

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

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2019-03-22 キーワード (Ja): キーワード (En): stock management, irrigation canals, damages, breaking test, Markov chains model, simple repair methods 作成者: 森, 丈久 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24514/00002232

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

森 丈久*

目 次

第 I 章 緒言	37	4.2 他分野の構造物における劣化予測手法	75
1.1 研究の背景と目的	37	4.3 農業水利施設の劣化予測モデルの作成	78
1.2 既往の研究と研究動向	39	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
1.3 本論文の構成	42	4.5 結論	86
1.4 本論文における用語の定義	43	第 V 章 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	87
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	5.1 緒論	87
2.1 緒論	44	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
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	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
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	5.4 結論	99
2.4 結論	65	第 VI 章 結論	100
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	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)	101
3.1 緒論	65	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
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	6.3 農業水利施設の劣化予測手法の構築 (第 IV 章)	102
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	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
3.4 結論	74	参考文献	104
第 IV 章 農業水利施設の劣化予測手法の構築	75	Summary	107
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 ヶ所、農業用排水

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排水路の総延長は約 40 万 km にもなっており、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査管理事務所
(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

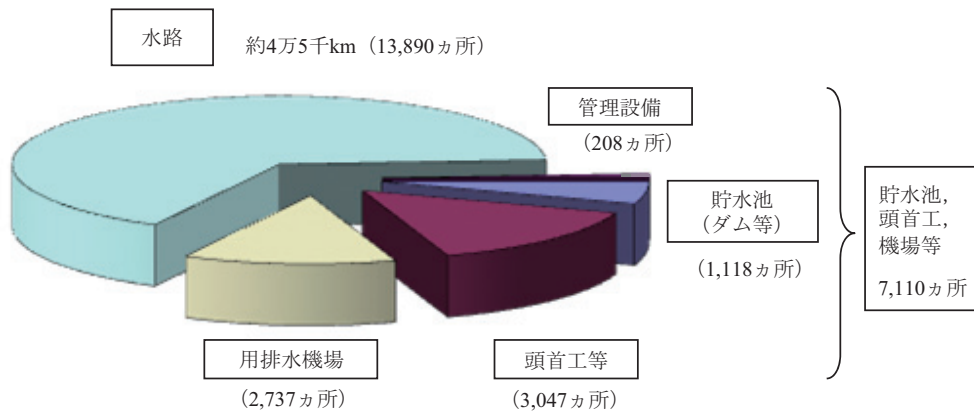


Fig.1-1 基幹的な農業水利施設の内訳 (農村振興局整備部水利整備課施設管理室, 2004)

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

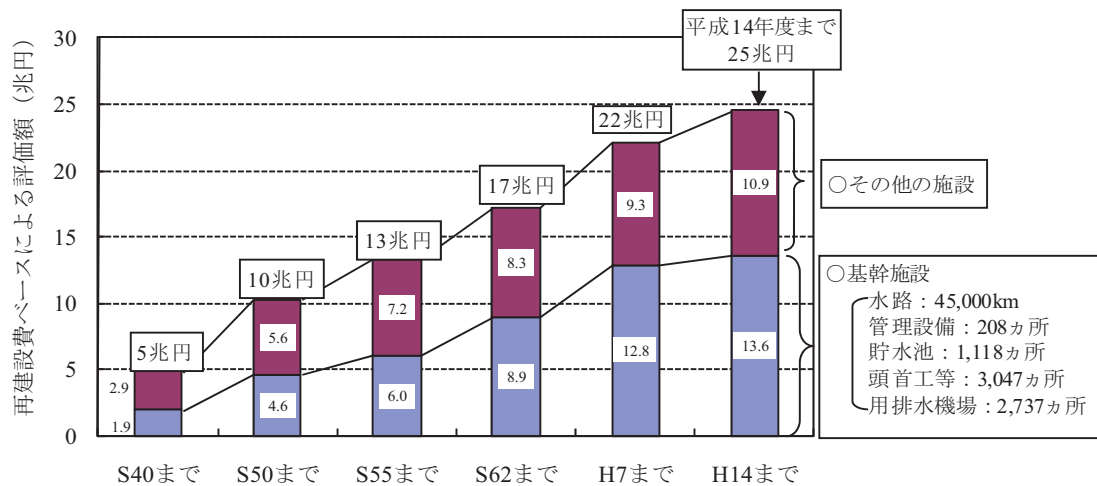


Fig.1-2 農業水利施設のストック形成状況 (農村振興局整備部水利整備課施設管理室, 2004)

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、長東ら(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東ら(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、長東ら, 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、長東ら(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、水路背面からの水压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柵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、深さごとに粉碎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^- で 1.2kg/m^3 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、スケールリング、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 \sqrt{t} 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 \sqrt{t} 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もあり、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ケースが多いため、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ると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

一般に、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)。

港湾施設である栈橋では、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タン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Ⅵ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、農家は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

II 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で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

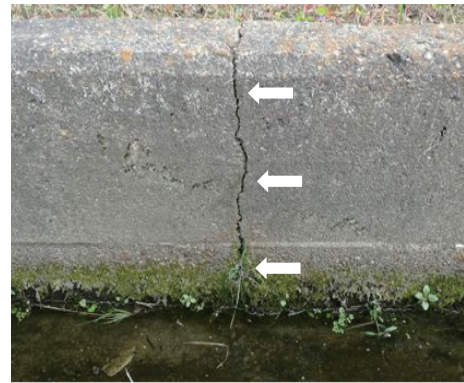


Fig.2-1 水路側壁目地間の中央部付近に発生したひび割れ
Cracks that occurred at the center of sidewall of irrigation canal



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

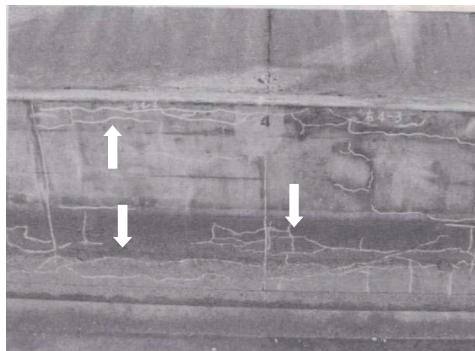


Fig.2-3 ASRにより水路側壁に発生したひび割れ
Cracks on the sidewall of irrigation canal due to ASR

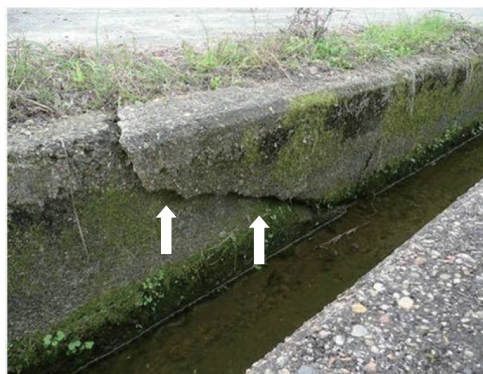


Fig.2-4 外力（車両荷重）により発生したひび割れ
Cracks according to external (vehicle) loads

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せら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 ヲ所、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

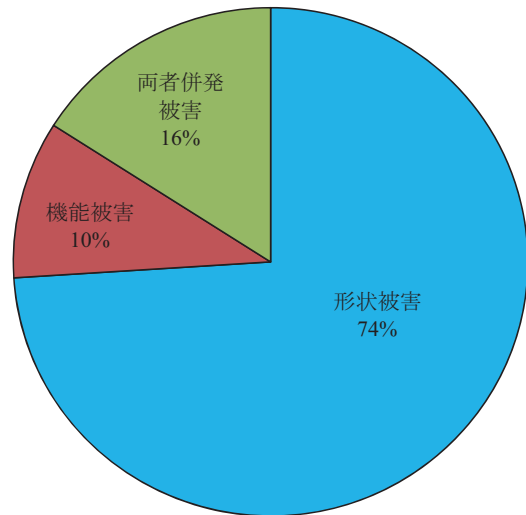


Fig.2-17 新潟地震における開水路の被害形態(土木学会(1966)より作成)

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

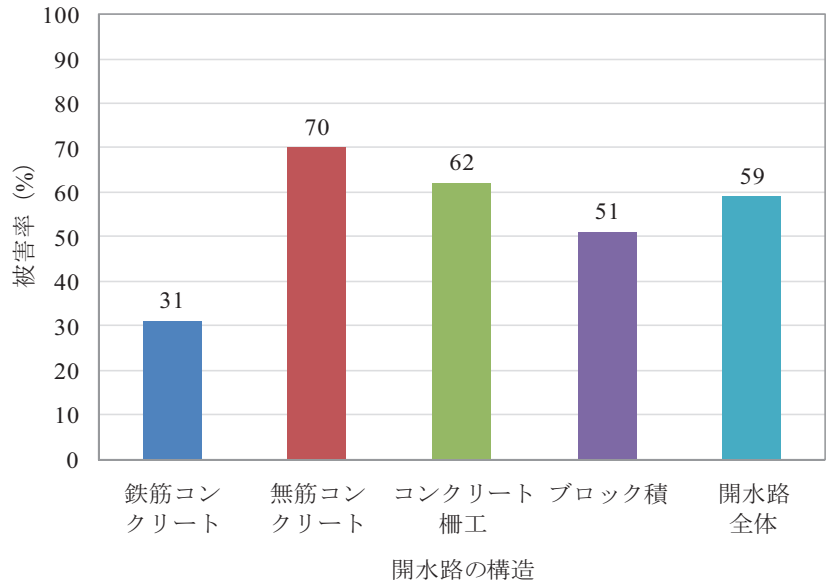


Fig.2-21 新潟地震における開水路の構造別被害率 (土木学会 (1966) より作成)
Damage rate according to the structural classification of open canal by the Niigata Earthquake in 1964

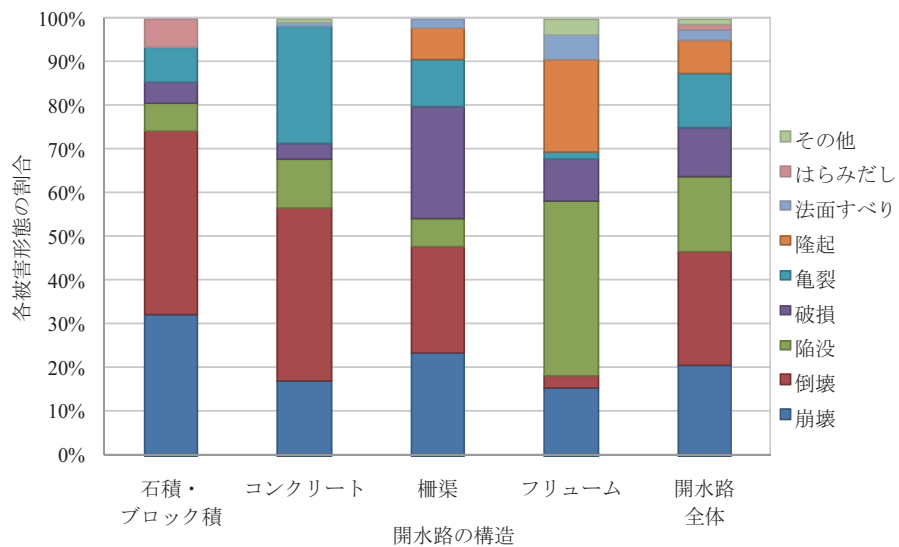


Fig.2-22 日本海中部地震における開水路の構造別被害形態 (東北農政局 (1984) より作成)
Damage rate according to the structural classification of open canal by the Middle Japan Sea Earthquake in 1983



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

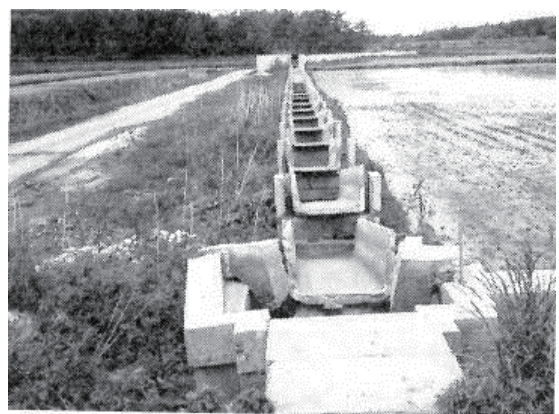


Fig.2-24 台座からの躯体の落下 (土木学会, 1986)
Falling of canal from a pedestal

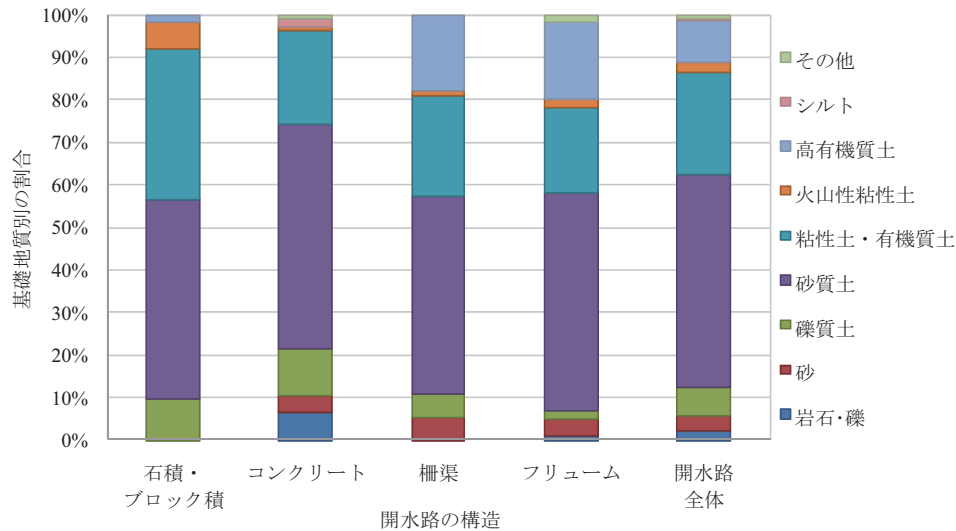


Fig.2-25 日本海中部地震における開水路の基礎地質別被害割合 (東北農政局 (1984) より作成)
Damage rate according to the geological features of open canal foundation by the Middle Japan Sea Earthquake in 1983

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 ヶ所、このうち農業用水路は 277 ヶ所に及んでいる (新潟県農地部, 2007)。

地震から約 2 ヶ月半経った 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 ヶ所、刈羽村 1 ヶ所の計 18 ヶ所で行った。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分水柵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 ヶ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.2-30 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.2-28 止水板から伸びるひび割れ
Crack extended from the end of a water stop



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



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



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) 分水柵の損傷

分水柵側壁の損傷を 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、分水柵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、フリユ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つたことから



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柵側壁の損傷
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载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カ所ずつ、表裏両面で合計 8カ所に設置した。

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 の载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载荷速度を、0.6N/mm²/s、0.1N/

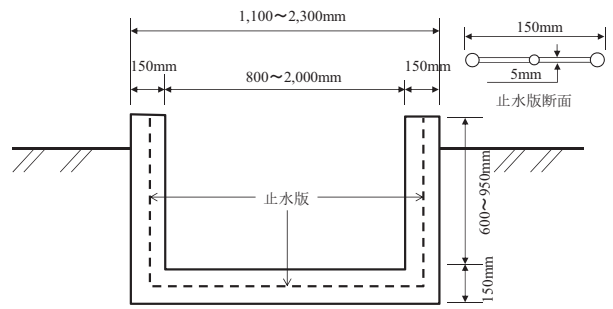


Fig.2-38 目地部が損傷したコンクリート開水路の標準的な形状
Standard cross section of the damaged concrete canal

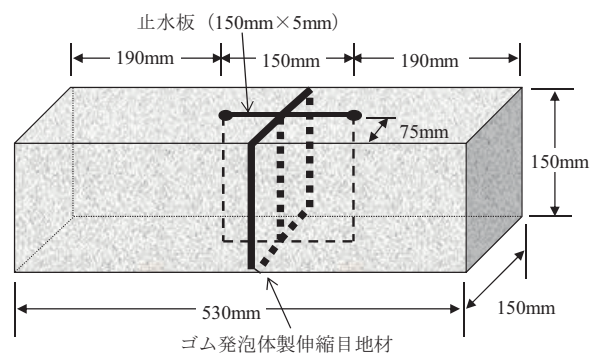


Fig.2-39 供試体 (Aタイプ) の形状および寸法
The shape and size of test specimen (Type A)

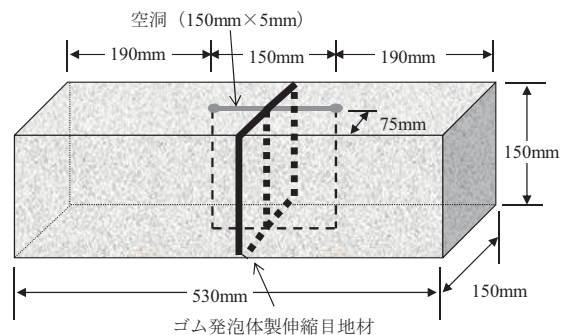


Fig.2-40 供試体 (Bタイプ) の形状および寸法
The shape and size of test specimen (Type B)

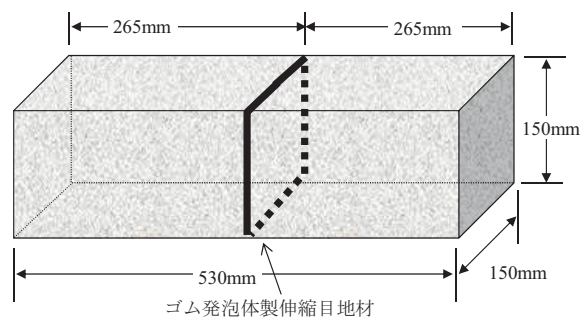


Fig.2-41 供試体 (Cタイプ) の形状および寸法
The shape and size of test specimen (Type C)

Table 2-1 止水板と目地材の物性値
Physical properties of the water stop and the joint material

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

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

粗骨材の 最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					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

mm²/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

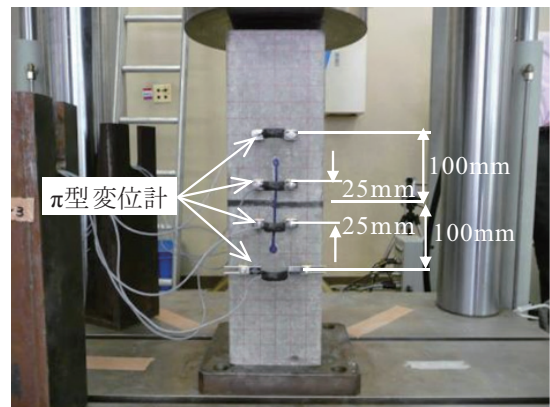


Fig.2-42 破壊試験の状況
Destructive test

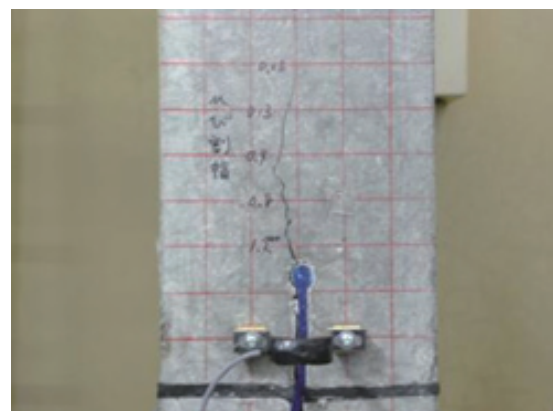


Fig.2-43 供試体 A-1 の破壊状況
Broken specimen (A-1)

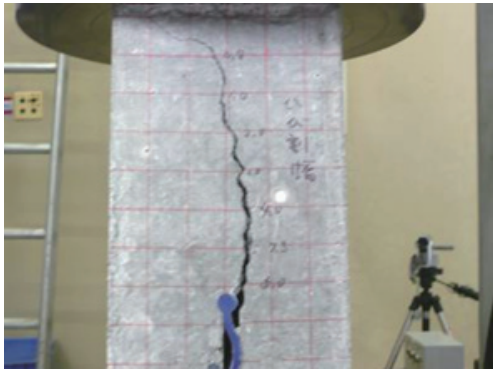


Fig.2-44 供試体 A-2 の破壊状況
Broken specimen (A-2)

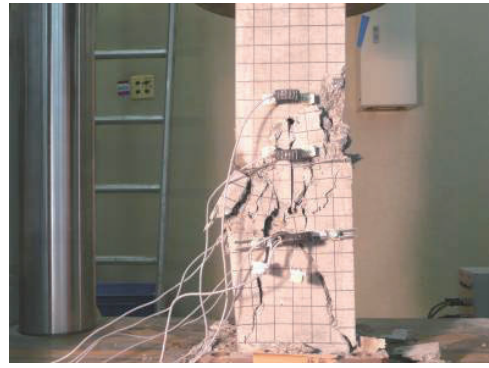


Fig.2-48 供試体 B-3 の破壊状況
Broken specimen (B-3)

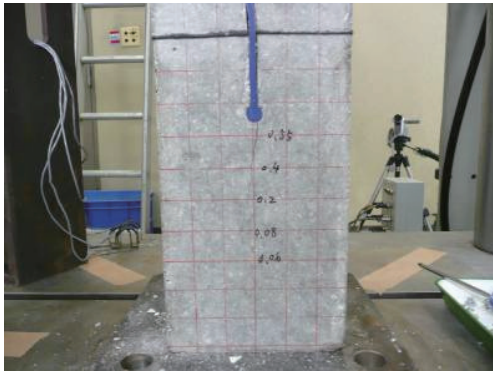


Fig.2-45 供試体 A-3 の破壊状況
Broken specimen (A-3)



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

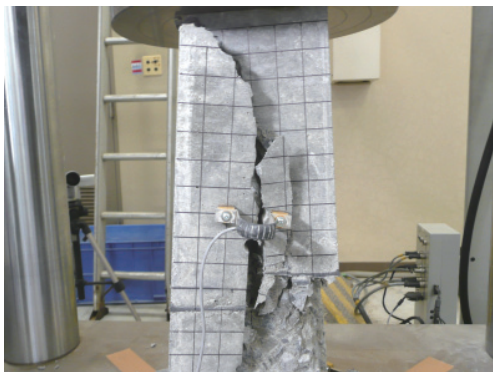


Fig.2-46 供試体 B-1 の破壊状況
Broken specimen (B-1)



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

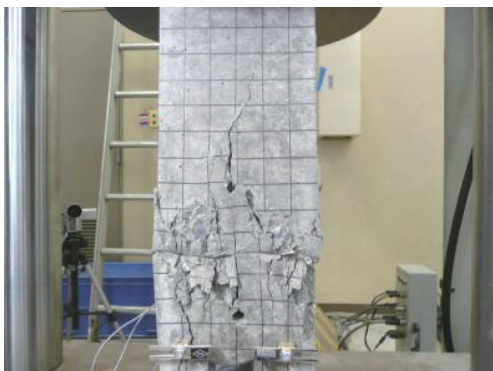


Fig.2-47 供試体 B-2 の破壊状況
Broken specimen (B-2)

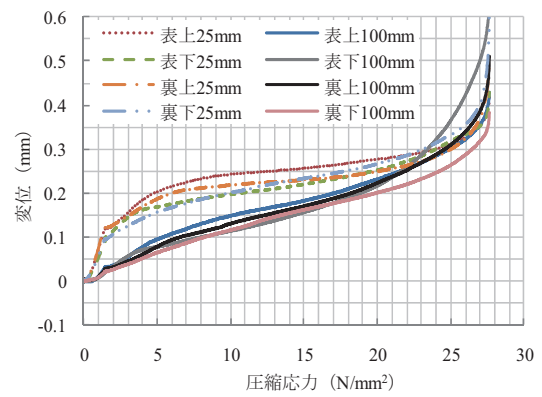


Fig.2-51 圧縮応力と変位の関係 (A-1)
Relation between compression stress and displacement (A-1)

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 0.2mm 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。

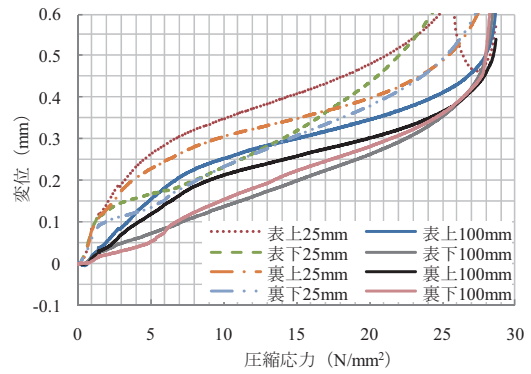


Fig.2-52 圧縮応力と変位の関係 (A-2)
Relation between compression stress and displacement (A-2)

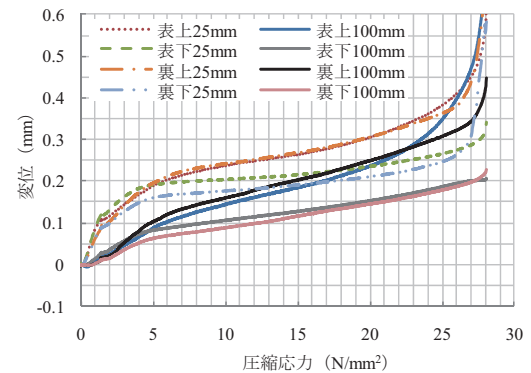


Fig.2-53 圧縮応力と変位の関係 (A-3)
Relation between compression stress and displacement (A-3)

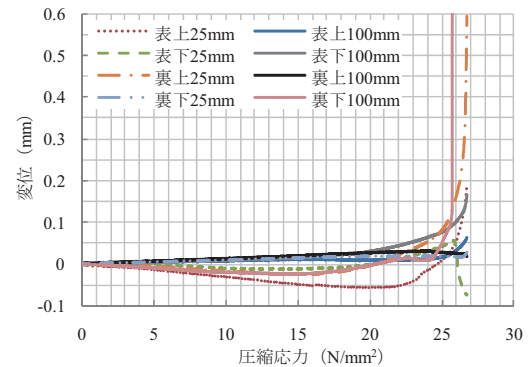


Fig.2-54 圧縮応力と変位の関係 (B-1)
Relation between compression stress and displacement (B-1)

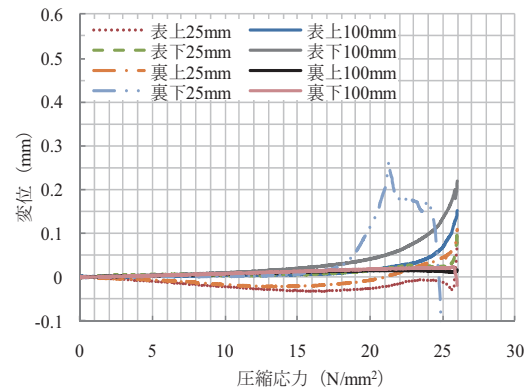


Fig.2-55 圧縮応力と変位の関係 (B-2)
Relation between compression stress and displacement (B-2)

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/mm^2 で $5 \sim 6\text{mm}$ 程度変位し、 5N/mm^2 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 $1,000\mu$ 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 $1 \sim 2\text{N/mm}^2$ 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 ($\phi 100\text{mm} \times h200\text{mm}$) を用いた材齢 28 日の圧縮強度は、3 体の平均値が 31.8N/mm^2 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

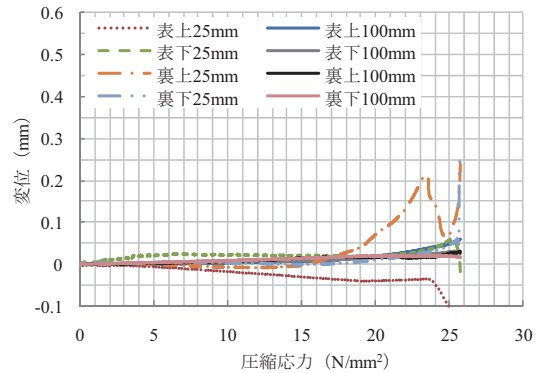


Fig.2-56 圧縮応力と変位の関係 (B-3)
Relation between compression stress and displacement (B-3)

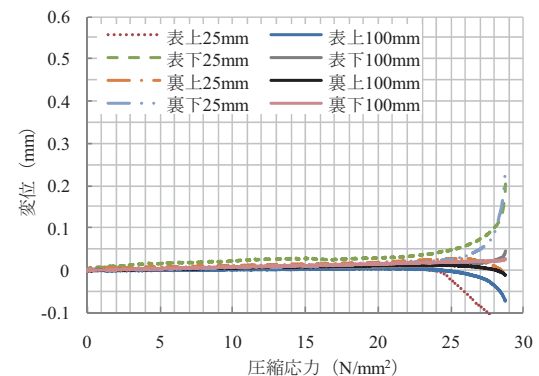


Fig.2-57 圧縮応力と変位の関係 (C-1)
Relation between compression stress and displacement (C-1)

Table 2-3 最大圧縮応力
Maximum compression stress

供試体番号	最大圧縮応力 (N/mm²)	平均値 (N/mm²)
A-1	27.7	28.2
A-2	28.7	
A-3	28.1	
B-1	26.7	26.2
B-2	26.1	
B-3	25.8	
C-1	28.8	28.9
C-2	29.0	

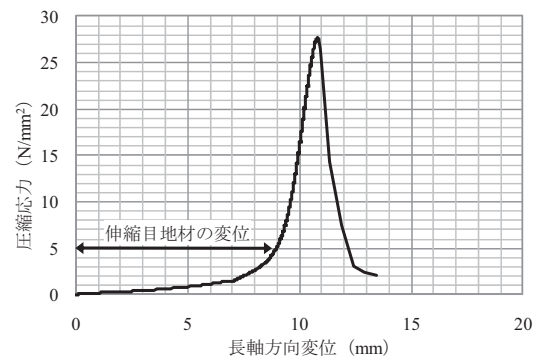


Fig.2-58 圧縮応力と供試体長軸方向変位の関係 (A-1)
Relation between compression stress and displacement along the major axis (A-1)

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 ヶ所, 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 ヶ所設置した。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 ヶ所設置した。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 ヶ所設置した。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, 荷重制御により载荷速度を $0.1\text{N/mm}^2/\text{s}$ 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 の裏側における载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

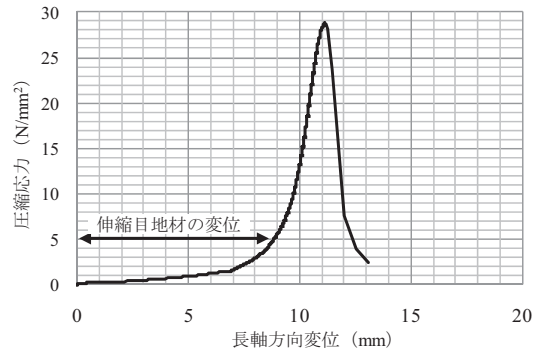


Fig.2-59 圧縮応力と供試体長軸方向変位の関係 (A-2)
Relation between compression stress and displacement along the major axis (A-2)

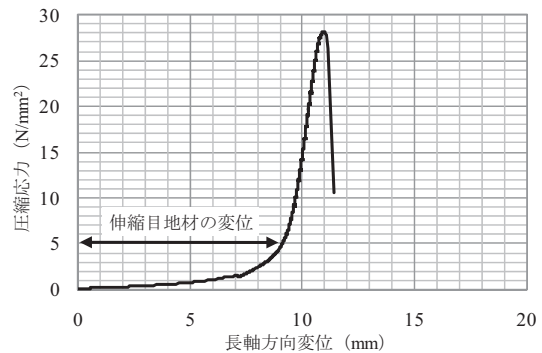


Fig.2-60 圧縮応力と供試体長軸方向変位の関係 (A-3)
Relation between compression stress and displacement along the major axis (A-3)

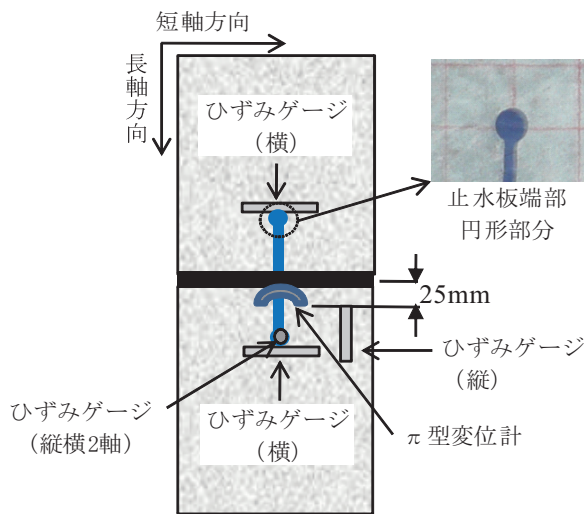


Fig.2-61 ひずみゲージなどの配置状況
Arrangement of strain gauge

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 の裏側における荷重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荷重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荷重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/mm^2 であったが、最大値と最小値で 5.6N/mm^2 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、荷重荷重が偏心する可能性があるが、荷重面の平面度や、荷重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/mm^2 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/mm^2 で $1,000\mu$ に達している。その後、 12N/mm^2 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/mm^2 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 $4,000 \sim 5,000\mu$ 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。

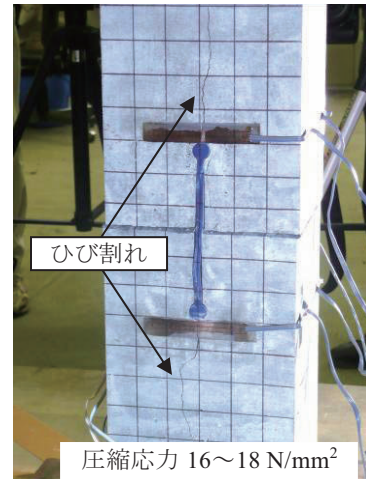


Fig.2-62 供試体 1 の荷重途中のひび割れ発生状況
Occurrence of cracks during the loading test (specimen1)

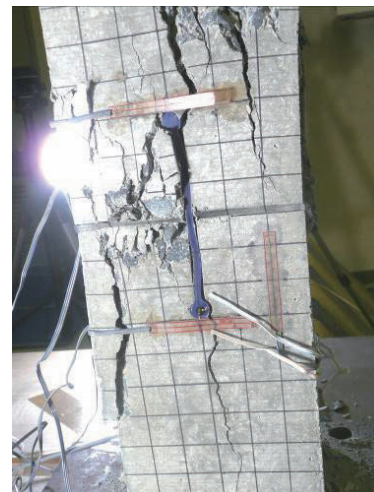


Fig.2-63 供試体 1 の試験後の破壊状況
Destruction situation of the test specimen1 after the loading test

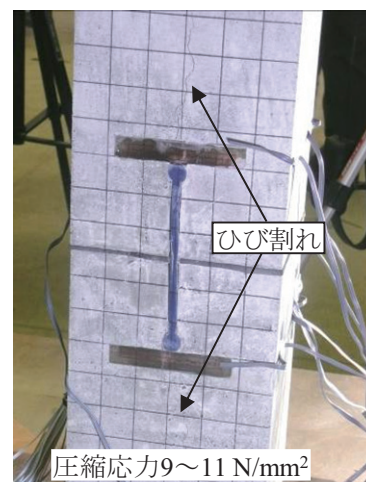


Fig.2-64 供試体 2 の荷重途中のひび割れ発生状況
Occurrence of cracks during the loading test (specimen2)



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

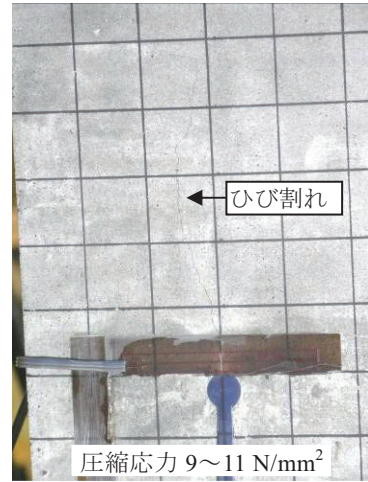


Fig.2-68 供試体4の荷重途中のひび割れ発生状況
Occurrence of cracks during the loading test (specimen4)

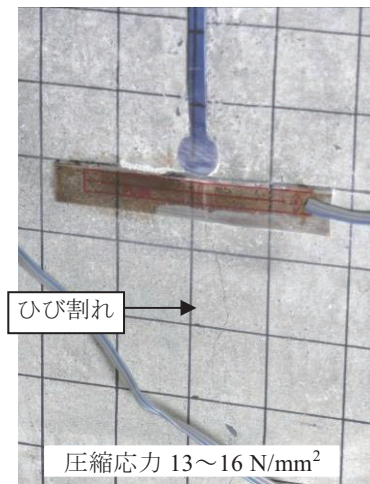


Fig.2-66 供試体3の荷重途中のひび割れ発生状況
Occurrence of cracks during the loading test (specimen3)



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

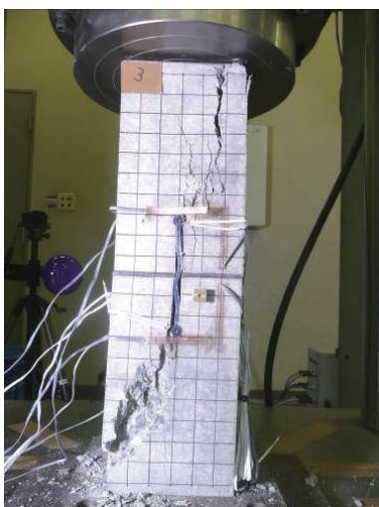


Fig.2-67 供試体3の試験後の破壊状況
Destruction situation of the test specimen3 after the loading test

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
平均値	22.9

Fig. 2-71 より、供試体2についても、圧縮応力が $1\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $6\text{N}/\text{mm}^2$ と $11\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $10\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 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、 $2\text{N}/\text{mm}^2$ で $1,000\mu$ 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 $7\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 付近で止水板端部の横ひずみが急激に増大し、 $1 \sim 2\text{N}/\text{mm}^2$ で $1,000 \sim 2,000\mu$ 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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ 付近で急激に増大し、 $1 \sim 2\text{N}/\text{mm}^2$ で $2,000\mu$ 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 $9 \sim 10\text{N}/\text{mm}^2$ 、Fig. 2-75 では $1 \sim 2\text{N}/\text{mm}^2$ 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 $1\text{N}/\text{mm}^2$ に達する前に急激に増大し、最大圧縮応力の $1/10$ 以下の $2\text{N}/\text{mm}^2$ 付近で $1,000\mu$ 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 $100 \sim 200\mu$ 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 $2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の圧縮応力で伸び限界ひずみの $5 \sim 10$ 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 $1,000\mu$ 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

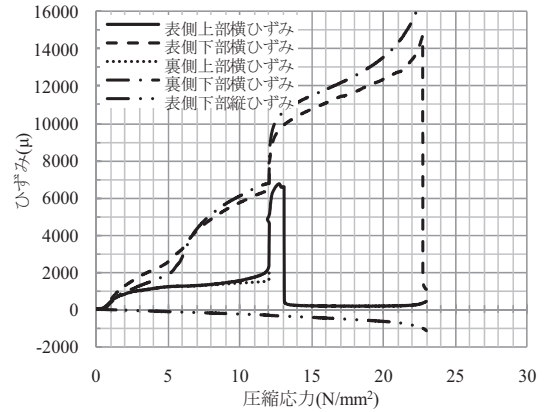


Fig.2-70 圧縮応力とひずみの関係（供試体1）
Relation between compression stress and strain (specimen1)

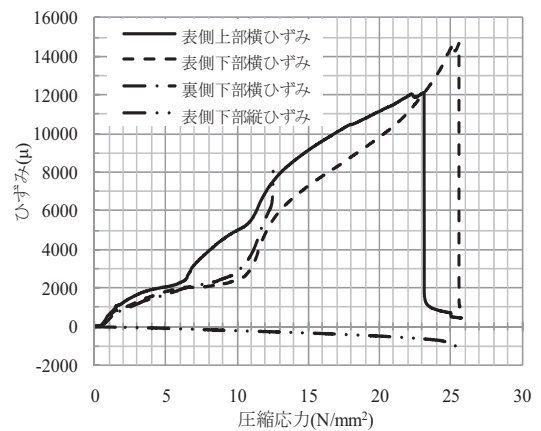


Fig.2-71 圧縮応力とひずみの関係（供試体2）
Relation between compression stress and strain (specimen2)

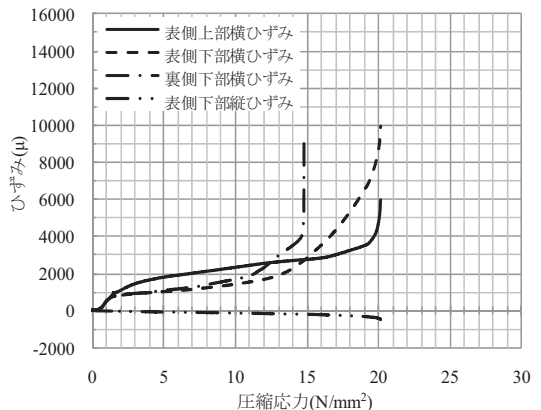


Fig.2-72 圧縮応力とひずみの関係（供試体3）
Relation between compression stress and strain (specimen3)

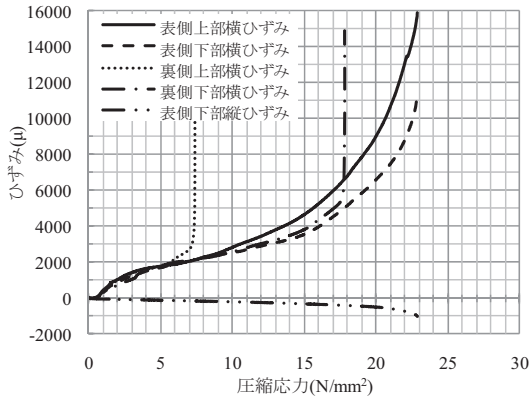


Fig.2-73 圧縮応力とひずみの関係 (供試体 4)
Relation between compression stress and strain (specimen4)

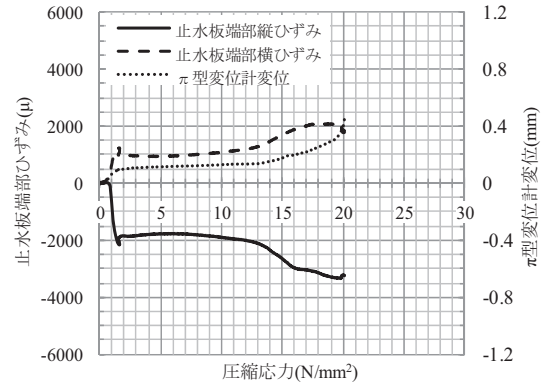


Fig.2-76 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位の関係 (供試体 3)
Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis (specimen3)

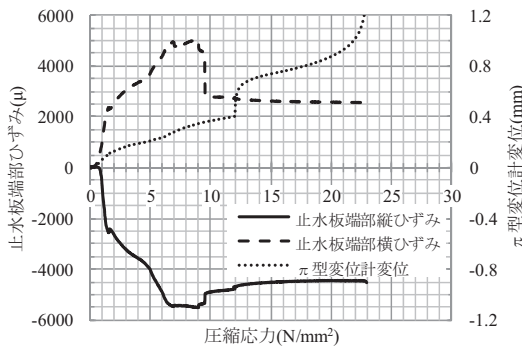


Fig.2-74 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位の関係 (供試体 1)
Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis (specimen1)

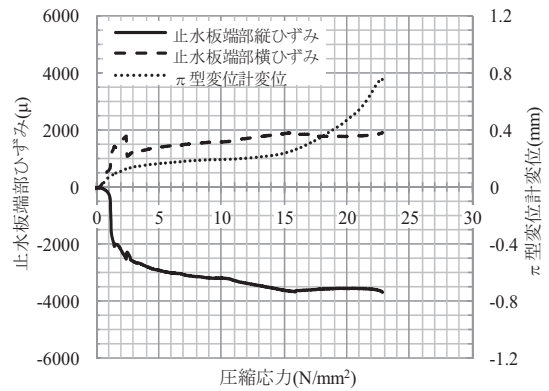


Fig.2-77 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位の関係 (供試体 4)
Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis

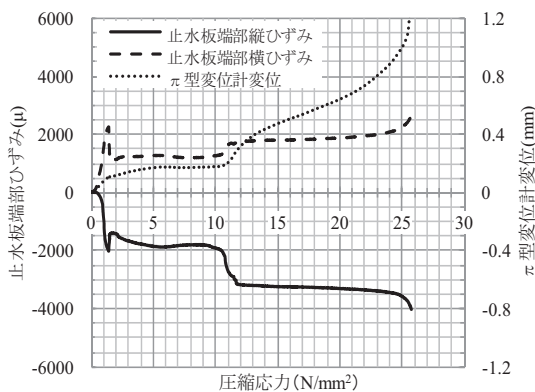


Fig.2-75 圧縮応力と止水板端部のひずみおよび短軸方向変位の関係 (供試体 2)
Relation between compression stress, strain at the end of water stop, and displacement along the minor axis (specimen2)

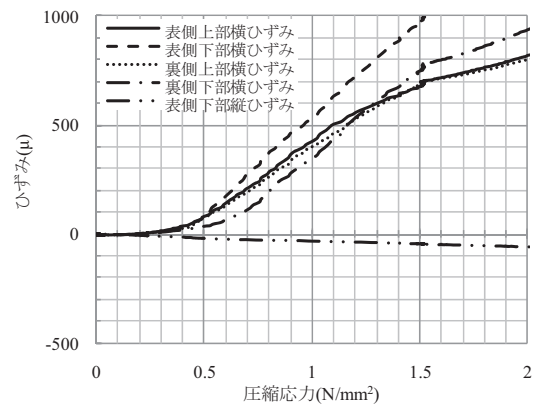


Fig.2-78 供試体 1 の圧縮応力とひずみの関係
Relation between compression stress and strain (specimen1)

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/mm^2 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 200μ に達していることが分かる。よって、 $0.5 \sim 0.8\text{N/mm}^2$ 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/mm^2 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/mm^2 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/mm^2 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/mm^2 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 ($3 \sim 23\text{N/mm}^2$) 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 $0.5 \sim 0.8\text{N/mm}^2$ 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 $3 \sim 5\text{mm}$ 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

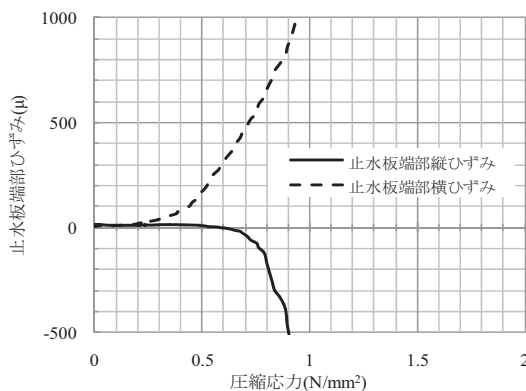


Fig.2-79 供試体 1 の圧縮応力と止水板端部のひずみの関係
Relation between compression stress and strain at the end of water stop (specimen1)

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/mm^2 未満の圧縮応力で、コンクリートの伸び限界ひずみ ($100 \sim 200\mu$) 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)。

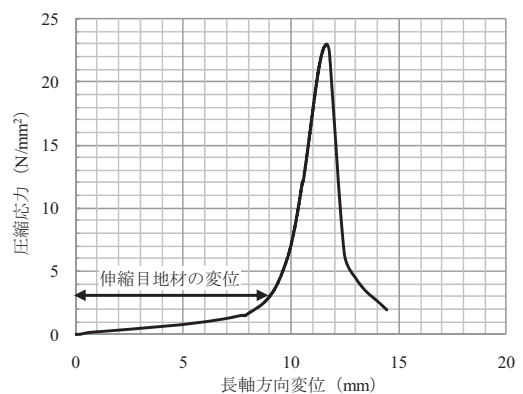


Fig.2-80 供試体 1 の圧縮応力と長軸方向変位の関係
Relation between compression stress and displacement along the major axis (specimen1)

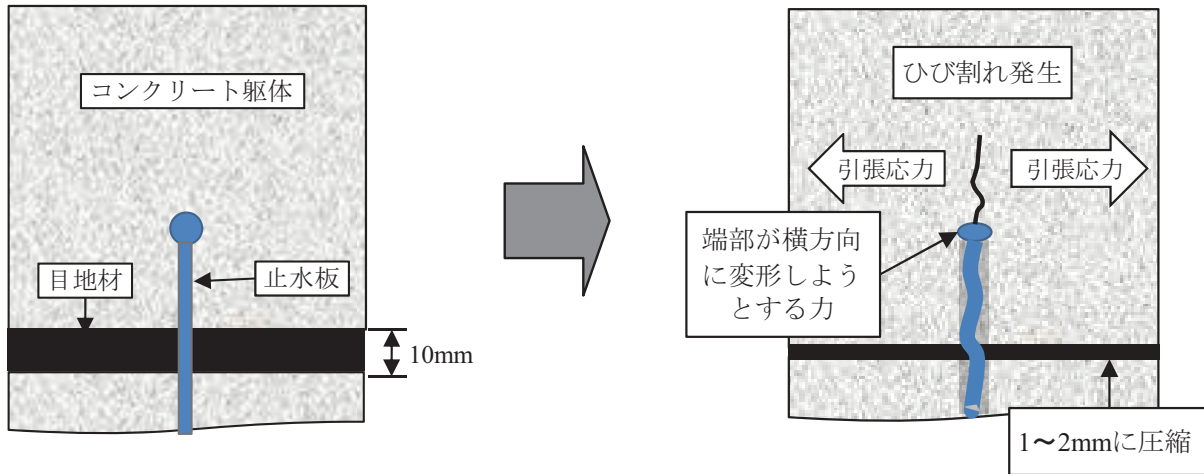


Fig.2-81 ひび割れ発生のメカニズム
Mechanism of occurrence of cracks

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载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時、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。

Ⅲ 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、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酸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・補強の可否の判定や、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酸化調査

コンクリートの中酸化の調査は、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酸化深さを把握する。ドリル法による中酸化深さの測定状況を Fig. 3-4 に示す。



Fig.3-4 ドリル法による中酸化深さの測定
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、断水期間に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)。

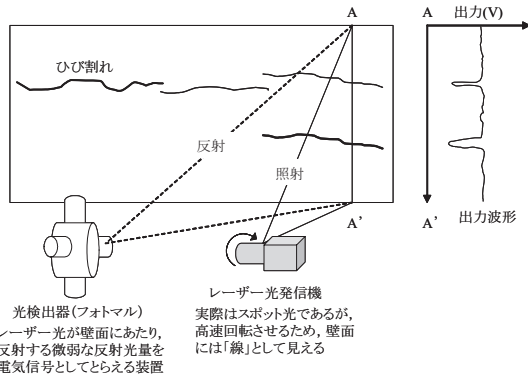


Fig.3-5 レーザ光による壁面画像撮影の概要 (森ら, 2004)
Outline of continuous digital scanning system using laser beam

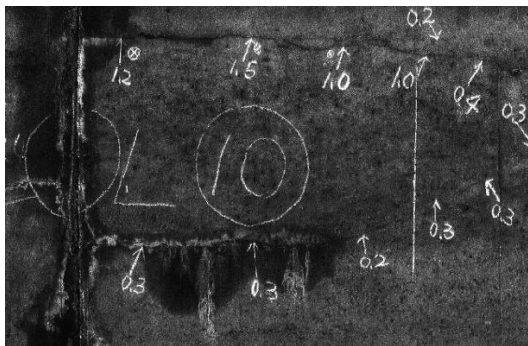


Fig.3-6 レーザ光による水路トンネルの展開画像 (森ら, 2006)
Continuous digital pictures of irrigation tunnel lining using laser scanning system

(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できることから、断水期間に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。

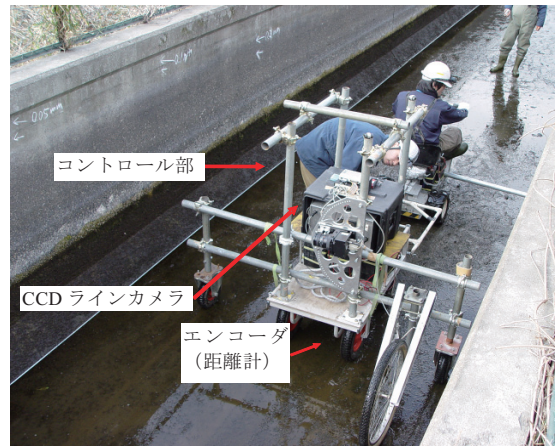


Fig.3-7 CCD ラインカメラによる壁面画像撮影状況 (森ら, 2006)
On-site survey using CCD line camera system

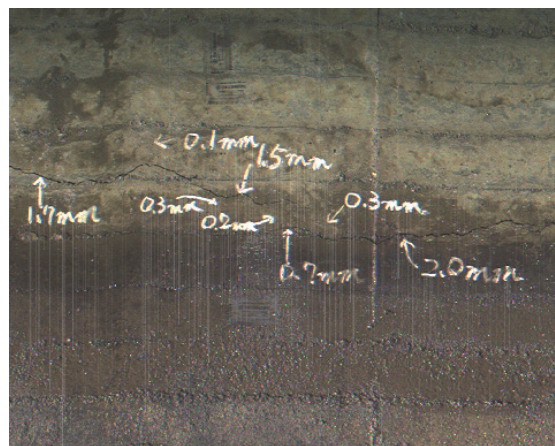


Fig.3-8 CCD ラインカメラによる水路トンネルの壁面画像 (森ら, 2006)
Continuous digital pictures of irrigation tunnel lining using CCD line camera system

(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ンシ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_2 (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_a (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。

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

$$k_s = 0.26 \times R_z, \text{ もしくは } k_s = 2 \times R_a \quad (3-2)$$

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

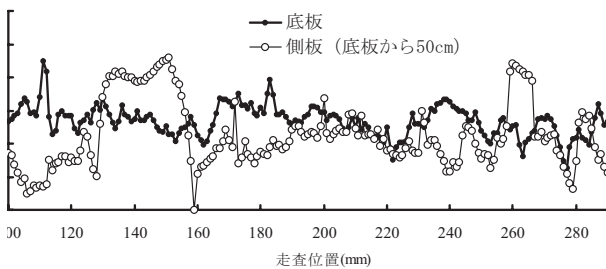


Fig.3-10 携帯型粗さ測定装置による水路の表面凹凸の計測結果例 (中矢ら, 2008b)

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。

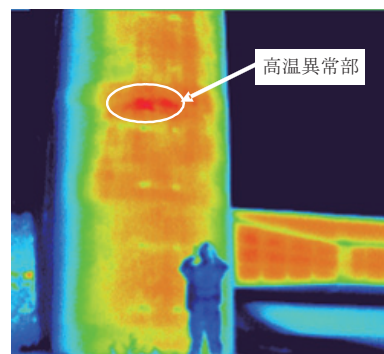


Fig.3-11 頭首工堰柱の赤外線画像 (森ら, 2002)
Infrared image about a pillar of a headwork

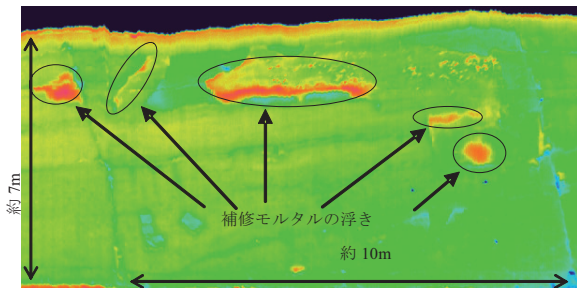


Fig.3-12 ダム洪水吐躯体の赤外線ラインスキャン画像(森ら, 2006)
Infrared line scan of concrete at the surface of spillway

(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・トリンプル, 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、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放射し、ドップラー

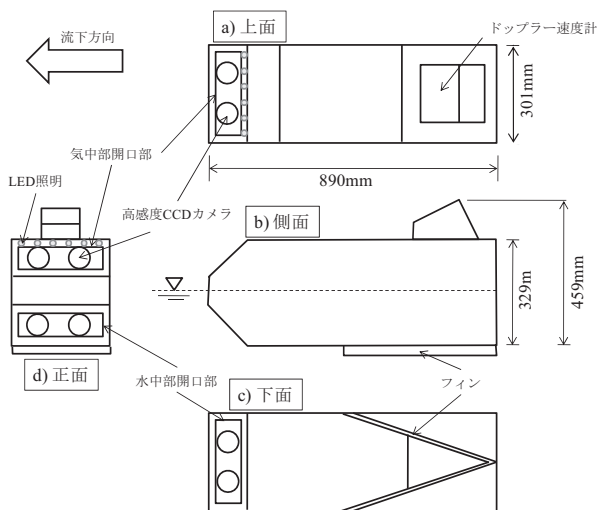


Fig.3-16 フロート式画像撮影装置

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 ヶ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、 $2R = 1.7\text{m}$ 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

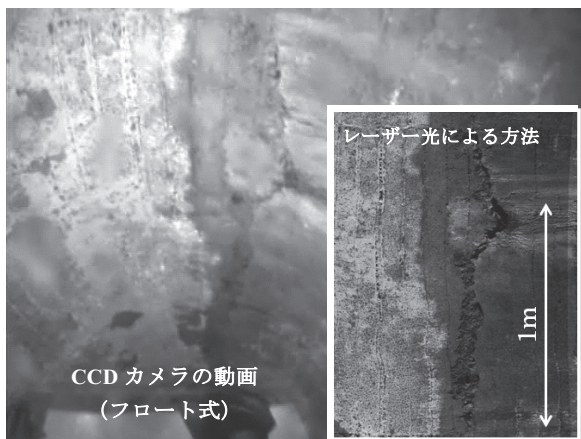


Fig.3-19 CCDカメラ画像とレーザー光画像との比較
Comparison between a picture by CCD line camera system and a picture by laser scanning system

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回測定の実測値)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

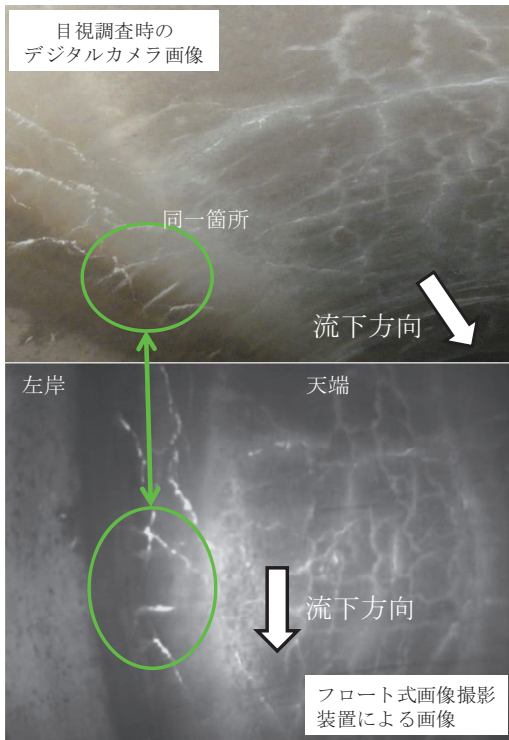


Fig.3-20 フロート式画像撮影装置画像とデジタルカメラ画像の比較
Comparison between a picture by floating apparatus and a picture by a digital camera

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、取水ができないダムや放流管や発電用水路の水中心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

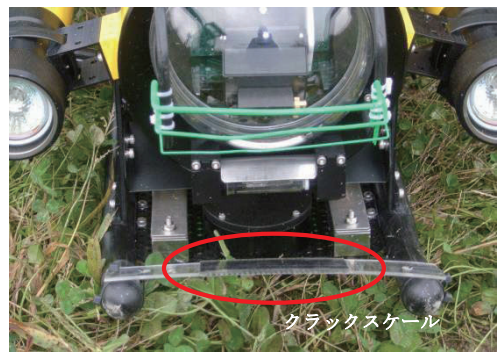


Fig.3-22 水中ロボットカメラに取り付けたクラックスケール
Remotely operated vehicle with crack scale

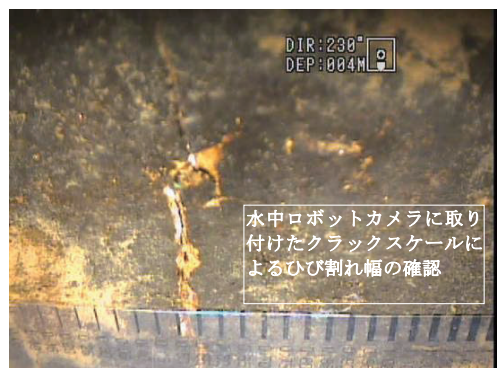


Fig.3-23 水中ロボットカメラによるサイホンのひび割れ調査状況
Crack survey inside a siphon by remotely operated vehicle



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
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 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) 通水状態に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。

IV 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別、土木施設や機械設備といった施設区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_{ij} (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 : %)

現 状	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
I	損傷が著しく、交通安全確保の支障となる恐れがある。	1
II	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
III	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
OK	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

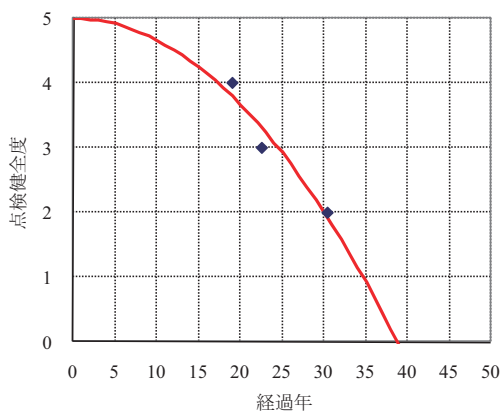


Fig.4-1 PC 橋床版の劣化予測モデル (北海道建設部, 2006)
Deterioration prediction model of PC slab at a bridge

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 pavement

ランク	PSI	対応工法
1	4 ~	—
2	3 ~ 4	—
3	2 ~ 3	表面処理
4	1 ~ 2	オーバーレイ
5	~ 1	打換え

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

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)

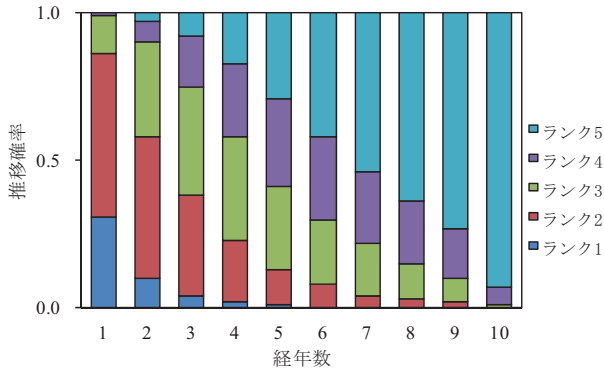


Fig.4-2 舗装状態の推移確率の経年変化
Secular change of transition probability of pavement

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栈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、栈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 年が経過した栈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 栈橋の劣化度判定基準 (中川ら, 2003)
Deterioration evaluation standard of a pier

劣化度部材項目	0	I	II	III	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
ひび割れ	床版	なし	1方向にひび割れが多く見られる	1方向に幅0.05mm以上のひび割れが見られる	2方向に幅1mm以上のひび割れが広い範囲で見られる	—
	梁	なし	垂直方向にひび割れが見られる	垂直方向に幅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	—
遊離石灰	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で見られる	—	—
浮き剥離・剥落	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・剥落が見られる	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

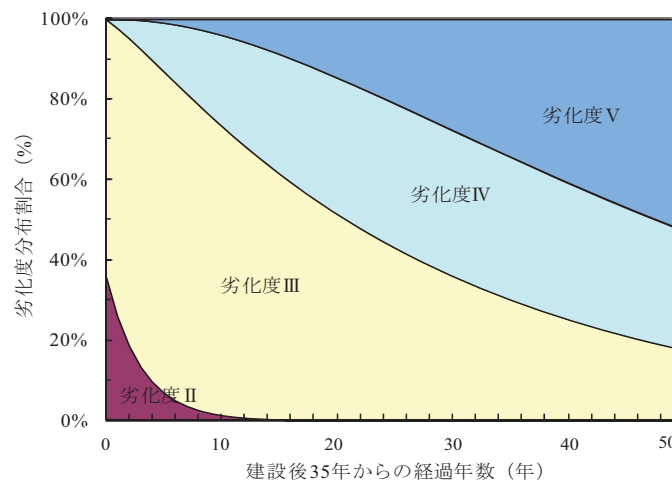


Fig.4-3 栈橋床版の劣化進行予測結果 (中川ら (2004) を一部修正)
Result of a prediction of deterioration progress at a slab of a pier

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

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早い傾向にある。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 4-5 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	A	B	C
判定基準の内容	施設の劣化が比較的多く、施設機能が低下している。(もはや応急処置では対応できず、早期に整備が必要)	現状ではそれほど施設機能に支障はないものの老朽化の兆候が見受けられ、進行状態にある。(改修整備の緊急性は低い)	施設構造が安定していて機能的にも健全である。(改修整備は必要ないが、施設の機能や周辺状況に引き続き留意する必要がある)

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

施設区分	工種区分	データ数	
土木	機場	464	
	水門	65	
	水路(開水路)	1,797	
	水路(パイプライン)	1,558	4,712
	水路(トンネル)	229	
	ダム	167	
機械	頭首工	432	
	機場	1,753	8,982
	水路	493	
	ダム	70	
頭首工	282		
電気	機場	441	
	水路	165	735
	ダム	47	
	頭首工	82	
建屋	全工種	937	

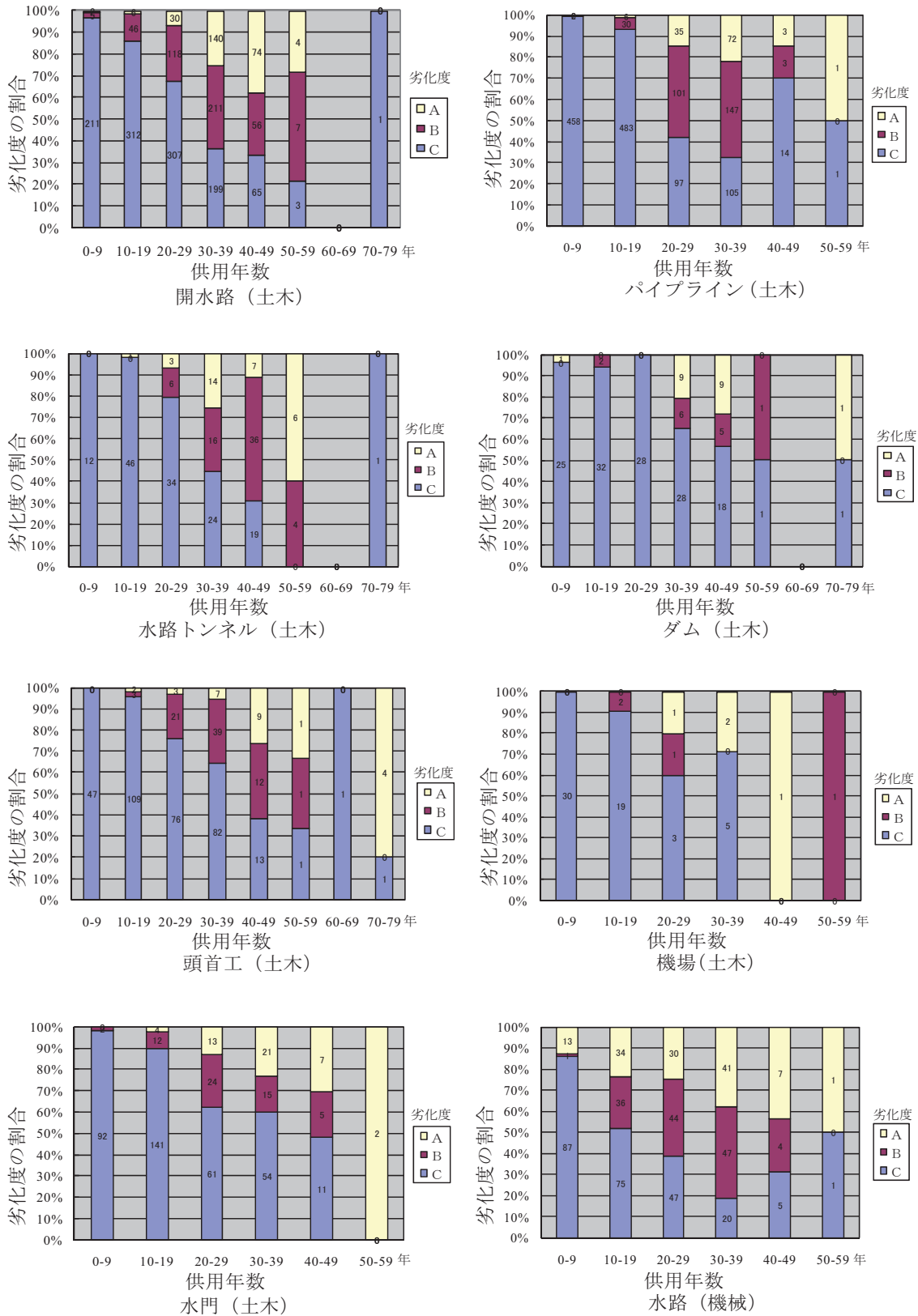


Fig.4-4 供用年数別劣化度の割合①
A rate of deterioration stage according to a service period (1)

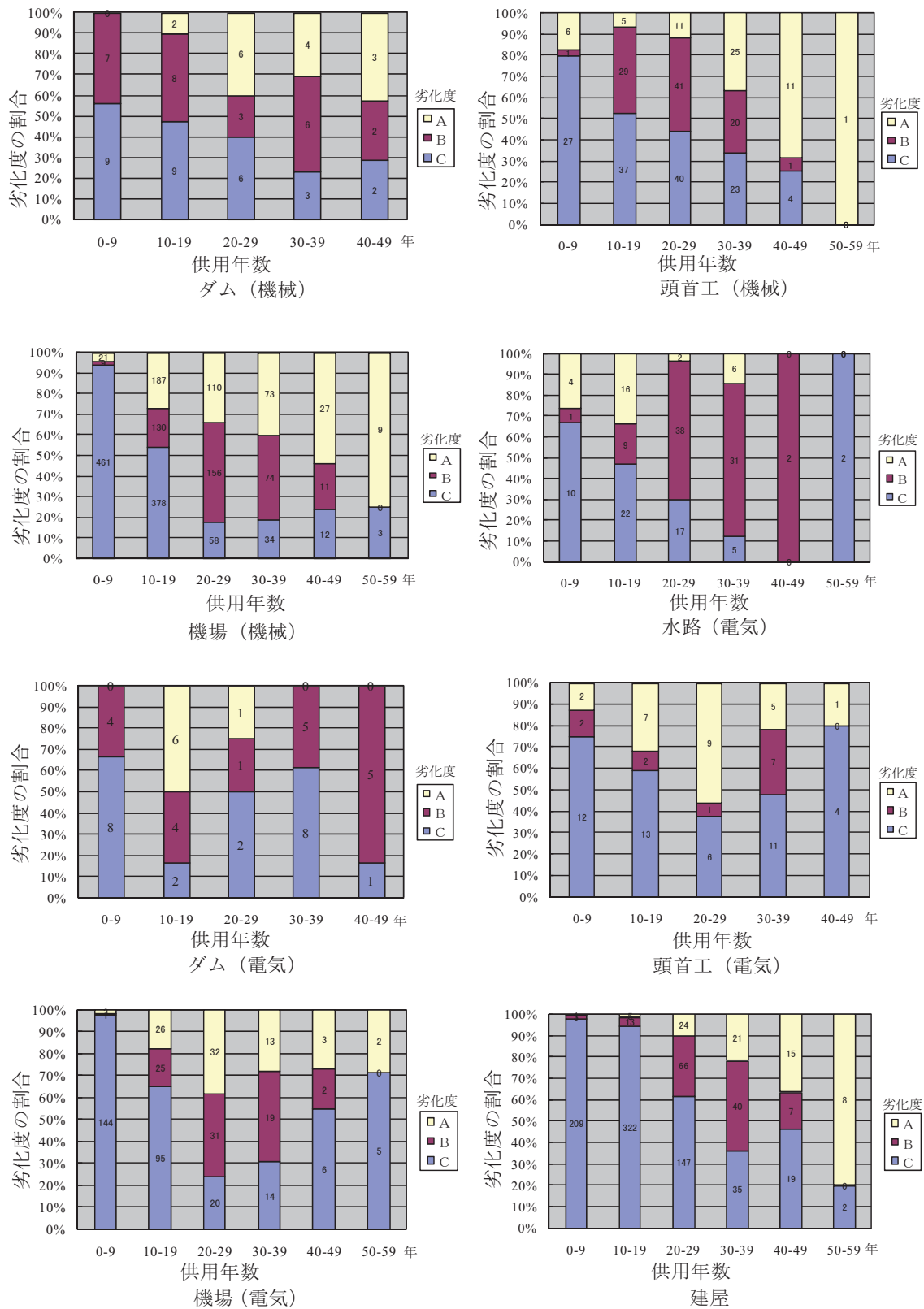


Fig.4-5 供用年数別劣化度の割合②
A rate of deterioration stage according to a service period (2)

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

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

とおくと、確率の基本的性質から

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

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)。

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

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。

$$P = \begin{pmatrix} 1-p_1 & 0 & 0 \\ p_1 & 1-p_2 & 0 \\ 0 & p_2 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-5)$$

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。

$$q(m) = P^m q(0) \quad (4-6)$$

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。

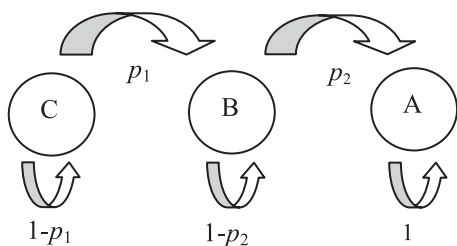


Table 4-6 広域基盤整備計画調査の既往データ
A number of soundness data of wide area master plan survey

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

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

経過年数	0	1	2	3
各劣化度の	100	99	98.01	97.0299
占める割合	0	1	1.97	2.9107
(%)	A	0	0	0.02
				0.0594

推移確率 (C→B; 1%, B→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 determination coefficient for a prediction of deterioration progress of open canal

推移確率 (C→B ; 2.2%, B→A ; 3.2%)

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

また、Table 4-8 の推移確率の組み合わせ $5 \times 5 = 25$ 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 $R^2 = 0.9496$ 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 C→B (%)	推移確率 B→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

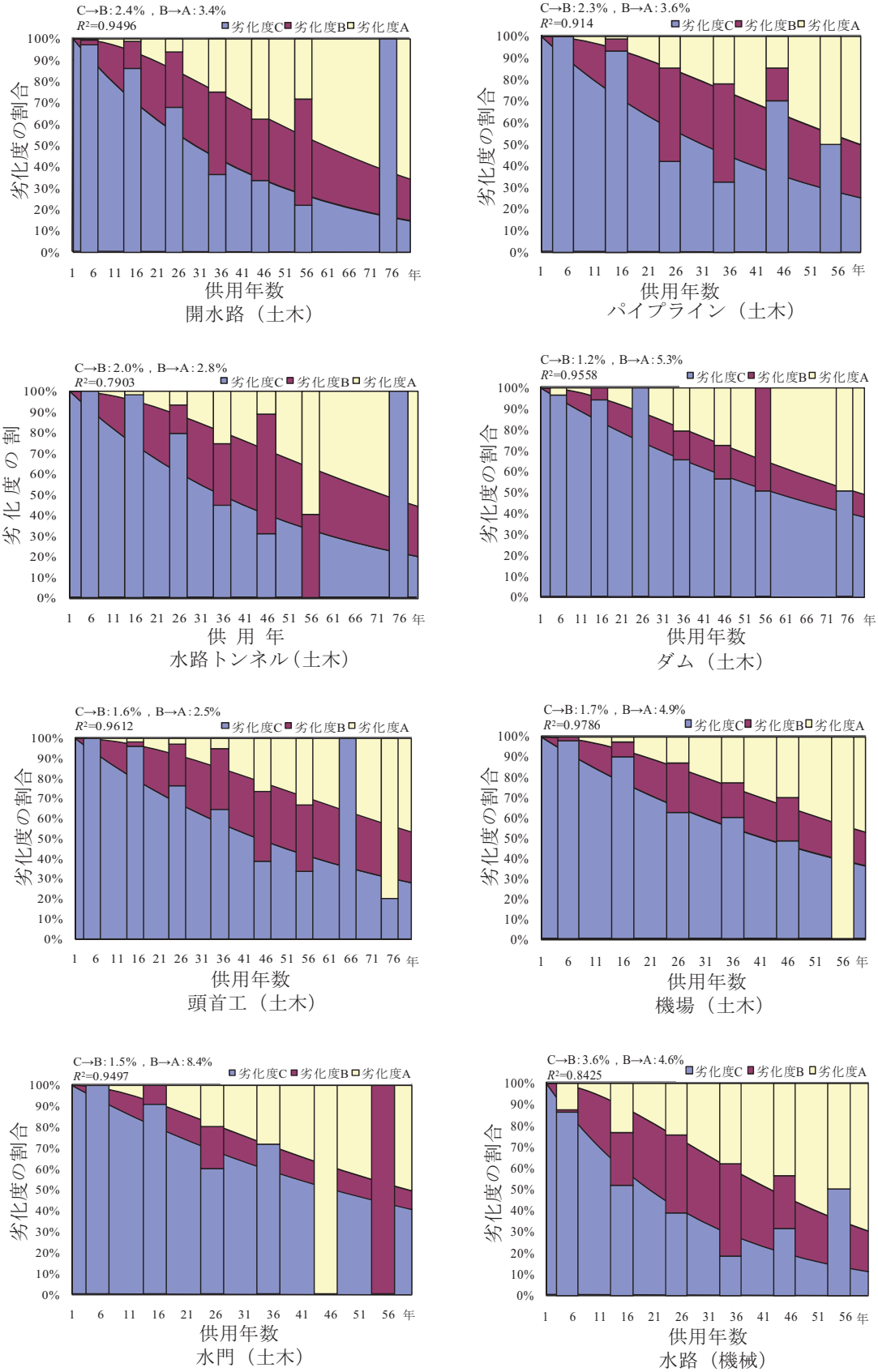


Fig.4-7 劣化予測モデル①
A deterioration prediction model (1)

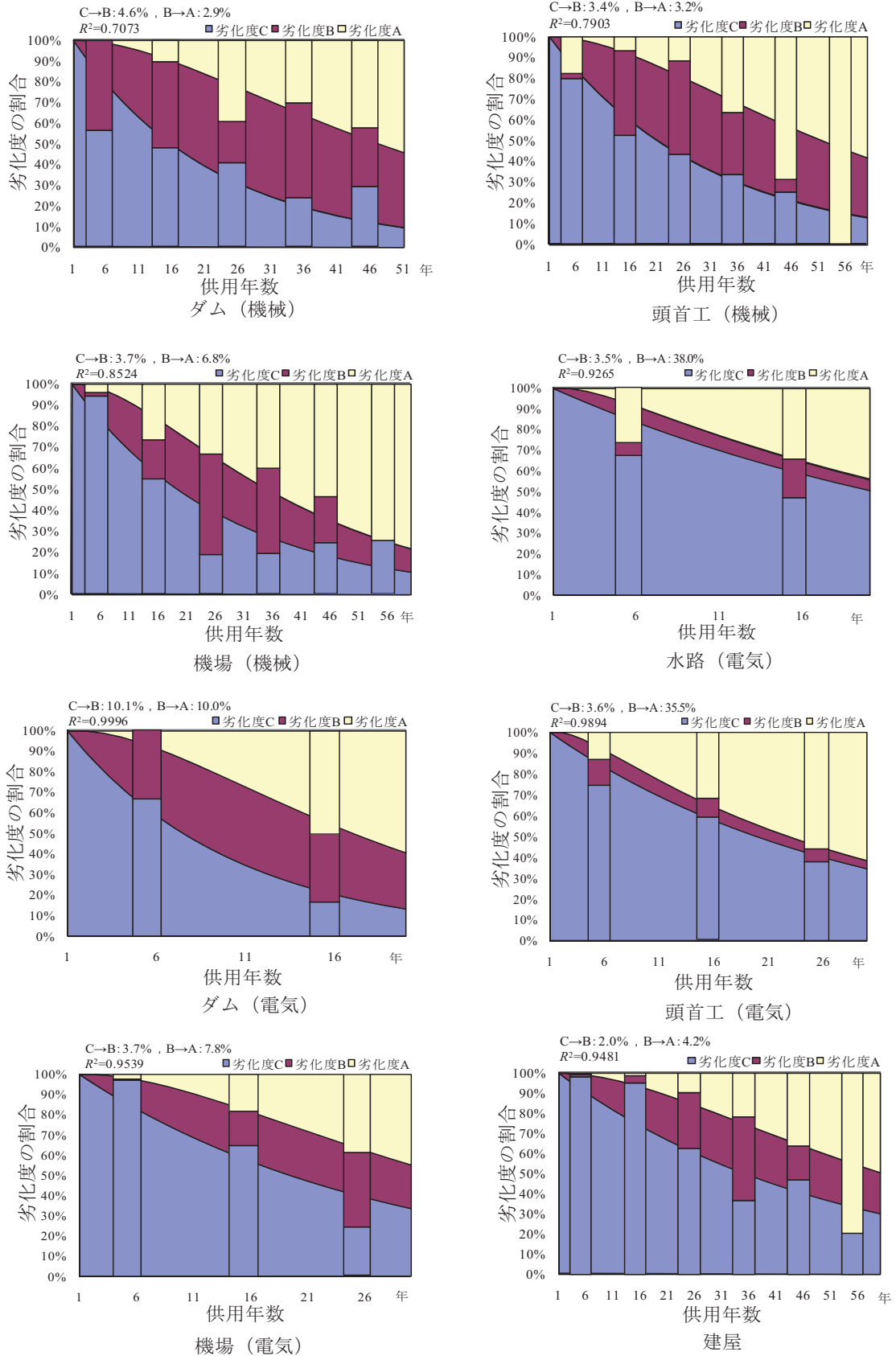


Fig.4-8 劣化予測モデル②
A deterioration prediction model (2)

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 → 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 → 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 → B : 2.0%、劣化度 B → 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。

$$\text{健全度 } (S) = -0.00216t^2 + 5 \quad (4-8)$$

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。

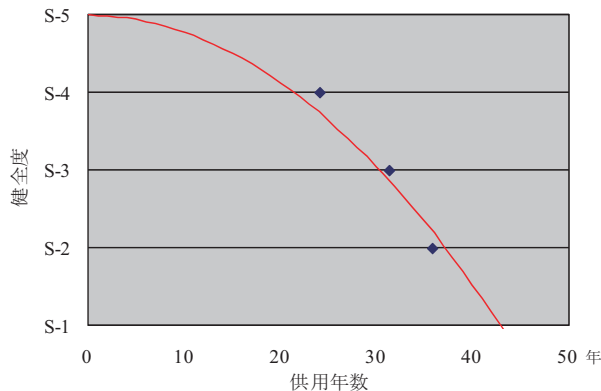


Fig.4-9 単一劣化曲線モデル
Single curve type prediction model of deterioration

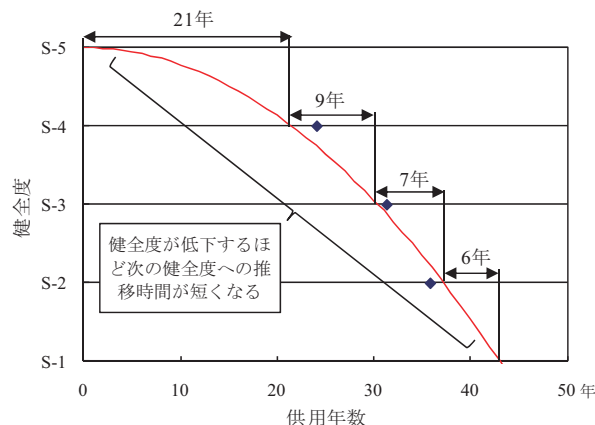


Fig.4-10 単一劣化曲線モデルにおける健全度推移時間の変化
A change of soundness using single curve type prediction model of deterioration

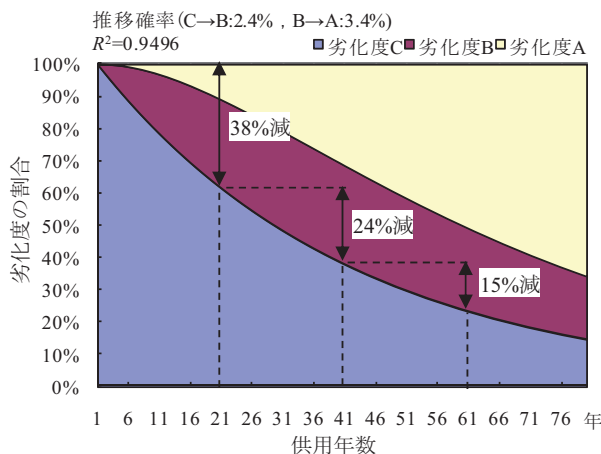


Fig.4-11 開水路 (土木) における劣化度 C の割合の推移
A rate change of deterioration grade "C" for an open canal

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られる。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別、土木施設や機械設備といった施設区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

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。

V 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ての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Ⅰ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に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、弾性係数およびポ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 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

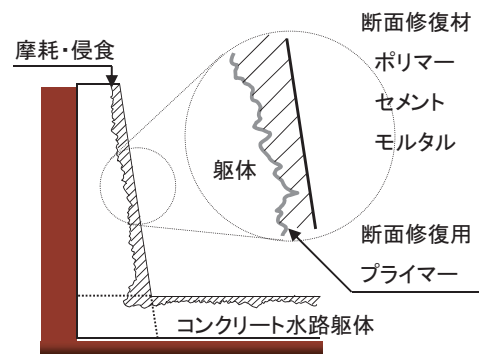


Fig.5-2 ポリマーセメントモルタルによる断面修復工法の標準断面図

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（長東ら，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。

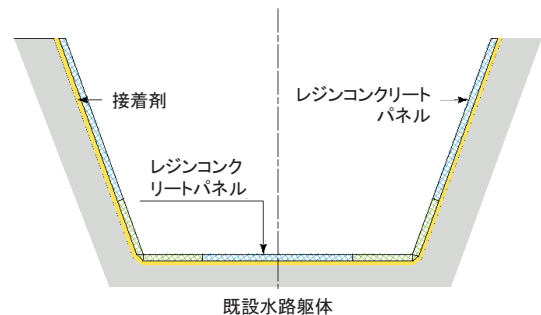


Fig.5-4 レジンコンクリートパネル工法の標準断面図
Typical cross section of resin concrete panel lining method



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、変性シリコーン系、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、既存目地幅のまま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。

既存目地幅のまま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取り取り、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(長東ら, 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

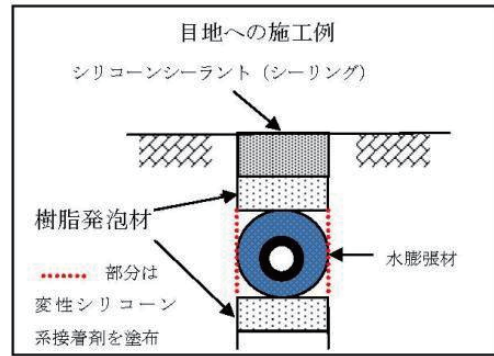


Fig.5-6 水膨張材による目地補修工法の概要(関東農政局, 2008)
Joint repairing method by water swelling materials



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

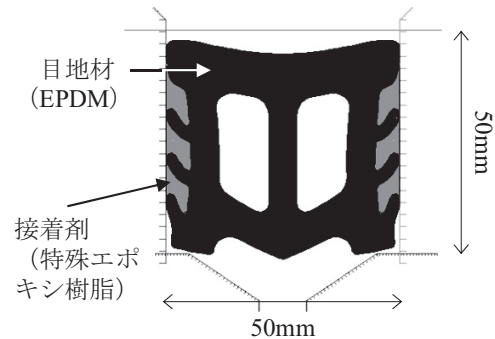


Fig.5-8 応力機能目地工法の標準断面図
Typical cross section of joint repair method for concrete canal by rubber elasticity



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カ所）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、

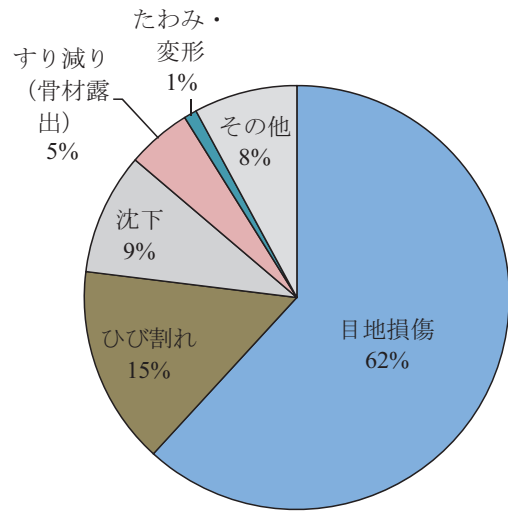


Fig.5-10 農業用開水路の主な変状
Mainly defective events for irrigation open canal

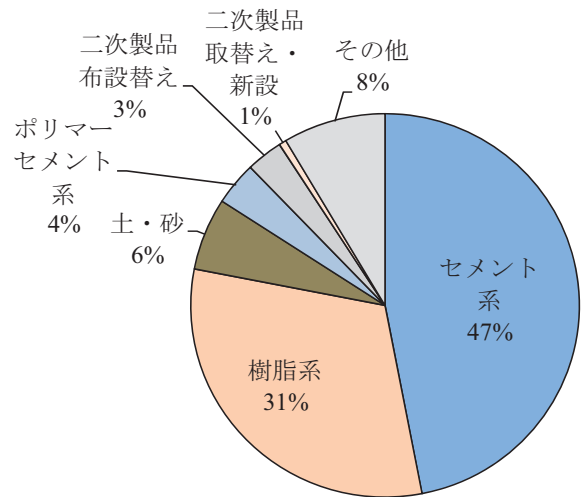


Fig.5-11 目地補修に用いられる工法
Joint repairing method



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す。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。

$$\Delta W = \alpha \cdot \Delta T \cdot L \quad (5-1)$$

ここに、 ΔW ：目地部の伸縮量（m）、 α ：コンクリートの熱膨張係数（ $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ）、 ΔT ：コンクリート開水路の躯体温度変化量（ $^{\circ}\text{C}$ ）、 L ：目地間隔（m）である。

躯体の年間温度変化量を 50°C 、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 $1\text{mm}/10\text{mm}=100,000 \times 10^{-6}$ 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 $100 \sim 200 \times 10^{-6}$ 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、隙間を拡げし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。

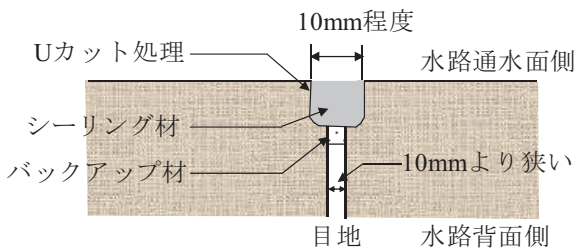


Fig.5-14 Uカット処理を伴う補修工法
Repair method with by cutting a U-shaped groove



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こと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、表面被覆工法の一つ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

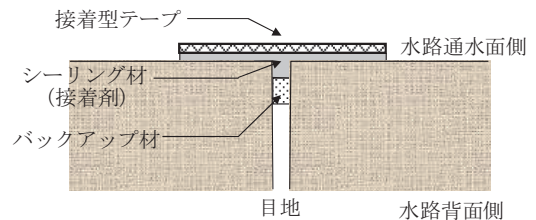


Fig.5-16 接着型テープ工法の概要
Repair method with a structural bonding tape



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た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

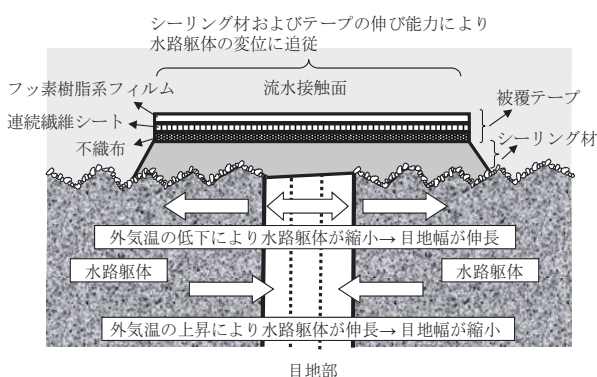


Fig.5-18 接着型テープ工法の止水性および追従性メカニズム
Mechanism of water-stoppage and elongation

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ーウム水路（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ーウ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

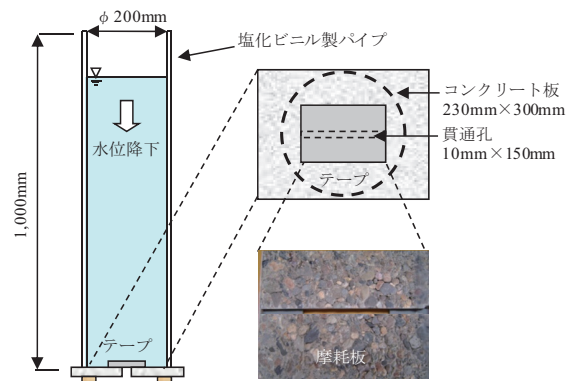
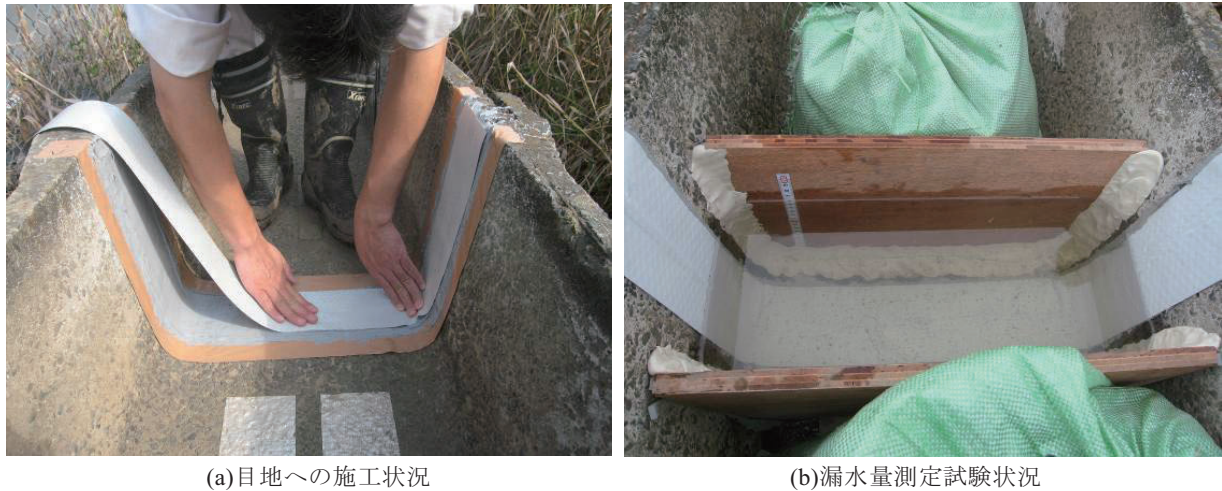


Fig.5-19 漏水量測定試験
Water leak amount test



(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 ヶ月後、12 ヶ月後、21 ヶ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 ヶ月後、15 ヶ月後に 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

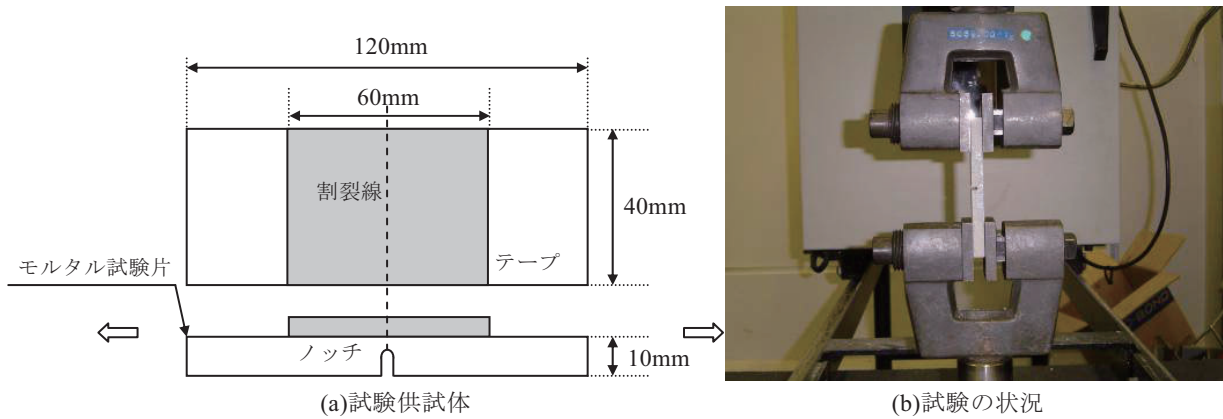


Fig.5-22 目地伸縮追従性試験
Elongation performance test



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）を用いて荷重速度5mm/minで引張荷重し、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、平滑板および摩擦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、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

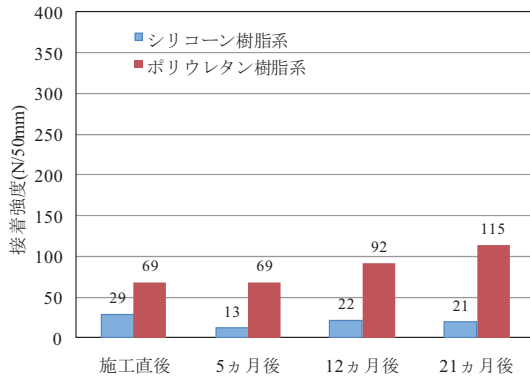


Fig.5-24 シーリング材単独の180度引き剥がし試験結果
Result of peel strength test of sealant:180° peel

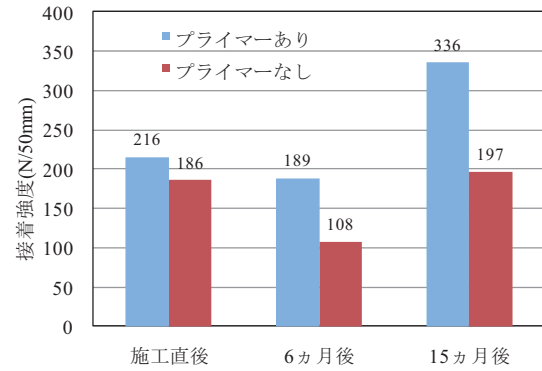


Fig.5-25 接着型テープの180度引き剥がし試験結果
Result of peel strength test of structural bonding tape :180° peel

なっている。しかし、今回の試験結果は、それぞれ供試体1体だけの値であり、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

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	№1	1,012
	№2	1,104
	№3	986
	平均	1,034
シリコン樹脂 系シーリング材 +テープ	№1	361
	№2	345
	№3	386
	平均	364
ポリウレタン樹 脂系シーリング 材+テープ	№1	452
	№2	451
	№3	444
	平均	449



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カ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カ所当たり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ヶ月が経過し、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事が想定される。

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ン樹脂系を比較した結果、ポリウレタン樹脂系がシリコ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排水路の総延長は約40万kmにも

のばり、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別、土木施設や機械設備といった施設区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時、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酸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) 通水状態に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Ⅳ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ン樹脂系を比較した結果、ポリウレタン樹脂系がシリコ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、接着強度の相对比较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、現地施工箇所を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

- 1) 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.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 8) 土木学会 (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.
- 9) 土木学会 (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・長東 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) 笥 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・長東 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査，利根川水系土地改良調査管理事務所，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 栈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.
- 29) 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・長東 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・長東 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)：栈橋 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栈橋 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・長東 勇(2006)：光硬化型 FRP シートを用いた農業用水路の更生工法 (P P 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) 長東 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) 長東 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) 長東 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) 長東 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) 長東 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.nikon-trimble.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, 宇野祐一, 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):ジメンプレ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 a 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