施 設や機械設備といった施設区分別に劣化傾向の分析を行 うとともに、機能保全の手引きに示されている単一劣化 曲線による劣化予測モデルとの比較を行った。第V章で

は、主に農業用コンクリート開水路の補修に適用されて いる補修工法の概要と特徴について整理した。次に、圃 場内小水路に代表される小規模コンクリート開水路を対 象に、補修の原因となっている変状や既存の補修工法に ついて分析し、小規模コンクリート開水路の補修におけ る課題を明らかにした。さらに、既存の補修工法におけ る課題を解決するため、被覆テープとシーリング材を組 み合わせた目地の簡易補修工法を開発した。そして開発 した補修工法の性能確認試験を行うとともに、現地水路 での簡易施工性や耐久性について検証した。以下に、こ れらの研究結果を要約し、本研究の結論をまとめる。

6.1 農業用コンクリート開水路における変状とその発生 原因の分析(第Ⅱ章)

第Ⅱ章では、農業用コンクリート開水路における主な 変状の特徴およびその発生原因について整理した。次に 農業用コンクリート開水路に発生する変状のうち、地震 を原因とする損傷に着目し、過去に発生した地震におけ る損傷形態の分析を行った。さらに、現場打ちコンクリ ート開水路の目地部を模擬した供試体を作製して静的載 荷による破壊試験を行い、新潟県中越沖地震における特 徴的な損傷形態であるコンクリート開水路目地部の損傷 メカニズムについて考察を行った。その結果、以下の結 論が得られた。

- (1)農業用コンクリート開水路における変状には、コン クリート躯体のひび割れ、摩耗によるコンクリート 表面の骨材露出、コンクリート躯体の断面欠損、目 地材の劣化・脱落、コンクリート躯体の変位・不同 沈下などが挙げられる。特に、摩耗によるコンクリ ート表面の骨材露出は、流水によりモルタルが流出 し、残存した粗骨材が表面に露出する現象であり、 農業用コンクリート開水路に特徴的な変状である。 また、目地材の劣化や脱落も農業用コンクリート開 水路に特徴的な変状の一つであり、漏水や背面土の 吸出しを伴うことが多い。特に目地材の劣化や脱落 による漏水は、周辺地盤の浸食、道路などの浸水被 害、農地の湿田化などを引き起こすため、早急に補 修を行う必要がある。
- (2) 過去に発生した地震による農業用開水路の被害調査の結果、以下のような損傷形態が明らかとなった。 ①砂質土地盤上に設置された水路の場合、液状化による浮上りや不同沈下が多い。特にコンクリート 二次製品水路は小型で重量の軽いものが多く、液 状化の影響を受けやすいため、目地での躯体のずれが多い。
 - ②水路脇に高盛土がある場合には、盛土が水平方向 に変形しようとする影響を受けるため、フリュー ム水路側壁の変形や倒壊が発生する。
 - ③現場打ちコンクリート開水路では、埋込み式に設 置された止水板により目地部が弱部となっている

ため、コンクリートの剥落などが発生する。

- ④張ブロック水路や柵渠では、背面地盤が水平方向 に変形しようとしてブロックや柵板の崩落、はら み出しが発生する。
- (3)新潟県中越沖地震において見られた現場打ちコンク リート開水路目地部の損傷原因として、以下のよう な損傷メカニズムが明らかとなった。
 - ①地震力により水路縦断方向に目地部が圧縮されるとき、止水板も水路躯体内に押し込まれるように 圧縮されるため、止水板端部に応力が集中する。
 - ②このとき、止水板端部が水路横断方向に変形しようとして周りのコンクリートを押し広げるように 挙動する。
 - ③その結果,止水板端部付近のコンクリートに引張 強度を超える引張応力が生じてひび割れが発生す る。
- 6.2 通水状態における農業用水路トンネルの機能診断技 術の開発(第Ⅲ章)

第Ⅲ章では、まず、主に農業水利コンクリート構造物 の機能診断に用いられる簡易的な調査技術、高精度化・ 効率化を目指した調査技術、近接調査が困難な施設に対 応した調査技術の現状について分析した。次に、通水状 態における水路トンネル内部の変状を把握可能なフロー ト式画像撮影装置による調査システムを開発し、開発し た調査システムの概要と性能の検証結果について述べ た。さらに、満流状態にある水路トンネルやサイホンの 調査技術として、既存の水中ロボットカメラの適用性に ついて検証を行った。そして、開発したフロート式画像 撮影装置による調査システム、および既存の水中ロボッ トカメラを水路トンネルの機能診断へ適用するに当たっ ての課題について考察した。その結果、以下の結論が得 られた。

(1) 簡易的な調査技術の事例として, 目視調査, 打音法 による変状調査、リバウンドハンマーによるコンク リートの圧縮強度調査。ドリル法によるコンクリ ートの中性化調査が挙げられる。最近では. 正確 なひび割れ幅の測定と測定データの保存・活用が 可能な測定機器や、簡便かつ迅速にコンクリート の圧縮強度の推定および表面付近の浮き・剥離の 検知が可能な携帯型の測定機器が開発されており, 今後はこのような機器の活用により、簡便かつ正 確な機能診断調査の実施が期待できる。また、高 精度化・効率化を目指した調査技術の事例として, レーザー光による壁面画像連続撮影技術, CCD ラ インカメラによる壁面画像連続撮影技術、携帯型粗 さ測定装置によるコンクリート開水路の粗度係数 推定技術が挙げられる。これらの調査技術の活用 により、断水時間が限られる施設においても短時 間で精度の高い調査の実施が期待できる。さらに.

近接調査が困難な施設に対応した調査技術の事例 として、赤外線サーモグラフィ、3次元レーザース キャナー、トータルステーションを活用した変状 調査技術が挙げられる。赤外線サーモグラフィは、 天候条件により使用が制限されるものの、大規模 な構造物や人が容易に近づけない高所における調 査などへの活用が期待できる。3次元レーザース キャナーやトータルステーションについても、離 れた位置からひび割れ幅を詳細に計測できるなど、 高精度かつ効率的な変状調査が可能であり、ダム や頭首工など大規模施設の機能診断調査への活用 が期待できる。

(2) 通水状態おける農業用水路トンネルの変状を把握可能なフロート式画像撮影装置による調査システムを開発した。現地実証試験の結果、本装置のひび割れ検出精度はひび割れ幅2mm以上であり、遊離石灰を伴ったひび割れや漏水を伴ったひび割れなど、周囲の壁面状況との色調が異なるひび割れであれば、幅2mm未満のひび割れでも検出可能であることが分かった。また、有人目視調査前に本装置を用いた予備調査を実施することにより、有毒ガスの有無など安全性確認にも活用できることが分かった。

一方、以下のような課題が明らかとなった。

- ①自然流下方式のため装置の姿勢制御ができず,側 壁に接触した場合,装置が水平方向に回転し,部 分的に変状の見落としなどが発生する可能性があ る。
- ②水路トンネル内での変状箇所の正確な位置や変状の規模の特定が困難である。
- ③流下速度が速い場合は記録画像の分析が困難であ る。
- ④水中部の撮影は流水の透明度が高くなければ困難 である。

このため、今後、安定した画像が得られる姿勢制 御技術、流速の影響を受けない画像撮影技術などの 研究が必要である。さらに、満流状態にあるトンネ ルやサイホンの調査技術として、既存の水中ロボッ トカメラの適用性について検証したところ、透明度 の高い流水中では、壁面に接近して撮影することに より、ひび割れ幅の計測を行うことができることが 確認できた。ただし、透明度の低い流水中では画像 撮影が困難であるため、漏水音探知などの変状探知 技術の研究が必要である。

6.3 農業水利施設の劣化予測手法の構築(第№章)

第Ⅳ章では,農業水利施設以外の他分野の構造物に おける劣化予測手法の現状を分析し,マルコフ連鎖を用 いた農業水利施設の劣化予測モデルを作成した。さら に,作成した劣化予測モデルを用いて,ダムや開水路と いった工種区分別,土木施設や機械設備といった施設区 分別に劣化傾向の分析を行うとともに,機能保全の手引 きに示されている単一劣化曲線による劣化予測モデル との比較を行った。その結果,以下の結論が得られた。

- (1)他分野における劣化予測手法の動向として,道路橋, 道路舗装および港湾施設における劣化予測手法の現 状を分析したところ,施設の劣化状況を数段階のラ ンクに分類することによって離散的に表現し,ある ランクから次のランクへ経年的に移行する状況の予 測にマルコフ連鎖を適用している事例が多いことが 分かった。
- (2)全国的な規模で農業水利施設の機能診断を行った広 域基盤整備計画調査の機能診断結果にマルコフ連鎖 モデルを適用し、工種区分や施設区分ごとに劣化予 測モデルを作成することができた。また、作成した 劣化予測モデルにより、工種区分や施設区分ごとの 劣化傾向を分析したところ、以下のことが明らかと なった。
 - ①土木施設については、劣化度 C→Bの推移確率 から、開水路>パイプライン>水路トンネル>機 場>頭首工>水門>ダムの順で劣化が進行しやす い傾向にある。
 - ②機械設備については、劣化度 C→Bの推移確率 から、ダム>機場>水路>頭首工という順で劣化 が進行しやすい傾向にあるが、工種による劣化速 度(推移確率)の差は小さい。また、土木施設と 比較して劣化速度が速い。
 - ③電気設備については、ダムを除けば劣化度 C→B の推移確率が 3.5% ~ 3.7% とほとんど差がない。 劣化度 B→Aの推移確率については、水路が 38.0%、頭首工が 35.5% であり、他の工種と比較 して極端に大きく、劣化が確認された後に短期間 で更新される設備が多いことが示唆される。
 - ④建屋については、土木施設と類似した劣化傾向を 示す。
- (3) マルコフ連鎖モデルと単一劣化曲線モデルの劣化傾向の差異について、共通の機能診断データをもとに 作成したモデル同士で比較すると、両モデルとも劣 化が進むほど劣化の進行が速くなるという同じ劣化 傾向を示す。
- (4) 今回作成したマルコフ連鎖による劣化予測モデルに ついては、以下のような課題がある。
 - ①劣化傾向を供用年数ごとの劣化度分布で代替した ものであり、実際の経年的な劣化傾向とは異なる 可能性がある。
 - ②施設の立地環境などが考慮されておらず,諸々の 条件が平均化されたモデルとなっている。

③特定の部位の劣化予測は困難である。

このため,施設別・部材別の経年的な機能診断デ ータの蓄積や個別の劣化機構に対応した劣化予測手 法の確立が必要である。

6.4 農業用小規模コンクリート開水路の簡易補修工法 の開発(第V章)

第V章では、主に農業用コンクリート開水路の補修 に適用されている補修工法の概要と特徴について整理し た。次に、圃場内小水路に代表される小規模コンクリー ト開水路を対象に、補修の原因となっている変状や既存 の補修工法について分析し、小規模コンクリート開水路 の補修における課題を明らかにした。さらに、既存の補 修工法における課題を解決するため、被覆テープとシー リング材を組み合わせた目地の簡易補修工法を開発し た。そして開発した補修工法の性能確認試験を行うとと もに、現地水路での簡易施工性や耐久性について検証し た。その結果、以下の結論が得られた。

- (1)農業用コンクリート開水路の主要な補修工法には、 ひび割れ補修工法、断面修復工法、表面被覆工法、 目地補修工法がある。特に断面修復工法は、農業 用コンクリート開水路に特徴的な変状である摩耗 による凹凸の修復と、劣化因子の侵入防止を目的 とする表面被覆工法を兼ねて行われることが多い。 また、断面修復工法や表面被覆工法には、劣化因 子の侵入防止、平滑性、耐摩耗性、止水性など、他 分野と比較して多種多様な性能が求められる。ひ び割れ補修工法や目地補修工法については、温度 変化による躯体挙動への追従性や止水性が求めら れる。さらに、農業用コンクリート開水路全体を 通じての要求性能として、低温環境下での施工性 や材料の強度発現性、農作物に有害な物質が溶出 しないことが挙げられる。
- (2)農家や土地改良区職員などの直営施工による簡易補 修の実態調査結果から、以下のことが明らかとなった。
 - ①変状の中では目地損傷が最も多く、その他の主な変状は、ひび割れ、沈下、すり減り(骨材露出)である。
 - ②目地補修に用いられる材料は、セメントモルタ ル系材料が最も多く、次いで樹脂系であり、両 者で全体の8割を占める。

一方,セメントモルタル系補修材により補修 した箇所においては,ひび割れや補修材の剥離 などの再劣化を生じている場合が多く,その原 因としては,補修材が温度変化による目地の伸 縮挙動に追従できないことが推察された。また, 樹脂系補修材の一種であるシーリング材による 補修箇所においても,ひび割れなどの再劣化が 生じている場合がある。その原因としては,耐 候性に劣る種類のシーリング材を使用したこと による紫外線劣化が推察された。さらに,シー リング材による補修の場合,ディスクグライン ダーなどによる目地の拡幅が必要になることも あり、施工の簡易性に課題があることが明らか となった。

- (3) 開発した接着型テープ工法は、以下の性能を有して いることが確認できた。
 - ①室内および現地水路における漏水試験でも漏水 は確認されず、良好な止水性能を有している。
 - ②接着剤として用いるシーリング材の接着力について、ポリウレタン樹脂系とシリコーン樹脂系を比較した結果、ポリウレタン樹脂系がシリコーン樹脂系よりも大きい。
 - ③ポリウレタン樹脂系シーリング材を接着型テー プで被覆することにより、シーリング材単独の 場合よりも接着力が向上する。
 - ④ポリウレタン樹脂系シーリング材と接着型テー プを組み合わせた場合, 6.92mmの伸び能力があ る。
 - ⑤補修工事の経験がない農家でも短時間で施工で きる簡易性を有している。
 - ⑥施工後2年を経過しても変状を生じない耐久性 を有している。
 - 一方,本研究では,接着型テープと組み合わ せるシーリング材について,接着強度の相対比 較からポリウレタン樹脂系を選定したが,要求 性能としてのシーリング材の接着強度について は検証していない。また,耐久性の目標とした3 ~5年の耐用年数を確保できるか否かについて も検証していない。このため,接着型テープ工 法に用いるシーリング材の接着強度に関する要 求性能の設定と,現地施工箇所の追跡調査によ る耐久性の検証が今後の課題である。

参考文献

- 浅野 勇・向後雄二・林田洋一・井上敬資(2006):平成 16年(2004年)新潟県中越地震による農業用水路の被害, 農業工学研究所技報, 205, 47-59.
- 安保秀範・田中雅弘・吉田典明(2000):水路トンネル管 理支援システムの開発,電力土木,287,42-46.
- 大代武志・鳥居和之(2009):富山県のASR 劣化橋梁の実 態調査に基づくASR 抑制対策および維持管理手法の提案, コンクリート工学論文集,20(1),45-57.
- 土木学会(1966):昭和 39 年新潟地震震害調査報告,745-769.
- 5) 土木学会(1986):1983年日本海中部地震震害調査報告書, 760-798.
- 6) 土木学会 (2003):トンネルの変状メカニズム, 47-48.
- 7) 土木学会 (2005a):トンネルの維持管理, 67.
- 2005b):表面保護工法設計施工指針(案)[工 種別マニュアル編], 5-16, 78-85, 189-204.
- 2007):コンクリート標準示方書 [維持管理編], 16, 91-115.
- 10) 藤井 学・前川義雄 (1995):米国における橋梁の維持管 理システム,橋梁と基礎,29(6),33-37.
- 11) 林田宏・田口史雄,嶋田久俊(2006):超音波伝播速度測 定による実構造物の凍害深さ推定について、コンクリート 構造物への非破壊検査の展開論文集,2,249-254.
- 12) 林田洋一・増川 晋・有吉 充 (2008):平成19年 (2007年) 能登半島地震による水路等コンクリート構造物の被害調査,農村工学研究所技報,208,43-59.
- 13) 日野幹雄(1983):明解水理学, 丸善, 140-146.
- 14) 北海道建設部(2006):公共土木施設長寿命化検討委員会 報告書, 28-61, http://www.pref.hokkaido.lg.jp/NR/rdonlyres/7E0867F3-BEFE-4A7A-B0C5-68AF4F006CB3/0/tyouzyumyoukahoukokusyo. pdf.
- 15) 石神暁郎・森 充広・渡嘉敷 勝・増川 晋(2005):農業 用水路コンクリートに生じる摩耗現象と促進試験方法に関 する検討、コンクリート工学年次論文集,27(1),805-810.
- 16)石神暁郎・長束 勇・渡嘉敷 勝・森 充広(2006):ゴ ム弾性を活用した水路目地補修工法の止水性と耐久性,農 業土木学会論文集,245,101-107.
- 17) 石神暁郎・加藤智丈・江口和雄・中矢哲郎・森 丈久・森 充広・渡嘉敷 勝 (2009):農家・地域住民による水路 施設の機能保全の実践 – その2既存の簡易補修工法の現状 と要求性能 –, ARIC 情報, 95, 12-18.
- 18) 貝戸清之・阿部允・藤野陽三 (2003):実測データに基づ く構造物の劣化予測,土木学会論文集,744,29-38.
- 19) 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-ストックマネジメントの視点からの更新手法検討-,材料施工研究部会報,43,93-100.
- 20) 加藤智丈・岸本達也・森 充広・森 丈久・長束 勇(2008): ジオメンブレンを活用した目地補修工法の開発,ジオシン セティックス論文集,23,253-258.
- 21) 川村和幸・水島達朗・沢田俊作・二ノ宮秀彦(1991):コン クリート舗装の摩耗,開発土木研究所報告,94,53-61.

- 22) 関東農政局(2008):農業用既設水路目地補修工法の試験施工,利根川水系土地改良調査管理事務所,利根調だより,38, http://www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei/kokuei/tonecho/ dayori/38/38_5.html.
- 23) 関東農政局(2010): 広域基盤整備計画調查,利根川水系 土地改良調查管理事務所,業務内容, http://www.maff.go.jp/kanto/nouson/sekkei/kokuei/tonecho/ gyomu/02_1.html.
- 24) 小林 晃・青野智則・山本清仁・青山咸康(2004):電気探 査によるコンクリート構造物の診断手法の検討,農業土木 学会論文集,234,89-95.
- 25) 小林一輔・宇野祐一・坂井悦郎・松岡康訓・森 弥広・米 澤敏男 (2007):コンクリート構造物の総合診断法,オー ム社,25-28,64-74.
- 26) 小牟禮建一・濱田秀則・横田 弘・山路 徹 (2004): RC 桟橋上部工の塩害による劣化進行モデルの開発, コンクリ ート工学論文集, 15(1), 13-22.
- 27) コンクリート補修・補強マニュアル編集委員会(2003):コンクリート補修・補強マニュアル,産業調査会,392-407.
- 28) 久保元樹・金田重夫・境 友昭・極檀邦夫 (2006):イン パルスハンマーによるトンネルコンクリート剥離の検知, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 61(5), 1077-1078.
- 宮本文穂・串田守可・足立幸郎・松本正人(1997): Bridge Management System(BMS)の開発, 土木学会論文集, 560, 91-106.
- 30) 森 充広・渡嘉敷 勝・長束 勇・服部晋一(2002):農業水利施設機能診断のための非破壊調査現地適用事例,農業土木学会誌,70(12),55-58.
- 31) 森 充広・渡嘉敷 勝・長束 勇・石村英明 (2004):農 業用水路機能診断における非破壊調査技術の有効性,農業 土木学会論文集,230,123-130.
- 32) 森 充広・石神暁郎・渡嘉敷 勝・増川 晋(2006):農業水利コンクリート構造物に見られる変状とその要因, ARIC 情報, 82, 53-59.
- 33) 森 充広・石神暁郎・渡嘉敷 勝・増川 晋・中矢哲郎 (2007):農業水利コンクリート構造物の補修技術, ARIC 情報, 84, 48-56.
- 34) 森 充広・齋藤 豊・高岩庸博・稲垣正晴(2008):農業 用水路トンネルの機能診断への電磁波レーダ法の適用,農 業農村工学会誌,76(9),21-24.
- 35) 森 丈久 (2005):農業水利施設へのストックマネジメン ト導入に向けた取組み,農業土木学会誌, 73(11), 3-6.
- 36) 森 丈久・中矢哲郎・渡嘉敷 勝・森 充広 (2009):農 家等による小規模水路の簡易点検・診断・補修マニュアル, 農業農村工学会誌, 77(12), 21-24.
- 37) 森川英典・宮本文穂・竹内和美(1994):統計解析に基づ く既存コンクリート橋の安全性および寿命評価, 土木学会 論文集, 502, 53-62.
- 38) 森村英典・高橋幸雄(1979):マルコフ解析, 日科技連, 3-11.
- 39) 森山琢郎・依田輝彦(2000):桁間衝突が落橋におよぼす影響に関する実験的検討,土木学会論文集,654,223-232.
- 40) 中川将秀・佐野清史・谷口 修・濱田秀則(2003): 桟橋 RC上部工を対象とした劣化進行予測手法に関する研究, コンクリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報

告集, 3, 363-370.

- 41) 中川将秀・佐野清史・谷口 修・濱田秀則 (2004):劣化
 進行モデルを用いた桟橋 RC 上部工の LCC 算定例, コン
 クリート構造物の補修,補強,アップグレード論文報告集,
 4, 341-346.
- 42) 中矢哲郎・渡嘉敷 勝・森 充広・森 丈久 (2008a): 摩 耗したコンクリート水路表層形状からの粗度係数推定手 法,農業農村工学会論文集,258,23-28.
- 43) 中矢哲郎・森 充広・森 丈久・渡嘉敷 勝(2008b):携 帯型粗さ測定装置によるコンクリート水路の粗度係数推定 手法,第63回農業農村工学会中国四国支部講演会講演要 旨集,58-60.
- 44) 浪花直人・佐々木幸男・鈴木隆善・長束 勇(2006):光 硬化型 FRP シートを用いた農業用水路の更生工法(PP Sライニング工法),平成18年度農業土木学会大会講演会 講演要旨集,628-629.
- 45) 長束 勇・松岡 肇・廣戸俊夫・木村 良 (1995):アル カリ骨材反応による農業用水路の劣化と補修-香川用水地 区を事例として-,水と土,103,58-69.
- 46) 長束 勇・甲本達也・青山咸康・野中資博・服部九二雄 (2002a):農業水利コンクリート構造物の更新と維持管理, 農業土木学会誌, 70(12), 3-6.
- 47)長束 勇・直江次男・渡嘉敷 勝・森 充広・田熊 章 (2002b):水路系コンクリート構造物の内張り再生工法の 開発,平成14年度農業土木学会大会講演会講演要旨集, 398-399.
- 48) 長束 勇・石神暁郎・石村英明・渡嘉敷 勝・森 充広 (2004):コンクリート構造物の補修技術の現状と農業水利 分野に適用する際の留意点,農業工学研究所技報,202, 183-196.
- 49) 長束 勇・渡嘉敷 勝・森 充広・石神暁郎 (2007):ゴ ム弾性を活用した水路目地補修工法の開発,農業土木学会 論文集,249,31-37.
- 50) ニコン・トリンブル (2010): 事例集, http://www.nikontrimble.co.jp/gis/pdf/gx_case.pdf.
- 51) 日本下水道事業団 (2007):下水道コンクリート構造物の 腐食抑制技術及び防食技術マニュアル,下水道業務管理セ ンター,47.
- 52) 日本規格協会(1979):接着と接着剤選択のポイント, 129-130.
- 53) 日本コンクリート工学協会 (1986):マスコンクリートの ひびわれ制御指針, 61.
- 54) 日本コンクリート工学協会 (2003): コンクリートのひび 割れ調査, 補修・補強指針 2003, 4.
- 55) 日本コンクリート工学協会 (2007):コンクリート診断技術 07 [基礎編], 16-20, 45-50, 63, 107-139, 142-148, 155-177, 243-271.
- 56) 日本接着学会(2007):接着ハンドブック,日刊工業新聞社, 317-324.
- 57) 日本シーリング材工業会(2002): 建築用シーリング材-基礎と正しい使い方-改訂2版,94,147-161,188-194,217-218,229-230.
- 58) 新潟県農地部(2007):平成19年新潟県中越沖地震に伴う 被害状況について(最終版),

http://www.pref.niigata.jp/nochi/denen/nochi_tyuetuokijisin/ higaijoukyou/nochi1908160900.pdf.

- 59) 日経 BP 社 (2002):これから始めるコンクリート補修講座, 40-47.
- 60) 日経 BP社 (2006):日経コンストラクション 2006 年 10 月 27 日号, 90.
- 61) 日経 BP社(2007):日経コンストラクション2007年7月 27日号,42.
- 62) 西場 猛 (2008): 超高強度繊維補強コンクリートパネルに よる水路トンネルの補修について、水と土、152、38-42.
- 63) 野中資博(2001):コンクリート水利施設の劣化機構と老 朽化診断,農業土木学会誌, 69(5), 13-17.
- 64) 野中資博,三品文雄,字野祐一,藤澤健一 (2005):上下 水道施設のコンクリート防食実務,森北出版,126.
- 65) 野々村圭造,鈴木隆善,加藤公平,栗田 徹 (2009):実 効的なストックマネジメントの実施へ向けた諸課題,農業 農村工学会誌,77(4),3-6.
- 66) 農業農村整備情報総合センター (2008):レジンコンクリ ートパネル水路再生工法施工・積算指針(案), 12-17.
- 67) 農林水産省 (2003a):農林水産公共事業コスト構造改革に ついて, 8.

http://www.maff.go.jp/ j/ nousin/seko/cost_syukugen/pdf/ h150401.pdf.

- 68) 農林水産省(2003b):土地改良長期計画(平成 15 年 10 月 10 日閣議決定), 6. http://www.maff.go.jp/j/council/seisaku/nousin/seibi/5/pdf/ref_ data7-2.pdf.
- 69) 農林水産省(2005):食料,農業,農村基本計画(平成17 年3月25日閣議決定),46,参考付表6.
 http://www.maff.go.jp/j/keikaku/k_aratana/pdf/20050325_ honbun.pdf.
- 70) 農林水産省農村振興局(2001):土地改良事業計画設計基準・
 設計「水路工」基準書・技術書,農業土木学会,153,641.
- 71) 農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設管理室 (2007):農業水利施設の機能保全の手引き,農業土木事業 協会,59,78-82.
- 72) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2007):農業水利施設のコンクリート構造物調査・評価・ 対策工法選定マニュアル,農業土木事業協会, 3-7.
- 73) 農村工学研究所 (2008):農村工学研究所技報第 208 号(特 集号:平成 19 年 (2007 年)能登半島地震対応及び新潟県
 中越沖地震対応), 89-101.
- 74) 農村振興局整備部水利整備課施設管理室(2004):国営造
 成水利施設保全対策指導事業・国営造成水利施設保全対策
 事業 手引き(案)(平成15年度版), 2-23.
- 75) 大友貴史・大島俊之・三上修一・佐藤 誠・武田俊明(2004): 確率密度関数を用いたコンクリート構造部材の複合劣化予測 手法の検討,土木学会北海道支部論文報告集,60,262-265.
- 76) 緒方英彦・高田龍一・野中資博・服部九二雄(2008): RC 開水路の凍害,平成20年度農業農村工学会大会講演会講 演要旨集,422-423.
- 77) 緒方英彦・高田龍一・鈴木哲也・山崎大輔・佐藤周之・服 部九二雄(2009):超音波法によるコンクリート製開水路 の凍害診断に関する研究-表面走査法による凍害劣化の評

価-, 平成 21 年度農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 518-519.

- 78) 佐藤周之・服部九二雄・緒方英彦(2003):超音波法によるコンクリートのひび割れ深さ推定,平成15年度農業土 木学会大会講演会講演要旨集,622-623.
- 79) 清野昌貴・田高 淳・丸山記美雄(2006):マルコフ連鎖 モデルを用いた舗装劣化予測手法の検討,土木学会年次学 術講演会講演概要集,61(5),301-302.
- 80) 菅原博樹・時枝幸伸・岸 克人・面上秀之・秋山賢輔・中 村充宏 (2005):ドップラ速度計,日本無線技報,48,69-72.
- 81) 杉山一弘 (2008):農業水利施設のストックマネジメントのあゆみと今後の展望、農業農村工学会誌,76(3),11-14.
- 82) 鈴木哲也・池田幸史・友田祐一・大津政康(2005): 老朽 化配管施設における AE 計測の基礎的検討,農業土木学会 論文集,239,77-78.
- 83) 竹田俊明・大島俊之・佐藤 誠・三上修一(2005):橋梁 点検実測データに基づく橋梁資産劣化予測評価の検討,構 造工学論文集,51A,1157-1167.
- 84) 武山 泰・嶋田洋一・福田 正 (1990):マルコフ連鎖モデルによるアスファルト舗装の破損評価システム、土木学会論文集,420,135-141.
- 85) 渡嘉敷 勝・石神暁郎・高橋晃・森 充広・増川 晋・長 束 勇 (2005):ジメンブレンを用いた農業用水路の漏水補修 工法の性能評価,ジオシンセティック論文集, 20, 171-176.
- 86) 渡嘉敷 勝・森 充広・中矢哲郎・森 丈久 (2010):カ ルシウム溶脱したペースト硬化体の耐摩耗性,コンクリー ト工学年次論文集,32(1),719-724.
- 87) 東北農政局(1984):1983年日本海中部地震-土地改良施
 設の災害と復旧-,33-70.
- 88) 上野和広・長束 勇・野中資博・石井将幸(2008):コン クリート水路のひび割れ補修材料に必要な伸び性能,農業 農村工学会論文集,254,59-66.
- 89) 上野和広・長束 勇・石井将幸(2010):開発した水砂噴 流摩耗試験機の促進倍率,農業農村工学会論文集,266, 41-47.
- 90) 矢部正明・竹村浩志・川島一彦(1997):直橋および斜橋の桁間衝突とその影響,構造工学論文集,43A,781-791.
- 91) 全国土地改良事業団体連合会(2010):平成21年度土地改 良施設機能更新等円滑化対策事業(簡易補修等による機能 回復手法の確立)報告書, 17-41.

Studies on Technologies for Function Diagnosis and Simple Repair Methods for Concrete Canals

MORI Takehisa

Summary

Stock management is a system for appropriately maintaining the functions of the vast number of irrigation and drainage facilities in Japan. Carrying out stock management requires research on and development of technologies to diagnose the functioning of irrigation and drainage facilities, methods to forecast their deterioration, and suitable repair and reinforcement methods. Therefore these studies are aimed at the following: (1) Analysis of defects arising in concrete irrigation canals, (2) development of a technology to investigate the inside of irrigation canal tunnels as water is flowing, (3) formulation of a method to predict deterioration of irrigation and drainage facilities, and (4) development of a simple method to repair small concrete irrigation canals.

In Chapter 2, analysis of investigations of damage to irrigation canals from past earthquakes revealed the following: (1) Rising and uneven settlement due to liquefaction were common in irrigation canals on sandy ground; (2) when there were high embankments along a canal's sides, canal sidewalls deformed and collapsed; (3) in cast-in-place concrete canals, concrete cracked and fell off near joints due to the effects of water stops; and (4) with precast concrete blocks and concrete panel canals, blocks and panels collapsed, and canals as a whole were deformed.

Breaking tests with specimens simulating a canal joint revealed the following mechanism of damage to canal joints by earthquakes: (1) When joints are compressed lengthwise along a canal, water stops are compressed in a way that pushes them into the canal body; (2) when the water stops are compressed, their ends tend to deform laterally across the canal, leading to tensile strain that exceeds the concrete's critical elongation strain; and (3) as a result, cracks occur near the end of water stops.

In Chapter 3, a float-mounted imaging device was developed to discover defects inside irrigation canal tunnels as water is flowing, and which was evaluated for the performance with field tests. It was found that the device is accurate enough to detect cracks of 2 mm or greater width, and that it can also be used to detect toxic gases inside tunnels and otherwise confirm a tunnel's safety before visual inspections by people.

At the same time, problems remain to be solved: (1) the device sometimes overlooks defects when its horizontal orientation changes; (2) it is difficult to accurately determine the location and size of an defect; (3) analysis of recorded images is difficult when the water is flowing fast; and (4) underwater images are affected by water transparency.

These problems necessitate, for example, future research on attitude control technologies to enable us to obtain stable images, and imaging technologies that are not affected by water flow velocity.

Further, an existing underwater robot camera was evaluated for the performance. And it was confirmed that it was able to measure the width of cracks in canal walls in highly transparent flowing water, but that it had difficulty taking images when transparency of the flowing water was poor. It is therefore necessary to research other inspection technologies such as sonic water leakage detectors.

In Chapter 4, analysis of the current state of techniques to predict the deterioration of bridges, pavement, and port facilities revealed that many deterioration forecast models use Markov chains. And a deterioration forecast model that applies Markov chains was created by using results of function diagnosis of irrigation and drainage facilities throughout Japan. The deterioration trends of irrigation and drainage facilities were analyzed with this model, and this analysis revealed the following: (1) The ease with which deterioration proceeds in the following concrete structures is indicated in order from greatest to least: Irrigation canals, pipelines, canal tunnels, pumping stations, head works, sluice gates, and dams. (2) Although the tendency for deterioration in mechanical equipment from greatest to least is dams, pumping stations, canals, and head works, differences in deterioration rates between structures are small, and mechanical equipment deteriorates at a faster rate than concrete structures. (3) With respect to electrical equipment, except for dams there is hardly any difference in the probability of transitioning from deterioration state C (sound condition) to deterioration state B (slightly deteriorated condition), and it is therefore about the same as mechanical equipment. Again

with respect to electrical equipment, the probability of transitioning from deterioration state B to deterioration state A (seriously deteriorated condition) was far greater for canals and head works than for other structures, which indicates that much equipment is replaced soon after having been found to be deteriorated. (4) Buildings exhibit roughly the same deterioration as concrete structures.

Further, comparing the Markov chain model with a quadratic curve type deterioration forecast model found that both models showed the same deterioration trend; that is, the more deterioration proceeds, the faster it proceeds. But the Markov chain deterioration forecast model has some problems such as difficulty in forecasting for certain parts. This will necessitate accumulating year-on-year function diagnosis data categorized by facility and material, and creating deterioration forecast methods tailored to individual deterioration mechanisms.

In Chapter 5, analysis of the defects seen in small concrete irrigation canals and the existing repair methods revealed that most defects are damaged joints, and that the materials mainly used to repair joints are cement mortar and resin. It was also revealed that places repaired using cement mortar materials often deteriorate again, as when the repair material cracks or falls off. This is probably due to the inability of repair materials to keep up with the expansion and contraction behavior of the joints in response to temperature changes. And it was also revealed that cracks and other deterioration occurred again in places repaired using resin sealants. This is probably due to UV-caused deterioration. Further, existing joint repair methods require widening joints with a disk grinder, showing that procedures must be made simpler.

Next a simple joint repair method using a sealant combined with a covering tape was developed, and which was evaluated for the performance with laboratory and field tests. These tests revealed the following: (1) Leak tests found no leaking in laboratory or on-site irrigation canals, showing that the method has good sealing performance. (2) Comparing the adhesive strength of sealant alone found that polyurethane resin sealant is better than silicone resin sealant. (3) Covering the polyurethane resin sealant with the covering tape improves the adhesive strength of the sealant. (4) Polyurethane resin sealant combined with the covering tape has the ability to expand 6.92 mm. (5) The developed repair method is simple enough to allow farmers with no such repair experience to perform the operation in a short time. (6) Field tests found that the developed repair method has enough durability so that defects will not appear for two years after repair.

Future research will determine the adhesive strength required of the sealant in combination with the covering tape, and will use a follow-up study on repairs made in the field to verify whether the developed repair method has the intended number of durable years (three to five years).

Keywords: stock management, irrigation canals, damages, breaking test, Markov chains model, simple repair methods