

# コンクリート開水路の構造安全性を評価する診断方法に関する研究

(Research on Diagnostic Method to Evaluate the Structural Safety of Concrete Open Canal)

藤本 光伸

Mitsunobu FUJIMOTO

2019

## 目 次

第1章 序論 .....	1
1.1 研究の背景 .....	1
1.1.1 農業水利施設のストックマネジメントの取り組み .....	1
1.1.2 コンクリート開水路に発生する変状 .....	4
1.1.3 農業用排水路の診断方法の現状 .....	10
1.2 構造安全性に関する既往の研究 .....	13
1.2.1 農業用管水路を対象とした耐力評価手法に関する研究 .....	13
1.2.2 コンクリート内部の欠陥探査に関する研究 .....	14
1.2.3 コンクリート開水路の断面欠損に関する研究 .....	14
1.3 補修・補強工法に関する既往の研究 .....	15
1.3.1 補修・補強工法に関する研究 .....	15
1.3.2 補修・補強工法のひび割れに関する研究 .....	16
1.4 本研究の目的 .....	16
1.5 本論文の構成 .....	18
第1章の参考文献 .....	21
第2章 コンクリート開水路の構造安全性評価装置の開発 .....	23
2.1 概要 .....	23
2.2 対象水路の選定 .....	24
2.3 開水路の劣化要因 .....	26
2.4 診断方法の提案 .....	27
2.5 水路壁載荷装置の開発 .....	28
2.5.1 載荷方法の検討 .....	28
2.5.2 載荷補助機構の検討 .....	29
2.5.3 変位計の検討 .....	30
2.5.4 水路壁載荷装置の仕様 .....	32

2.5.5	水路壁載荷装置の試作.....	33
2.5.6	水路壁載荷装置の構造.....	36
2.6	第2章の結論.....	38
	第2章の参考文献.....	39
第3章	コンクリート二次製品を対象とした構造安全性評価.....	40
3.1	概要.....	40
3.2	水路壁載荷装置を用いた開水路単体の挙動確認.....	41
3.2.1	水路壁載荷装置によるプレキャストコンクリートの外圧試験.....	41
3.2.2	アムスラー式外圧試験による曲げ荷重と変形量の検証.....	42
3.2.3	水路壁載荷装置による試験.....	43
3.2.4	試験結果.....	44
3.3	弾性理論に基づく計算値と実測値との比較.....	46
3.4	第3章の結論.....	50
	第3章の参考文献.....	51
第4章	コンクリート二次製品の劣化モデルを対象とした構造安全性評価.....	52
4.1	概要.....	52
4.2	コンクリート開水路に発生するひび割れ.....	53
4.3	底版ひび割れモデルにおける検証.....	54
4.3.1	試験体.....	54
4.3.2	試験方法.....	57
4.3.3	試験結果.....	58
4.4	貫通ひび割れモデルにおける検証.....	64
4.4.1	試験体.....	64
4.4.2	試験方法.....	65
4.4.3	試験結果.....	66
4.5	第4章の結論.....	72

第4章の参考文献	73
第5章 埋設されたコンクリート開水路を対象とした構造安全性評価	74
5.1 概要	74
5.2 現地に埋設されたコンクリート開水路に対する検証	75
5.2.1 試験体	75
5.2.2 試験方法	76
5.2.3 試験結果	77
5.3 複数箇所を測定した試験体の評価	79
5.3.1 試験方法	79
5.3.2 試験結果	80
5.4 均一に締固められた埋設環境下におけるコンクリート開水路の検証	84
5.4.1 試験体	84
5.4.2 試験体の埋設	85
5.4.3 試験方法	89
5.4.4 試験結果	91
5.5 第5章の結論	104
第5章の参考文献	105
第6章 コンクリート開水路の構造安全性評価手法の開発	106
6.1 概要	106
6.2 水路壁載荷法の調査方法	107
6.2.1 調査前の準備	107
6.2.2 水路壁載荷装置	108
6.2.3 水路壁載荷装置の設置手順	109
6.2.4 計測方法	111
6.3 判定方法の提案	114
6.4 第6章の結論	117

第6章の参考文献 .....	118
第7章 コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法のアンカーに作用する引抜荷重 の評価 .....	119
7.1 概要 .....	119
7.2 背景 .....	120
7.3 アンカー引抜荷重の計算式 .....	122
7.4 たわみ計測によるアンカー引抜荷重式の検証.....	126
7.4.1 試験条件.....	126
7.4.2 試験結果.....	129
7.5 実測値と計算値との整合性 .....	130
7.6 第7章の結論 .....	132
第7章の参考文献 .....	133
第8章 結論 .....	134
謝辞 .....	139
摘要 [Abstract] .....	140
学会誌公表論文リスト .....	144

## 第1章 序論

### 1.1 研究の背景

#### 1.1.1 農業水利施設のストックマネジメントの取り組み

農業用排水路の開水路形式は、農業用排水の流送を主目的として設置する水路の中で自由水面を持つものであり、その目的により用水路系と排水路系に分類される。用水路系の水路は、水利用計画に基づきかんがい用水を過不足なく効率的に流送できるよう、計画上から要求される流量を送配水する機能を有し、排水路系の水路は、地区内の排水を集めて排水先に導くだけでなく、受益地域のたん水被害を未然に防止するため、降雨流出を地区内から排水先まで迅速かつ安全に通水する機能も有するものである [1]。

このような農業用排水路は、幹線で約 4.9 万 km、支線を含めると約 40 万 km にもなり、水路の機能低下による水路網の断線は確実に避けなければならない。また、水路の主要な建設材料はコンクリートであり、時間の経過とともに徐々に劣化が進行することから機能の低下を引き起こしている。

我が国の農業用排水路は、高度経済成長期から建設され続け、図 1.1 に示すとおり、現在において施工後数十年を経たものが多くなっている。農業基盤情報基礎調査（平成 29 年時点）による推計 [2] を図 1.2 に示すが、近年、標準耐用年数を超過している基幹的な水利施設は、再建設費ベースで約 4.6 兆円であり、全体の 25% である。さらに今後 10 年のうちに標準耐用年数を超過する施設を加えると、全体の 40% にまで増加すると言われている。農業水利施設において災害以外の原因による施設機能の損失による突発事故件数は、図 1.3 に示すとおり増加傾向にあり、施設の経年的な劣化及び局所的な劣化が、事故の大半である。また、施設全体の現状が把握できない状況では、施設に不具合が発生する度に対症療法的な事後対策を取るのが精一杯なのが現状である。

標準耐用年数とは、「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60年7月1日60構改C 第690号）」 [3] で示されている施設区分、構造物区分毎の設計時に規定した供用目標年数である。表 1.1 に主要な構造物の標準耐用年数を示す。これは、所得税法及び法人税法の減価償却資産の償却期間を定めるため財務省令で定められたものを基礎として、農林水産省が定めたものであり、税法上の減価償却期間を規定するものであることから、耐用年数の検討の目安として活用できる。しかしながら、必ずしも供用できなくなるまでの標準的期間でない。本来であれば、施設の重要度等に応じて、要求性能と設計耐用年数（設計時において施設がその目的とする機能を十分果たさなければならないと想定した期間）を設定して設計を実施すべきである。設計耐用年数を設定するためには、劣化メカニズムの解析や調査データなどから劣化予測を行い、施設の劣化期間を把握する必要がある。しかしながら、現時点では劣化期間を把握することが難しいことから、当面設計耐用年数は標準耐用年数を準用して設定している。

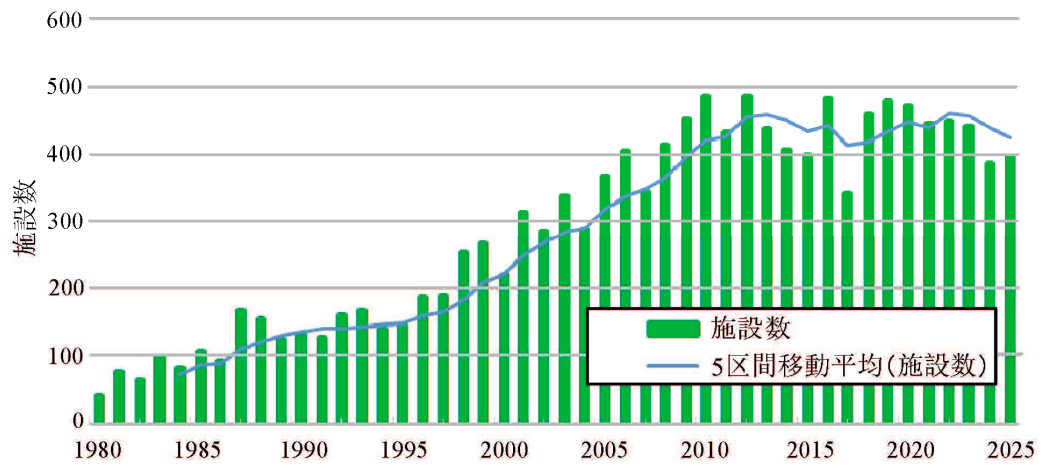


図 1.1 標準耐用年数を迎える基幹的農業水利施設数 [2]

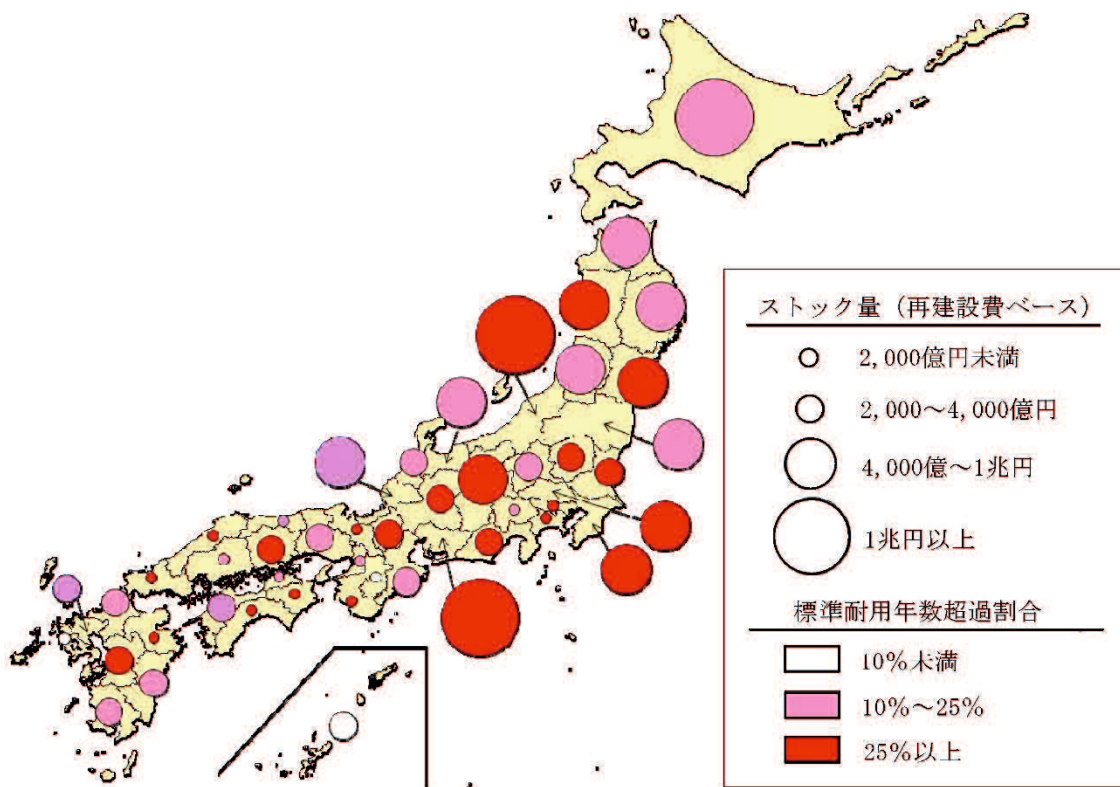


図 1.2 基幹的農業水利施設の老朽化の状況 [2]

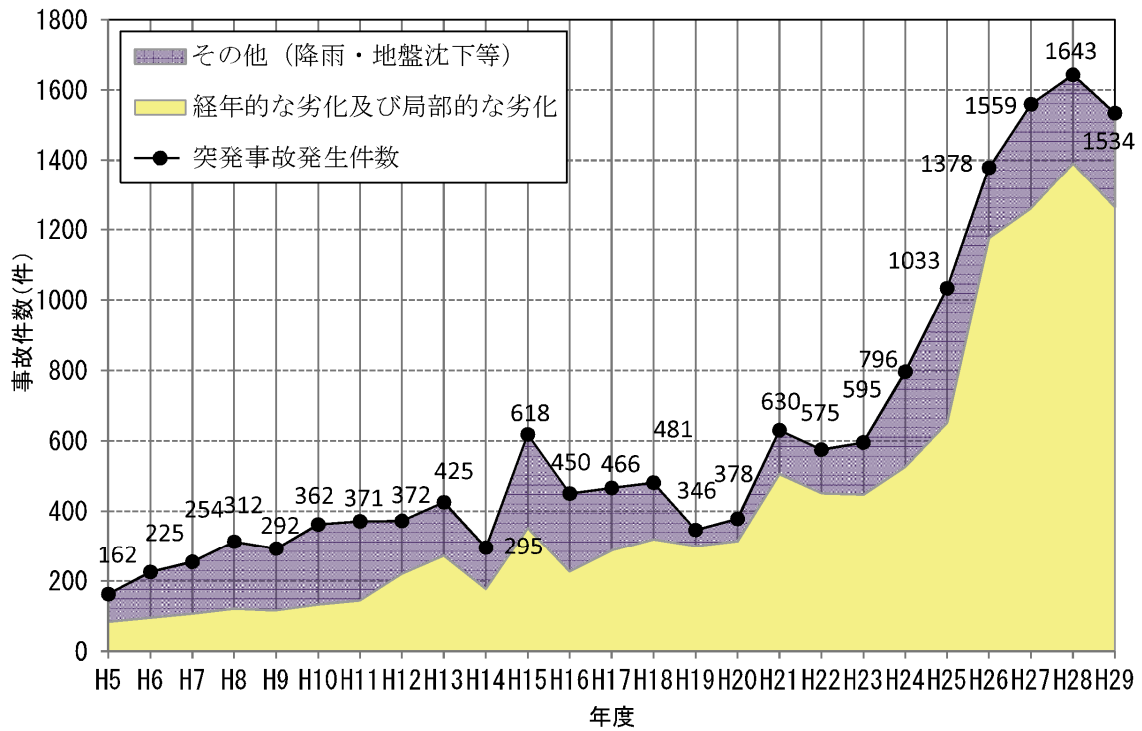


図1.3 突発事故の発生状況 [2]

表1.1 標準耐用年数（抜粋） [3]

施設区分	構造物区分	標準耐用年数	
頭首工	コンクリート	50	
	石積	40	
水門	鋼	30	
水路	鉄筋コンクリート・コンクリートブロック	40	
	コンクリート二次製品・管路・矢板	20～40	
	用排水路	練石積	30
		空石積	20
		土水路	10～20
		隧道	巻立
	素堀		40
	水路橋	鉄筋コンクリート・鉄骨	50
	暗渠	鉄筋コンクリート	50
	サイフォン	鉄筋コンクリート・管路	50



農林水産省では、施設の機能がどのように低下していくのか、どのタイミングで、どのような対策を取れば効率的に長寿命化を図ることができるのかを検討し、施設の機能保全を効率的に実施することを通じて、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取り組みが行われている。

具体的には、①施設の性能評価を行い、劣化の見通しを立て、老朽化のリスクを評価する。②農業水利施設は複合施設であり、延長も長く、箇所毎に劣化程度が異なるため、それぞれの劣化状態に応じた適時対応を考える。③予防保全を含んだ様々な機能保全対策を想定し、コスト比較によって適切な対策を選択的に実施する。④平均的な管理マニュアル対応から、個別施設毎の対応に変える。等である。

これまでは、標準耐用年数を念頭において、損傷した部分が増加した時点で地区全体を更新していた事後保全対策から、施設全体の現状を把握並びに評価し、中長期的な施設の状態を予測しながら、施設の劣化とリスクに応じた対策（時期・工法）を選定し、計画的に対策を講じる予防保全対策を主体とするストックマネジメントへの変革が求められている。つまり、ストックマネジメントを活用して更新時期を延伸するとともに、維持管理費や将来の更新費用を考慮したライフサイクルコストを低減することが重要となる。

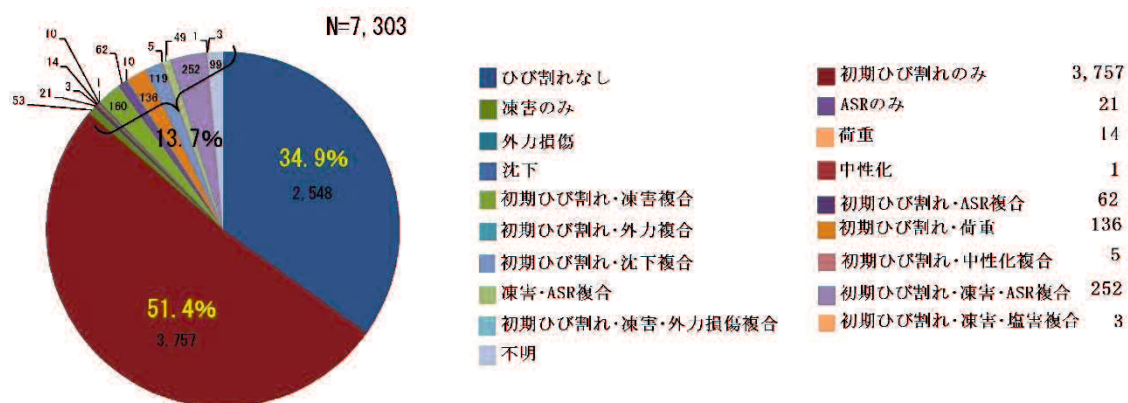
### 1.1.2 コンクリート開水路に発生する変状

コンクリート開水路の変状は、初期欠陥、劣化、損傷に区分される。初期欠陥とは、乾燥収縮によるひび割れ、温度ひび割れ（施工中に発生したひび割れ）、豆板、コールドジョイント、かぶり不足（鉄筋露出）等、主として不適切な施工に起因する変状である。劣化とは、摩耗、凍害、アルカリシリカ反応、化学的侵食、中性化、塩害等があり、進行性を有することが特徴的である。損傷とは、偶発的な外力（地震等）、過荷重や不同沈下等水路の使用環境の変化によって生じるものである。これは、初期欠陥と同様に鉄筋腐食等の劣化を進める原因となる。

また、変状の要因は、内的要因である材料・設計・施工の要因と外的要因である環境の要因に大別される。内的要因とは、①セメント、骨材、混和材等に起因するもの、②配合、仕上げ、かぶり、目地構造等の設計に起因するもの、③不適切な運搬、打ち込み、締固め、不適切な型枠配置による鉄筋の移動、かぶり不足及び仕上げ、養生不足、継目不足等施工に起因するもの、④施工年代により設計基準、セメント等の品質、施工方法が異なることに起因するもの、に分類される。外的要因とは、①気温、湿度、水分、日射量等自然条件に起因するもの、②海からの飛来塩分や凍害防止散布の影響等地域性に起因するもの、③地震や衝突等偶発的な外力に起因するもの、④過荷重や不同沈下等の使用環境の変化に起因するものに分類される。

(1) コンクリート開水路のひび割れの発生要因

ひび割れの発生要因の割合と初期ひび割れの内訳を図 1.4 に示す。コンクリート開水路に発生するひび割れは、初期ひび割れの発生割合が多く、乾燥収縮ひび割れが最も多い結果である。不明とは、施設の状態評価、写真、展開図や設計・施工条件や使用環境条件では判断できない場合である。



※平成25年度関東農政局調べ

初期ひび割れ種別	データ数	割合
温度ひび割れ	69	1.8%
乾燥収縮ひび割れ	3,614	96.2%
温度+乾燥収縮	17	0.5%
その他	50	1.3%
不明	8	0.2%
合計	3,757	100.0%

※「その他」は不適切な打継によるひび割れ等によるもの  
 ※平成25年度関東農政局調べ

図 1.4 ひび割れ発生要因の割合と初期ひび割れの内訳 [4]

(2) コンクリート開水路の初期ひび割れ幅の分布状況

コンクリート開水路に発生する初期ひび割れの最大幅は、図 1.5 に示すとおりバラツキはあるが、 $0.1\text{mm} \leq \text{ひび割れ幅}(w) < 0.3\text{mm}$  が最も多く、全体の 4 割程度となっている。初期ひび割れは、一般的に非進行性といわれているが、ひび割れ幅が  $1.0\text{mm}$  以上の鉄筋腐食に影響を及ぼす恐れのあるひび割れも少なからず発生している。さらに、ひび割れ幅が  $1.0\text{mm}$  以下であってもひび割れが貫通している場合は、水密性の低下だけでなく、そのひび割れから水分や二酸化炭素等の劣化因子が侵入し、鉄筋の腐食や関連する劣化の進行促進に繋がる恐れもあるため注意する必要がある。

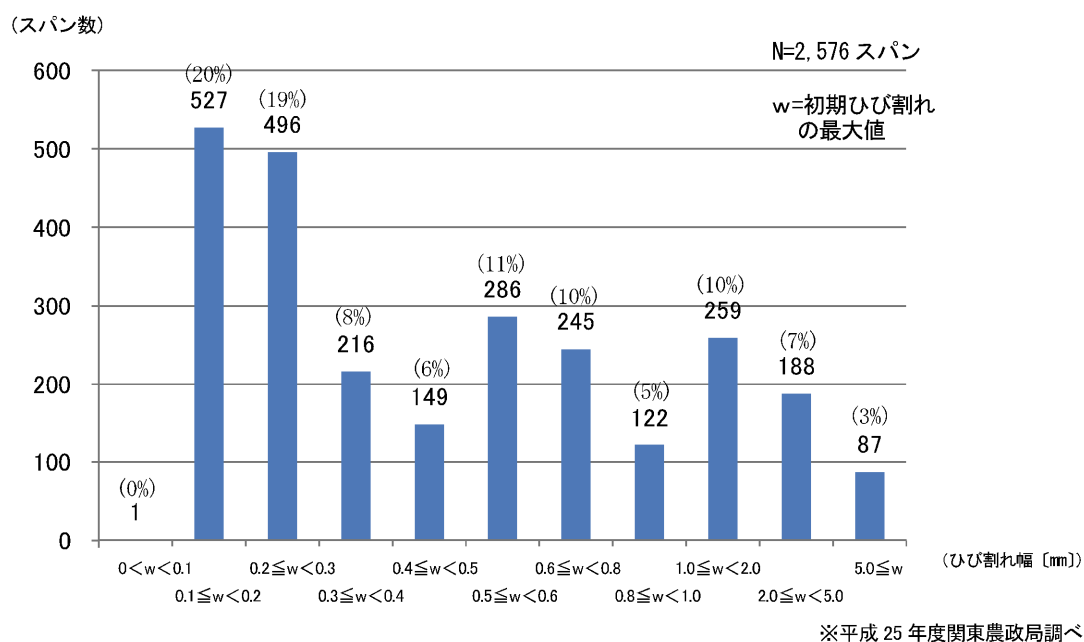
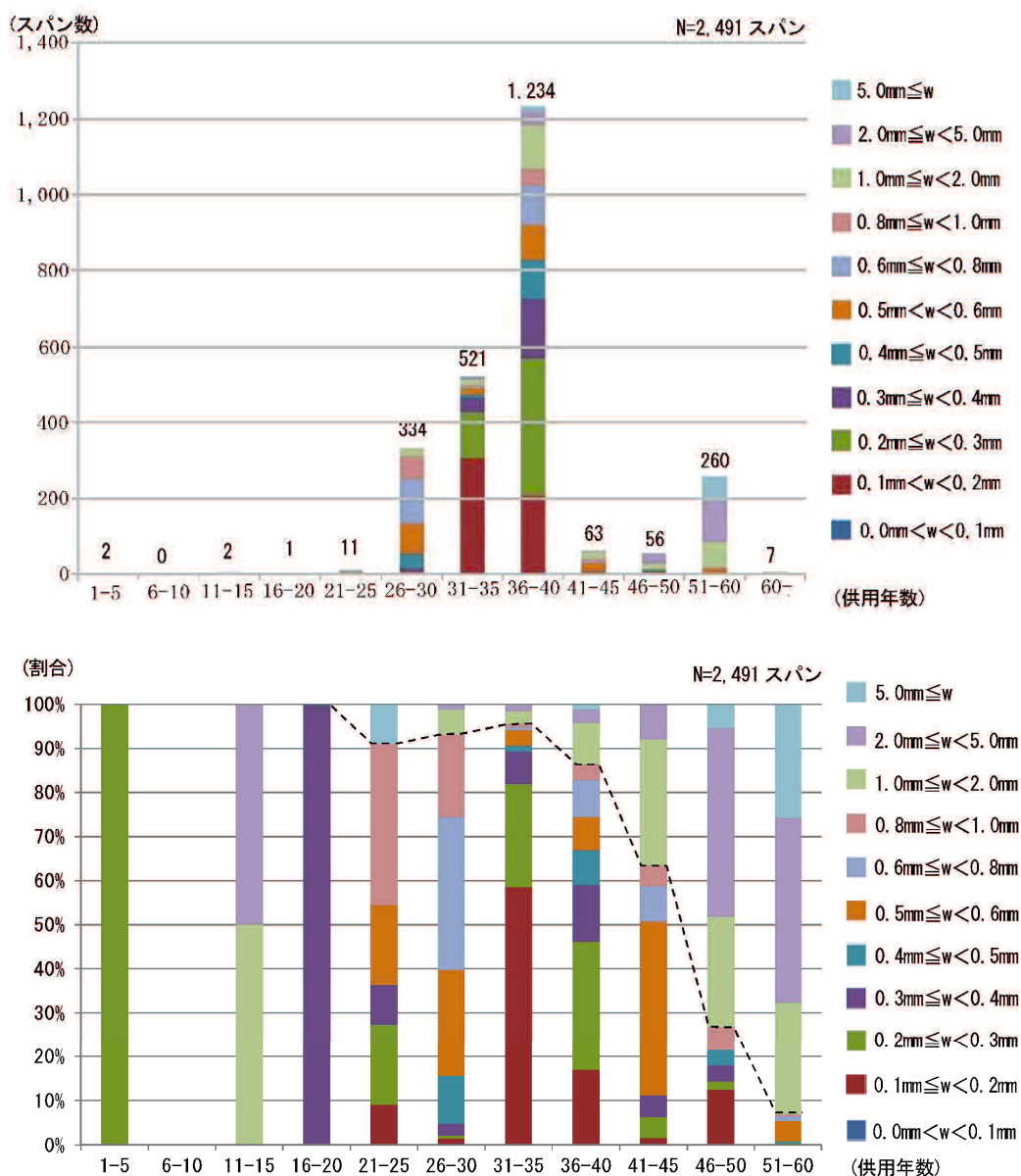


図 1.5 コンクリート開水路における初期ひび割れの最大幅 [4]

### (3) 初期ひび割れと供用年数の関係

初期ひび割れと供用年数の関係は、供用年数が長い施設ほど、ひび割れ幅が大きい傾向を示している。コンクリート開水路の供用年数とひび割れとの関係を図 1.6 に示すが、初期ひび割れに劣化因子が侵入することで経年的にひび割れ幅が拡大したものと考えられる。そのため、コンクリート開水路の内面から目視観察できる初期ひび割れについては、経過観察を行い、状況に応じて対策を講じる必要がある。ただし、コンクリート開水路の外面にひび割れが発生している場合は、現状では、確認できる診断手法がないため、対策を講じることができない。



※図中の波線は1mm未満のひび割れが占める割合を示す。  
 ※平成25年度関東農政局調べ

図 1.6 コンクリート開水路における初期ひび割れと供用年数の関係 [4]

#### (4) コンクリート開水路の変状実態

コンクリート開水路の変状実態やその発生要因の特徴を把握するため、国営造成水利施設のコンクリート開水路を対象に実施された長寿命化対策工事（更新事業）及び国営造成水利施設保全対策指導事業における機能診断調査結果のうち、変状が確認されたデータを用いて、変状の発生状況や要因の特徴について分析を行った結果を以下に示す。その対象地区位置図及び全体サンプル数を図1.7に示す。

図1.8に示す平成19～23年に実施された国営造成水利施設保全対策指導事業における機能診断調査結果によると、コンクリート開水路に発生する変状は、摩耗や目地の損傷が多く、ひび割れは3割程度という結果であった。欠損・損傷や強度低下は1割程度であり、変形・歪みは不同沈下や地盤変動と同程度である3～5%程度発生している結果であった。

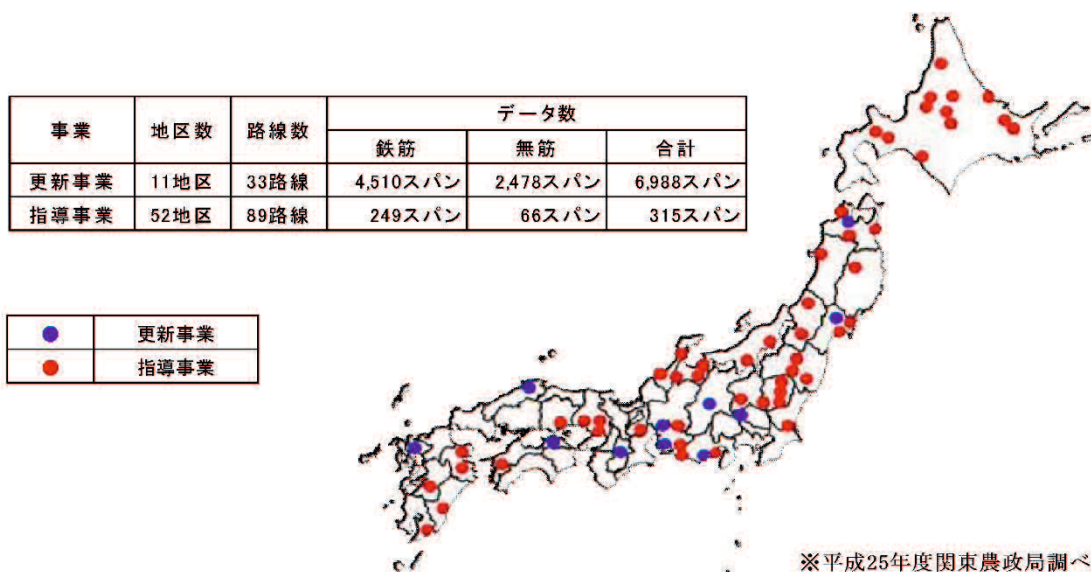


図1.7 対象地区の位置図 [4]

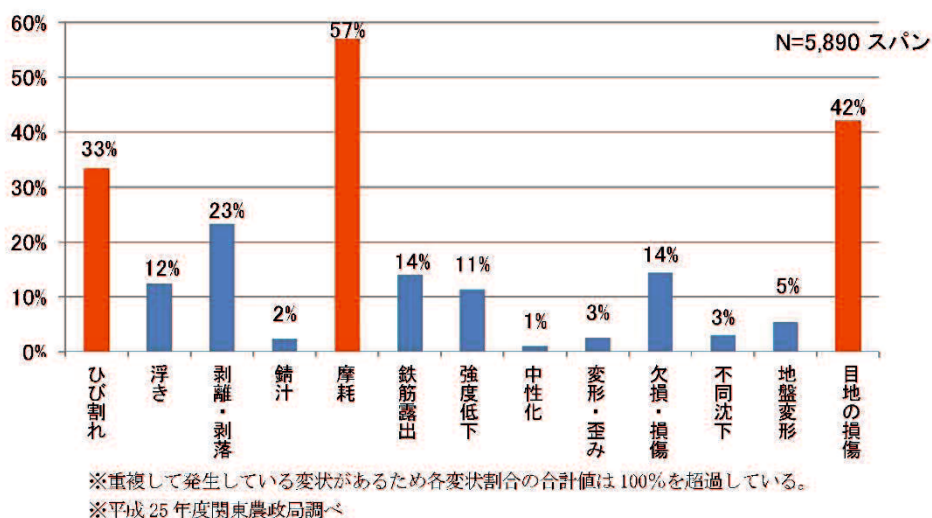


図1.8 指導事業におけるコンクリート開水路の変状発生割合 [4]

コンクリート開水路に発生する損傷とは、流木や転石等の衝突や地震等の偶発的な外力、地下水や圧密沈下等基礎地盤の変化によって生じるひび割れや不同沈下等の変状である。損傷は、その原因となる外力等を取り除けば、その後の進行はない。しかし、コンクリート開水路が敷設された環境によっては、当初の設計以上の外力（活荷重等）が作用する事例等、外力を取り除くことができない場合や、損傷により発生したひび割れから劣化因子である水分や二酸化炭素や塩化物イオン等が侵入することで劣化を助長し、施設の耐久性を低下させる場合も想定される。

外力によるひび割れの多くは、曲げひび割れと不同沈下によるひび割れである。曲げひび割れは、作用する荷重により生じる曲げモーメントを原因として発生する。開水路内が空虚時の場合は、図 1.9 に示すとおり、外側を引張とする向きの最大曲げモーメントが生じることから、ひび割れは側壁の外側下部及び底版外側両端に水路軸方向にある程度の長さを持って発生する。また、開水路内が満水時の場合は、図 1.10 に示すとおり、内側を引張とする向きの最大曲げモーメントが生じることから、ひび割れは、側壁及び底版の内側に発生する。

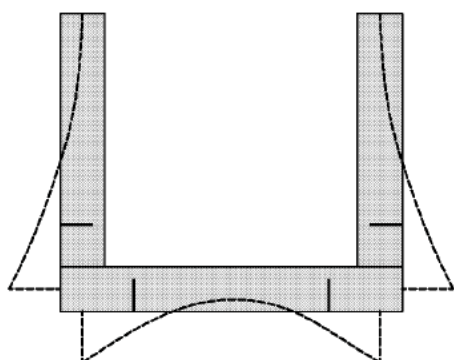


図 1.9 開水路内空虚時の曲げひび割れ曲げモーメント図 [4]

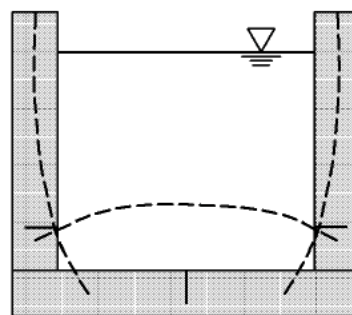


図 1.10 開水路内満水時の曲げひび割れ曲げモーメント図 [4]

不同沈下によるひび割れは、偏荷重が部材に作用して曲げモーメントやせん断力が生じる場合や沈下が四方において大きく異なる場合のねじれにより発生する。典型的な発生パターンとしては、図 1.11 に示すとおり、①底版から側壁にわたり発生、②沈下量が大きい側の側壁ではせん断力を主要因とする大きく傾斜したひび割れが発生、③沈下量が小さい側の側壁では、曲げモーメントを主要因とする少し傾斜したひび割れが発生、④底版では、ねじれを主要因とする底版のほぼ対角を結ぶようなひび割れが発生する。

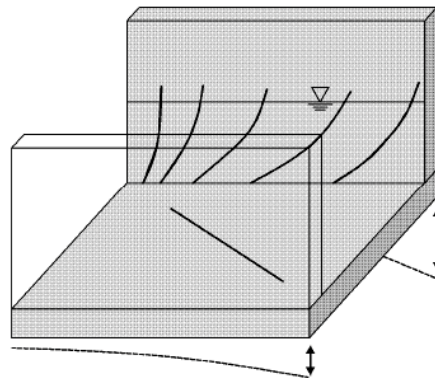


図 1.11 不同沈下におけるひび割れのイメージ [4]

### 1.1.3 農業用排水路の診断方法の現状

#### (1) 水利用性能及び水理性能の診断

水路の構造性能の低下は、漏水の発生、粗度係数の低下、有効断面の減少等による通水性能の低下など、水利用性能及び水理性能の低下としてマクロ的に顕在化することも多い。水利システムを俯瞰した問診等により水利用性能及び水理性能を把握しておくことは、後の対策工法の検討等のプロセスの効率的な実施にもつながることから、このような問診を行うことは重要である。

水利システムの水利用性能及び水理性能の診断は、構造性能の機能診断手順と大きく変わることなく実施でき、①資料収集や施設管理者からの聴き取りによる事前調査、②巡回目視により概況の把握を行う現地踏査、③近接目視、計測、試験等により定量的な調査を行う現地調査、の3段階で実施することが基本となる。事前調査は、設計図書、管理・事故・補修記録等の文献調査やデータベースの参照、施設管理者からの聴き取り調査等により、施設の重要度評価やリスクの把握に必要な情報を含む機能診断調査に関する基本的情報を効率的に収集し、現地踏査や現地調査等の内容を検討し実施する。現地踏査は、専門的な知見を有する技術者が巡回目視により対象施設を調査することにより、変状が生じている位置や程度等を大まかに把握するとともに、劣化要因の推定を行う。これらを踏まえ、現地調査の単位、定量的な調査項目等を決定しつつ、仮設工の必要性の有無など、現地調査の具体的な実施方法を検討する。現地調査は、事前調査と現地踏査の結果を踏まえ、専門的な知見を有する技術者による近接目視による調査のほか、施設の劣化予測や対策工法検討のために必要な指標について、定量的な調査を実施する。現地調査による調査結果だけでは判定できない特殊な状況にあるなど、特に必要がある場合には、専門家や試験研究機関などによる詳細調査を実施する。

## (2) 構造性能の診断

コンクリート開水路に要求される性能の低下を補修や補強等の長寿命化対策により回復又は向上させるためには、対策の目的に応じて、補修又は補強の材料・工法が有すべき性能を適切に設定して、要求性能を満たす必要がある。「補修」とは主に施設の耐久性を回復又は向上させることであり、「耐久性」とは構造物の性能低下の経時変化に対する抵抗性である。「劣化」とは時間の経過とともに施設の性能低下をもたらす部材や構造の変化である。

「耐久性の回復又は向上」とは、構造物の時間的な性能低下の進行に対する抵抗性を回復又は向上させることであり、性能低下の具体的な指標として表1.2に示すようなひび割れ、材料劣化、変形・歪み、目地の劣化、地盤変形などの診断結果から評価することができる。「耐久性の回復又は向上」つまり「補修」は、劣化の進行に対する抵抗性を回復又は向上させる、すなわち劣化の進行を遅らせることと言い換えることができる。一方、「補強」とは主に施設の構造的耐力を回復又は向上させることであり、必ずしも耐久性の回復又は向上を伴うものではない。農林水産省は「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】」[5]や全国土地改良事業団体連合会は「簡易な水路補修の手引き」[6]などのマニュアルを整備してきたが、これらのマニュアルでは、開水路における耐久性の評価や回復・向上に関する内容が主であり、現時点において、構造的耐力に関する技術的な知見が十分得られていない、つまり現段階では、補強に関する技術は農業用排水路における施工実績が少なく、一般化できるような段階になっていないことから、構造物の安全性や剛性の評価及び回復に関しては十分な記述がなされていない。農業水利施設には、規模の小さなものも多く存在し、橋梁、道路トンネルなどの土木構造物と比較して事故等に対する安全性や信頼性などの社会的機能が強く求められないものも多い。このことは耐力が低下した構造物に対して改築工事を実施することが比較的容易であり、補強による対策事例が少ないことにも繋がっているためであるとも考えられる。社会的機能の低下とは、①突発事故の増加、②かぶりコンクリート剥落による第三者被害の増加の可能性が高くなること、③対策費用の増加、④施設の汚れや変化による錆汁、ひび割れ等の発生に伴う景観や美観、親水性が悪化すること等を意味している。社会的機能の低下の影響については、施設の劣化等により、施設の崩壊や突発事故が起こった場合の周辺施設への社会的被害のリスクを勘案し、住宅や道路等の公共施設の立地条件といった要素を考慮する必要がある。また、施設周辺環境の変化等による耐震化対策についても考慮する必要がある。しかし、前述のとおり、今後、耐用年数を超過した農業水利施設は増加傾向にあるため、社会的機能の低下にある突発事故が増加することは想定される。また、周辺環境の変化や設置条件により、改築できない箇所も存在すると考えられる。そのため、現状の耐久性を向上させる補修だけでは対応できない事例も増加し、コンクリート開水路の構造的耐力を回復又は向上させると補強のニーズも増加することが想定される。補修と補強を選定する上でも、現状のコンクリート開水路の構造安全性を適切に診断することが求められるが、現状では、判別できる診断方法が無いのが現状である。



表1.2 構造機能に関する標準的な現地調査項目（抜粋）の例 [1]

性能	区分	調査項目	調査手法
力学的 安全性	ひび割れ	最大幅	定量計測（クラックスケール）
		延長	定量計測（スケール）
		ひび割れタイプ	タイプ判別
	変形・歪み量	変形・歪み量	目視による有無 簡易計測（下げ振り，傾斜計等）
	圧縮強度 （反発硬度）	圧縮強度（反発硬度）	簡易計測（リバウンドハンマー等）
耐久性	材料劣化	浮き	目視による有無・打音試験
		剥離・剥落	目視による有無・簡易計測（デプスゲージ等）
		析出物	目視による有無
		変色	目視による有無
		摩耗	目視による有無
		漏水	目視による有無
	鉄筋露出	目視による有無	
	中性化	中性化深さ	ドリル法
鉄筋かぶり		定量計測（鉄筋探査）	
安定性	地盤変形	背面土の空洞化	目視による有無・打音試験
		不同沈下	目視による有無 簡易計測（スケール等）
上含 記む 性構 能造 を性 能	目地の劣化	目地の開き	目視による有無・簡易計測（スケール等）
		段差	目視による有無・簡易計測（スケール等）
		止水板の破断	目視による有無
		漏水（痕跡）	目視による有無
		周縁コンクリートの欠損等	目視による有無・簡易計測（スケール等）

## 1.2 構造安全性に関する既往の研究

既往のコンクリート開水路の構造安全性評価手法に関する研究成果を調べるために、2019年3月に国立研究開発法人科学技術推進機構の科学技術情報発信・流通総合システム(J-STAGE)を使い、「コンクリート開水路の構造安全性」や「コンクリート開水路の耐力評価手法」をキーワードとして検索したが、該当するものはなかった。また、インターネットウェブ検索においても、研究論文等は見あたらなかった。

そこで、本研究では、既往の農業用水利施設の機能診断に関連すると考えられる①～③の研究に関する既往の成果を整理することとした。

- ①管水路を対象とした耐力評価手法に関する研究
- ②コンクリート内部の欠陥探査に関する研究
- ③コンクリート開水路の断面欠損による性能検証に関する研究

以下に既往の研究の主な成果の概要を述べる。

### 1.2.1 農業用管水路を対象とした耐力評価手法に関する研究

コンクリート開水路の構造安全性評価手法を開発するためには、開水路内面に発生するひび割れだけでなく、開水路外面に発生するひび割れも検知する必要がある。農業用管水路についても同様であり、管体の健全性を評価できる手法の開発が求められている。その主な成果の例としては、兵頭ら[6, 7]は、管水路の新たな耐力評価手法として内面載荷法を提案している。内面載荷法とは、内面載荷装置により管内面から一方向に載荷し、管体を変形させる手法である。管の上下方向に載荷した場合は、左右方向の直径が縮小し、左右方向に載荷した場合は、上下方向の直径が縮小するものである。本手法をとう性管である塩ビ管と不とう性管である鉄筋コンクリート管について、健全管とひび割れを付与した管の荷重と変形量の傾きを確認した結果、傾きに違いが生じることを明らかにしており、この傾きを管が有する耐力の評価指標として用いることを提案している。また、弾性領域内の評価であれば、特に材質の影響を受けないことを明らかにしている。また、ひび割れについては、内面だけでなく、外面に発生させた場合についても本手法にて適用できることを明らかにしている。

有吉ら[8, 9]は、埋設管の破壊限界に対する安全性を定量的に評価する手法として、曲げひずみ推定手法を提案している。曲げひずみ推定手法は、曲がり梁の弾性理論を適用して、曲率半径の変化から曲げひずみを求めるものである。管の一部が曲げモーメントを受けると、曲げひずみが生じるとともに、曲率半径が変化する。この曲率半径の変化を計測して、曲がり梁の弾性理論から導かれる曲率半径と曲げひずみの関係から、曲げひずみを計算するもので、鋼管や強化プラスチック複合管のとう性管について、曲げひずみを推定することができることを明らかにしている。この手法は、曲率測定装置を使用することで、任意の箇所における曲げひずみを推定することができる。特に、管底部に枕木を設置している場合や矢板引き抜きに伴う地盤の緩み等により管が大きく変形する場合は、局所的に変形していることが多く、曲げひずみ推定手法で評価することができるため、管水路の構造安全性評価手法として効果的であることを明らかにしている。

浅野ら [11] は下水道施設として多用されてきた鉄筋コンクリート管の劣化を定量的に評価する手法として、衝撃弾性波法を提案している。衝撃弾性波法とは、管に軽い衝撃を与えることにより対象物体を振動させ、その振動を計測・解析する非破壊検査手法である。土木分野ではこの手法がPCグラウトの充填度評価や構造物の寸法（板厚）計測など多岐にわたり用いられている。下水道用コンクリート管を使用し、本手法による評価を実施した結果、衝撃弾性波法から得られる管厚及び破壊荷重値を用いることで、管の耐荷性能が計算でき埋設状態における安全率が計算可能であることを明らかにしている。また、減肉評価を実施した結果、肉厚と高周波成分比には直線関係が確認されたため、管厚の推定が可能であることを明らかにしている。さらに、埋設状態の管に対して衝撃弾性波法を適用した結果、腐食の程度に従い高周波成分比が変化することを確認している。つまり、安全率の計算結果より、目視で判断し難い定量的評価が可能であることを明らかにしている。

### 1.2.2 コンクリート内部の欠陥探査に関する研究

コンクリート開水路の構造安全性評価手法を開発するためには、水路内面からは確認できないひび割れを検知する必要がある。コンクリートの内部欠陥を探査できる方法としては、衝撃弾性波による方法がある。これは、コンクリート表面を鋼球で打撃すると内部を球面状に伝搬する縦弾性波が発生するもので、コンクリートが健全であれば、縦弾性波が打撃面と底面とを多重反射することによって生成される振動数が測定されるが、内部に欠陥があると、見かけの弾性波の低下による縦弾性波速度の低下、弾性波が欠陥部を迂回することによる伝搬経路の延長、欠陥部で多重反射する縦弾性波の発生、見かけの弾性波の低下による縦弾性波速度の低下が生じる。岩野ら [12, 13] は、衝撃弾性波により、施工後 30 年を経過した建築構造物で欠陥探査を行った結果、厚さ 145mm 付近に存在する内部欠陥と部材表層部の欠陥であるモルタル部の剥離を探査できることを明らかにした。また、本手法により反射波の振動数から反射波速度を求め、コンクリートの厚さを求める理論式に代入した結果、コンクリートの厚さを推定できることも明らかにしている。

### 1.2.3 コンクリート開水路の断面欠損に関する研究

現状の機能診断では、摩耗の進行程度により開水路の補修・補強の可否を判定しているが、摩耗による断面欠損量が同程度の開水路であっても、摩耗が発生する位置や荷重条件、配筋量等によって、摩耗が開水路の構造安全性に与える影響は異なる。開水路の摩耗進行の程度とその構造安全性の関係を評価することができれば、開水路の性能低下に応じたきめ細かい維持管理計画を立案することができ、維持管理コストの低減を図ることができる。そこで、浅野ら [14] は、フルーム開水路を対象とし、摩耗による断面欠損を模擬した単・複鉄筋 RC 梁供試体の曲げ試験を行った結果、次のことが明らかにしている。引張縁を断面欠損させた RC 梁供試体と健全供試体とでは、降伏及び最大荷重に大きな差が生じなかった。つまり、部材の引っ張り縁が摩耗するような開水路側壁では、鉄筋が健全であれば、曲げ強度に与える影響は小さいことを明らかとしている。また、圧縮縁欠損 RC 梁供試体では、単鉄筋断面

及び複鉄筋断面にかかわらず、欠損深さに比例して梁の降伏荷重及び終局荷重は、健全供試体よりも低下することを確認している。

### 1.3 補修・補強工法に関する既往の研究

コンクリート開水路の構造安全性評価手法による診断結果から補修・補強による対策工法が必要になる場合を想定し、補修・補強に関する既往の研究成果を調査した。1.2と同様に2019年3月に国立研究開発法人科学技術推進機構の科学技術情報発信・流通総合システム(J-STAGE)を使い、「補修」や「補強」をキーワードとして検索し、既往の農業用水利施設の補修・補強工法の研究に関連する既往の成果を整理した。以下に既往の研究の主な成果の概要を述べる。

#### 1.3.1 補修・補強工法に関する研究

渡部ら[15]は、コンクリート開水路を対象とした様々な補修・補強工法の試験施工を実施した時の施工時や施工後における問題点と耐久性の検証を行っている。その時に使用した各工法の材料は、表面被覆材貼付系(樹脂製またはコンクリート製のパネル材)、表面被覆材吹付系(ポリウレタン樹脂塗料等)及び断面修復材塗工系(特殊モルタル等)の3つに大別されるものを使用している。品質においては、表面被覆材貼付系は、工場二次製品であるため品質が安定しているが、表面被覆材吹付系と断面修復材塗工系は、現場の施工技術者の技術力に左右される。施工においては、表面被覆材貼付系は、粗度係数を小さくできるため土砂等の滞留を抑制することできる等の特徴を有している。表面被覆材吹付系においては、複雑な形状の箇所での施工が容易であり、断面修復材塗工系は、湿潤状態においても施工は可能である等の特徴を有している。今後、適切な工法を選択するためには、耐久性の判定をするためにも定量的な検証ができる評価手法が必要であると述べている。

奥野ら[16]は、流水により摩耗や乾湿の繰り返しを受けやすいコンクリート開水路において有機系表面被覆材の劣化要因と劣化しやすい部位を確認するために実施工された有機系表面被覆材の表面をマイクロスコープによる観察を行った。その結果、表面被覆材の表面に発生する変状は、水中部よりも直射日光の影響を受けやすい日当たりの良い面の気中部に微細なひび割れと気泡痕が最も発生することを確認した。このことから、直射日光による紫外線が劣化に関与していることを明らかにしている。

佐藤ら[17]は、農業用のコンクリート開水路を補修した後においても、開水路背面からの水分浸透による凍結融解作用が生じる可能性がある。そこで、FRPM板と緩衝材による表面被覆工法において、積雪寒冷地における試験施工により耐久性評価を行うとともに表面被覆の有無によるコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果の検証を行っている。その結果、積雪寒冷地における現地試験施工での目視調査の結果、施工6年後においてFRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法に変状は確認されないことを明らかにしている。また、FRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法によって、コンクリート開水路が受ける凍結融解作用は1/10以下となり、緩衝材は室内試験による凍結融解前と凍結融解500サイクル後の圧縮残留ひずみと大きな差がないことを明らかにしている。

緒方ら [18] は、パネル材に FRPM 板、既設水路とパネル材の中込材としてポーラスコンクリートを使用した更生工法において、ポーラスコンクリートの空隙における飽和と不飽和状態が熱拡散率に及ぼす影響について検証を行っている。その結果、常温時における熱拡散率は、空隙が飽和状態のポーラスコンクリートは、普通コンクリートとほぼ同じになり、空隙が不飽和状態のポーラスコンクリートの熱拡散率は、飽和状態に比べて大きくなるため、温度が変化しやすいことを明らかにしている。また、常温において飽和状態及び不飽和状態のポーラスコンクリートの熱拡散率は、空隙率との関係に線形的関係があることを明らかにしている。

### 1.3.2 補修・補強工法のひび割れに関する研究

アルカリ骨材反応対策としては、「アルカリ骨材反応被害構造物(土木)の補修・補強指針(案)」があるが、「損傷部位が水中部分及び橋台や取付擁壁のように背後に盛土や埋戻し土が構築されており、常に水が補給されるような構造物には適用しない」と記載されていることから、コンクリート開水路の補修工法として確立されたものはない。そこで、翠川ら [19] は、アルカリ骨材反応によりひび割れが発生したコンクリート開水路について、アルカリ骨材反応によるひび割れを物理的に拘束する材料として、高強度・耐久性に優れた炭素繊維シート被覆工法を選定し、検証を行っている。コンクリート開水路の膨張量試験により膨張率が0.1%を超過する箇所もあったが、アルカリ骨材反応により亀甲状のひび割れとなる箇所については、一層で縦・横方向の強度を持つ2方向織りの炭素繊維シートを使用することによりひび割れを物理的に拘束することができることを明らかにしている。

長谷川ら [20] は、コンクリート開水路におけるひび割れ幅の変動を確認した結果、無筋水路におけるひび割れ幅の季別の日移動量は、RC 水路における季別の日移動量よりも大きいことを確認した。また、耐アルカリガラス繊維ネットを用いた表面被覆工法は、鉄筋と同様のひび割れ幅を拘束する効果を付与することができ、補修材表面に生じたひび割れ幅をコンクリート開水路の機能に対して有害でない程度に抑制することができることを明らかにしている。また、表面被覆材の表面に発生するひび割れを抑制することができる材料を使用することで、温度変化により発生するひび割れ及びその変動に対する補修効果が継続できることを確認している。

## 1.4 本研究の目的

農業用排水路では、標準耐用年数を迎える施設が、急激に増加することが予想されている。そのため、適切な機能保全を図ることができる体制の整備が求められている。従来の全面的な改築から、機能の監視・診断等によるリスク管理を行いつつ劣化の状況に応じた補修・補強等を計画的に行うことにより、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理の推進が必要とされている。戦略的な保全管理の推進のためには、ストックマネジメントのプロセスの中で、適切な補修・補強工事により施設の機能を回復、又は性能を回復・向上することが重要である。補修・補強工事は、工法の概要、農業水利施設への適用性、要求性能及びその照手法と品質規格値などを理解した上で、

適切な施工及び施工管理のもとで実施されることが求められる。計画や設計の段階における対策工法の選定では、現場条件に応じた様々な対策による検討が必要である。

現在、開水路における機能保全対策は、表面被覆工法のような補修工法に関する技術開発が進められている。様々な機能保全対策の中から適切な対策を選択、並びに実施するためには、開水路の構造的な現有耐力を正確に評価し、現状を把握することが重要である。現有耐力を評価する手法として、開水路では、既往の研究成果は見受けられなかったが、管水路では、内面載荷法や衝撃弾性波法等の研究・開発が数多く進められている。しかし、多様な管種や埋設条件等に対応できる耐力を評価できる手法は、確立されていない。その中で管水路の内面から荷重を載荷した時の変形量を計測する内面載荷法は、不とう性管である RC 管についても検討を進めていることから、開水路の構造安全性を評価する研究を進めるには、参考になると考える。

今後、老朽化した開水路に対して補強による対策が必要な場合には、開水路自体の構造安全性を評価する必要があるが、研究について着手されていない状況にある。そこで、本研究の最終目標は、適時適切な機能保全を実施するためにも、「コンクリート開水路の構造安全性を評価する診断手法」を確立することである。そのためには、室内や埋設状況における評価試験を繰返し実施する必要があり、効果的で経済的な診断手法を提案するためには、実開水路での評価試験を実施することで診断方法の妥当性を確認する必要があると考える。本研究では、その最終目標に近づくために、以下の項目を目標として設定し、研究を行った。

- ① 対象とする開水路を選定し、開水路の構造安全性を評価するために求められる要求事項を整理する。
- ② ①の方法により、室内での健全な開水路における荷重と変形量の関係を明らかにし、照査手法を整理する。
- ③ ①の方法により、室内において、実開水路で見られるひび割れ状況を再現した開水路における荷重と変形量の関係を明らかにし、照査手法を整理する。
- ④ ①の方法により、埋設した開水路状況及び実開水路における荷重と変形量の関係を明らかにし、照査手法を整理する。
- ⑤ ②、③、④の結果を踏まえ、開水路の構造安全性を評価することができる照査手法を提案する。
- ⑥ 照査結果から、異常と判定された開水路についてパネル工法による更生工法により対策を講じる場合の注意事項について整理する。

## 1.5 本論文の構成

本論文は、次の8章から構成されており、各章の関係は図1.12に示すとおりである。

第1章 序論

第2章 コンクリート開水路の構造安全性評価試験装置の開発

第3章 コンクリート二次製品を対象とした構造安全性評価

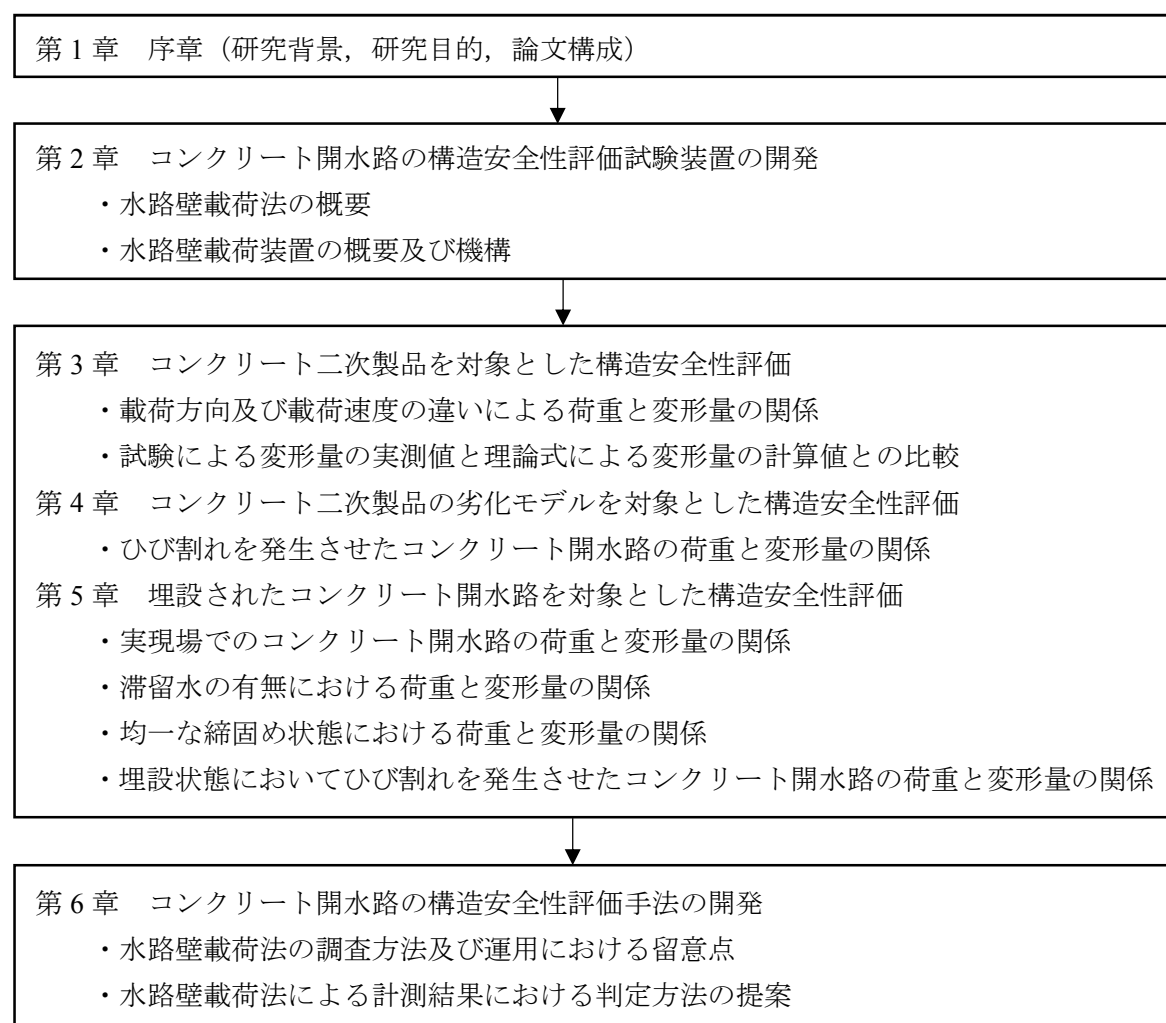
第4章 コンクリート二次製品の劣化モデルを対象とした構造安全性評価

第5章 埋設されたコンクリート開水路を対象とした構造安全性評価

第6章 コンクリート開水路の構造安全性評価手法の開発

第7章 コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法のアンカーに作用する引抜荷重の評価

第8章 結論



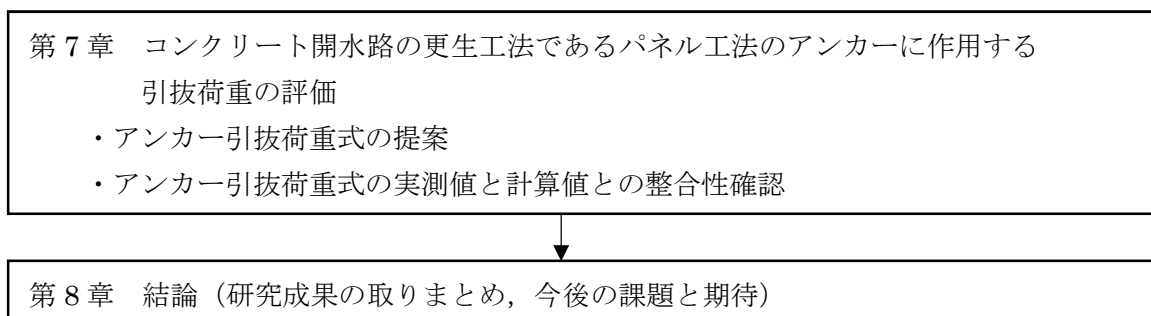


図 1.12 本論文の各章の関係

各章の主な内容を以下に示す。

#### 第1章 序論

本研究の背景について述べ、既往の研究成果を踏まえたうえで関連する研究を整理し、本研究の目的を示した。

#### 第2章 コンクリート開水路の構造安全性評価装置の開発

コンクリート開水路の機能診断は、水路の内面から目視等によるひび割れ、鉄筋の錆、摩耗状況等を調査し、その状況から健全度ランクを設定している。ただし、従来の機能診断では、開水路の背面状況を確認することができないため、背面に発生したひび割れによっては、健全度ランクを見直す必要性が生じる。そこで、開水路の構造安全性を評価できる方法として、新たに水路壁載荷装置を開発し、その装置にてコンクリート開水路の側壁部における荷重と変形量の関係を検証する水路壁載荷法を提案した。

#### 第3章 コンクリート二次製品を対象とした構造安全性評価

コンクリート二次製品について水路壁載荷法を適用した結果、載荷方向の違い及び載荷速度の違いについて荷重と変形量の関係は同じ挙動であることを確認した。また、試験結果から得られた変形量と理論式における変形量を比較し、理論式から変形量を推定できることを確認した。

#### 第4章 コンクリート二次製品の劣化モデルを対象とした構造安全性評価

底版部に水路長手方向のひび割れを発生させたモデルと側壁部に水路縦断方向の貫通ひび割れを発生させたモデルのコンクリート二次製品を作製し、水路壁載荷法により荷重と変形量の関係を確認した結果、底版部にひび割れを発生させたモデルは、健全なものと同様に違いが生じることを確認し、貫通ひび割れを発生させたモデルは、健全なものと同様に違いが生じないことを確認した。



## 第5章 埋設されたコンクリート開水路を対象とした構造安全性評価

埋戻し土による締固めが一定ではない埋設環境下におけるコンクリート開水路について、供用中及び落水後における荷重と変形量の関係を確認した結果、荷重方向や滞留水の有無に関係なく、傾きは同等であることを確認した。

次に、埋戻し土を一定条件で締固めたコンクリート開水路について、埋設期間の違いが荷重と変形量の関係に与える影響を確認した結果、埋戻し土の締固めが進行することにより、1割～2割程度ではあるが変形し難くなることを確認した。また、コンクリート開水路の底板部にひび割れを発生させた場合の荷重と変形量の関係は、地上での結果と同様に大きな差が生じることを確認した。

## 第6章 コンクリート開水路の構造安全性評価手法の開発

第3章から第5章により得られたデータから、コンクリート開水路の構造的な安全性を判定する方法を提案した。また、水路壁載荷装置の手順及び運用上の留意点についてまとめた。

## 第7章 コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法のアンカーに作用する引抜荷重の評価

水路壁載荷法により異常が確認された開水路については、更生工法により対策を講じる必要がある。対策工法には、無機系又は有機系材料による被覆工法、シート工法並びにパネル工法等がある。農林水産省から発行されているマニュアルには、各工法について施工時及び施工後に対する要求性能が記載されており、既設水路との付着性については、無機系又は有機系による被覆工法は、建研式による評価、パネル工法は、アンカー引抜荷重による評価を実施することになっている。特に、パネル工法は、既設水路とパネル材の隙間にグラウト材を充填した時に発生する圧力が、パネル材を介してアンカーに作用するが、底板と側板に固定したアンカーに作用する引抜荷重については整理されていない。そこで、底板と側板に作用するアンカー引抜荷重の計算式を提案し、実測値と評価することで計算式の妥当性を明らかにした。

## 第8章 結論

本研究から得られた知見から開水路における構造安全性の判定方法を示すと共に、残された課題と今後の研究への期待を述べた。

## 第1章の参考文献

- [1] 農林水産省：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」，2016
- [2] 農林水産省：農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について
- [3] 農林水産省農村振興局：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，2003
- [4] 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き，2015
- [5] 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】，2015
- [6] 全国土地改良事業団体連合会：簡易な水路補修の手引き，2010
- [7] 兵頭正浩，石井将幸，佃亮平，緒方英彦，野中資博：埋設管の現有耐力評価手法としての内面載荷法の提案，農業農村工学会論文集 No.300 (83-6)，pp.I\_215-I\_220，2015
- [8] 兵頭正浩，緒方英彦，石井将幸：埋設管の耐力評価手法としての内面載荷法の提案，農業農村工学会論文集 No.304 (85-1)，pp.I\_1-I\_6，2017
- [9] 有吉充，毛利栄征，掘俊和，松島健一，上野和広：埋設パイプラインの安全性照査のための曲げひずみ推定手法，農業農村工学会論文集，第286 (83-3)，pp.67-75，2015.6
- [10] 有吉充，毛利栄征，裕昌也，久保田健蔵：曲げひずみ推定手法の強化プラスチック複合管への適用性の検証，農業農村工学会論文集，No.303 (84-3)，pp. I\_381- I\_389，2016
- [11] 浅野雅則，鎌田敏郎，熊本宏次，井藤元暢：衝撃弾性波法による鉄筋コンクリート管の耐荷性能の非破壊評価方法に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1753-1758，2013
- [12] 岩野聡史，極檀邦夫，堺友昭：衝撃弾性波によるコンクリート内部欠陥探査，コンクリート工学会年次論文集，Vol.24，No.1，pp.1521-1526，2002
- [13] 岩野聡史，極檀邦夫，堺友昭，森濱和正：衝撃弾性波によるコンクリート構造物の厚さ測定，コンクリート工学会年次論文集，Vol.23，No.1，pp.547-552，2001
- [14] 浅野勇，渡嘉敷勝，森充広，川上昭彦，川邊翔平：断面欠損させたRC梁の曲げ変形挙動，農業農村工学会論文集，No.297 (83-3)，pp. I\_83- I\_90，2015
- [15] 渡部昭彦：開水路の補修・補強に係る新工法の評価，農業土木学会誌，73巻11号，pp.1032-1033，2005
- [16] 奥野倫太郎，森充弘，渡嘉敷勝，森丈久：コンクリート開水路に施工された有機系表面被覆材の劣化特性，農業農村工学会論文集，No.274，pp.9-16，2011
- [17] 佐藤智，石神暁郎，金田敏和：FRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法の寒冷地での耐久性及びコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果，コンクリート工学年次論文集，vol.35，No.1，pp.1675-1680，2013
- [18] 緒方英彦，兵頭正浩，小林哲夫，竹津ひとみ：ポーラスコンクリートにおける空隙の飽和・不飽和状態が熱拡散に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，69巻1号，pp.243-250，2015

- [19] 翠川恒雄, 笹繁生, 鶴田修, 工藤正憲 : 香川用水の水路構造物の補修方法, 農業土木学会誌, 69巻5号, pp.471-475, 2001
- [20] 長谷川雄基, 杉山基美, 佐藤周之, 野中資博 : 農業用コンクリート開水路におけるひび割れの挙動と補修材料のひび割れ拘束効果の研究, 農業農村工学会論文集, No.280, pp.29-36, 2012

## 第2章 コンクリート開水路の構造安全性評価装置の開発

### 2.1 概要

本章では、コンクリート開水路の新たな耐力評価手法である水路壁載荷法に関する基礎的な研究を実施した。コンクリート開水路の構造安全性を評価する手法を開発するためには、対象とするコンクリート開水路を選定し、構造安全性を評価するための装置を開発する必要がある。コンクリート開水路は、擁壁型水路、ライニング水路及び無ライニング水路に分類 [1] されているが、本研究において対象とするコンクリート開水路は、水路壁載荷装置により開水路側壁に載荷した時に一体変形する構造であることを考慮し、擁壁型水路の中の側壁と底版を剛結し一体構造とした鉄筋コンクリート製の現場打ちフリューム開水路あるいはプレキャストフリューム開水路とした。

鉄筋コンクリート開水路の変状の要因は、非進行性ひび割れ等の初期欠陥や内部要因によるものが多い材料劣化によるものを対象とした。ここで、外部要因によるものが多い構造劣化の中でも、既に変形が生じている開水路は、水路壁載荷装置を設置し、荷重を負荷させることは困難であると考え、対象から除外した。また、コンクリート中の水分が凍結温度になった時の凍結膨張によって発生する凍害 [2] については、寒冷地特有の変状であるが、開水路の側壁頂部の損傷が大きい事例も見受けられるため、変形が生じている場合と同様の理由から、対象から除外するものとした。

開水路の構造安全性を評価することができる診断手法としては、開水路の側壁に載荷した時に発生する変形量から曲げ剛性を確認することで評価する水路壁載荷法を提案した。水路壁載荷法は、開水路側壁の頂部に設置するものであり、開水路の内面側及び外面側から荷重を負荷できる構造である。水路壁載荷装置は、総重量が 30kg と人力により持ち運ぶことができるものとした。

水路壁載荷装置の載荷方法については、負荷する荷重の微調整が容易であり、荷重の保持力に優れる手動のねじ締め付け式を採用した。変位計については、荷重を載荷させた時に装置に発生する歪みを計測しないよう、装置に組み込む構造ではなく、装置と分離するものとした。

## 2.2 対象水路の選定

開水路は、農業用水及び農用地等の排水の流送を主目的として設置する水路組織の中で自由水面を持つ通水施設の1つであり、その構造材料や安定性から「鉄筋コンクリート開水路」、「無筋コンクリート開水路」、「その他開水路」に大別され、形式ごとに特徴的な変状を示すことに留意する必要がある。開水路は、図2.1に示すように、構造材料や安定性から、擁壁型水路、ライニング水路及び無ライニング水路に大別されている。擁壁型水路のうちフリームや鉄筋コンクリート二次製品水路といった鉄筋コンクリート構造の水路は「鉄筋コンクリート開水路」、無筋コンクリートを構造材料とするコンクリート擁壁水路は「無筋コンクリート開水路」、それ以外の擁壁型水路、ライニング水路及び無ライニング水路は「その他開水路」とする水路形式に分類される。

擁壁型水路とは、側壁に作用する土圧と内水圧が擁壁としての側壁により支持される形式の開水路である。フリーム、コンクリート擁壁水路、コンクリートブロック積水路、鉄筋コンクリート二次製品水路等が属する [1]。「鉄筋コンクリート開水路」の代表であるフリーム（鉄筋コンクリート構造物）は、水路側壁と底版が構造的に一体となって土圧、水圧等の荷重を支持する形式の水路である。一方、鉄筋コンクリート二次製品水路の代表であるプレキャストコンクリートフリームは、規定の設計諸元に基づき、工場等で製造された単体、又は工場製品部材をコンクリート材料等で接合するか、あるいは組み合わせたものである。表2.1に、農業水利施設として利用頻度の高い主な鉄筋コンクリート二次製品水路を示す。

ライニング水路における構造物としての安定は、法勾配を緩くすることにより土自体で行い、通水面の浸食、漏水、雑草繁茂等の防止、流水抵抗軽減のために各種材料により舗装した水路である。コンクリートライニングは、現場打ちの薄いコンクリート（厚さ10cm程度）を無筋で舗装するものである。ブロックライニングは、水路内面に既製の平板ブロックを敷き並べたもの、アスファルトライニングは、アスファルトを材料とした舗装であり、アースライニングは、土を舗装材料としたものである。一般に、粗度係数及び流速係数の関係で断面が大きくなるので、水路敷や維持管理等の面からの検討も必要となる [1]。無ライニング水路は、自然地盤を掘削するか、又は堤防を盛り立てただけの自然水路と内面通水部分を芝、安定剤、敷砂利等で保護した保護水路である [3]。

ライニング水路や無ライニング水路は、開水路の構造安全性を評価することは不可能であると考え、擁壁型水路の内、無筋コンクリートであるコンクリート擁壁水路やコンクリートブロック積水路等は対象から除外した。L形ブロック、柵渠、矢板水路等は、側版と底版が一体構造ではないため、開水路の構造安全性を評価することは不可能であると考え、対象からは除外した。

よって、本研究で対象とする開水路は、擁壁型水路の鉄筋コンクリート開水路であるフリーム、プレキャストコンクリート及び排水、大型フリームとした。

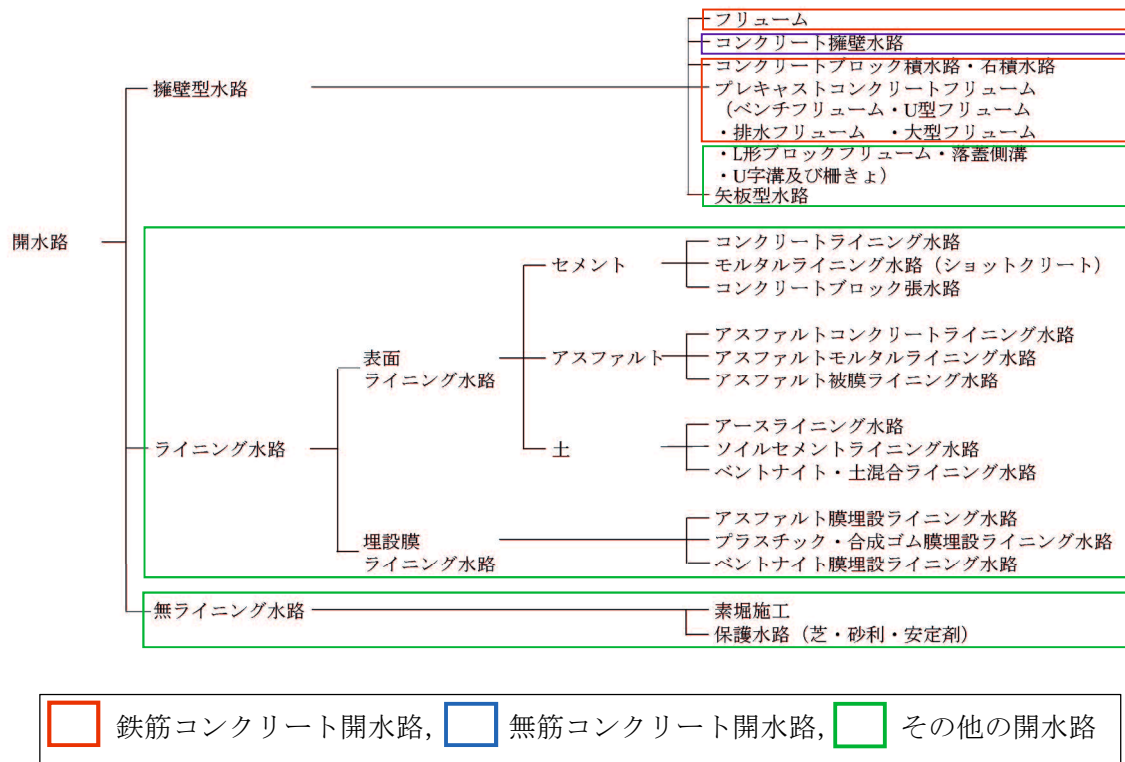


図 2.1 開水路の分類 [1]

表2.1 鉄筋コンクリート二次製品水路の種類 [2]

工種	規格
鉄筋コンクリートベンチフリーユーム	JISA5318
鉄筋コンクリートフリーユーム	JISA5318
鉄筋コンクリート排水フリーユーム	—
鉄筋コンクリート大型フリーユーム	農業土木事業協会型

### 2.3 開水路の劣化要因

鉄筋コンクリート開水路における性能低下には、コンクリートの摩耗、中性化等の内部要因、不同沈下、基礎地盤の空洞化等の外部要因の他、目地の劣化等のその他の要因等様々なものがあり、その劣化の進行も施設毎に異なる。しかし、いずれの場合も鉄筋の腐食により劣化が急速に進展する共通の性質を持っていること、鉄筋の腐食とひび割れには相互の因果関係があることから、調査・評価、性能低下の予測、対策工法の検討においては、これらの特質に留意することが重要である。

鉄筋コンクリート開水路における変状の種類及びその要因を表 2.2 に示すが、開水路に発生している変状の要因は、単独要因が作用するよりは複合的な要因が作用することで構造的耐力が低下していると想定される。そこで、本研究では、初期欠陥や材料劣化による変状について検討の対象とするものとし、構造劣化のように、既に変形等が生じている開水路や寒冷地特有の変状である凍害の影響を受けている開水路は、水路壁載荷装置を開水路に設置し、荷重を負荷させることは困難であると考え、対象から除外するものとする。

表2.2 鉄筋コンクリートの変状の種類とその要因 [1]

変状の種類		変状の要因								
		初期欠陥	中性化	塩害	アルカリシリカ反応 (ASR)	凍害	化学的腐食	疲労	摩耗・風化	構造・外力
初期欠陥	ジャンカ	○								
	コールドジョイント	○								
	内部欠陥 (空洞等)	○								
	砂スジ	○								
	表面気泡	○								
	非進行性ひび割れ ・乾燥ひび割れ ・乾燥収縮ひび割れ ・温度ひび割れ	○	◆非進行性ひび割れは、施工中、または完成後早い時期に処理を行えば、耐久性に問題は生じない。放置しておいた場合は、他の劣化要因と複合し、進行性ひび割れに変わる場合もある。							
材料劣化 (内部要因によるものが多い※)	ひび割れ		○	○						
	鉄筋腐食先行型				○	○	○	○		○
	ひび割れ先行型				○	○	○	○		○
	浮き・剥離		○	○	○	○	○	○		○
	錆汁		○	○	○		○	○		
	エフレッセンス					○			○	
構造劣化 (外部要因によるものが多い※)	変色			○	○		○		○	
	すりへり (摩耗)								○	
	断面欠陥		○	○			○	○		○
	曲げ・せん断ひび割れ									○
	たわみ							○		○
	変形		○	○	○			○		○
振動 (剛性の低下)		○	○	○			○		○	

「コンクリート診断技術」(社)日本コンクリート工学協会)を参考に整理

※ 材料劣化は主に内部要因、構造劣化は外部要因によるものが多い。しかし、材料劣化の場合は、疲労や構造外力のような外部要因でもひび割れ等の変状・劣化が生じる。

## 2.4 診断方法の提案

鉄筋コンクリート開水路の構造安全性を評価する診断手法として、管水路で研究されている管の内面に装置を設置し、荷重した時に発生する変形量から管の耐力を評価する内面載荷法 [4,5] を応用した水路壁載荷法を新たに開発し、提案するものとする。内面載荷法は、一方向から荷重した時の耐力を評価する手法（垂直に荷重した場合は水平の変形量を計測する）であるが、水路壁載荷法は、開水路側面の水路壁に対して垂直方向に荷重した時に発生する水路壁の変形量を測定することで、荷重と変形量の関係を求め、水路壁の曲げ剛性を算出する方法である。開水路は、管水路のように四方を埋設された状態ではないことから、水路壁載荷装置は、内面及び外面方向の二方向から荷重した時の耐力を評価できる構造とした。その概要図は、**図 2.2** 及び**図 2.3** に示すとおりである。本診断手法の特徴としては、現地での測定直後に評価結果を得ることが可能となること及び非破壊試験であるため、試験後の現状復旧などを特に必要としないことが挙げられる。

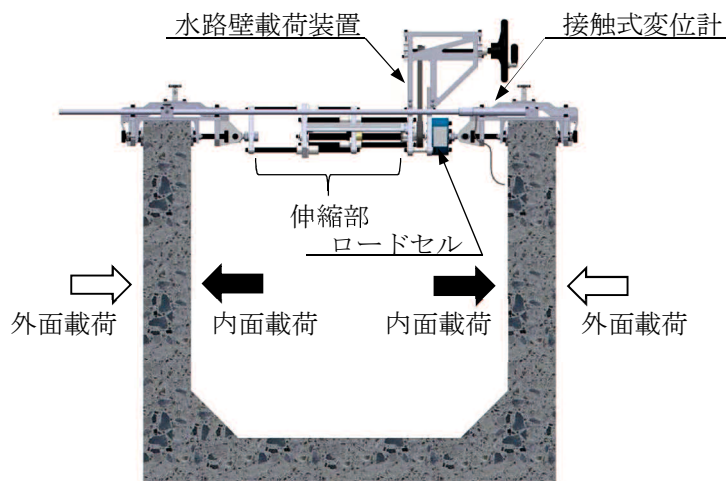


図 2.2 水路壁載荷装置の設置概要図

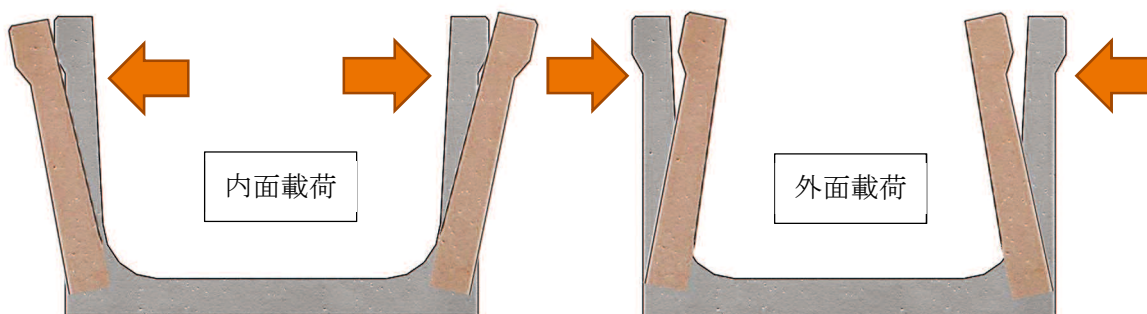


図 2.3 内面載荷と外面載荷のイメージ図



## 2.5 水路壁載荷装置の開発

### 2.5.1 載荷方法の検討

安定した荷重の負荷を実現するため、一定の載荷速度での荷重の負荷を可能とし、載荷停止時に荷重の低下が発生しないことを条件とした結果、載荷補助機構のあるねじ締め式載荷方法を採用することとした。なお、採用した理由は、以下のとおりである。

#### ①電動油圧式載荷ならびに電動ねじ締め式載荷の場合

本載荷方法は、必要な載荷能力を確保することも容易であり、一定の載荷速度を確保することも可能である。移動を考慮した小型の機械を用いることで、一定の載荷速度を確保する装置を開発することも可能であるが、安定した電源の確保が必要となること及び装置が重量物となるため、現場で用いる装置として適当ではないと判断した。

#### ②手動油圧式載荷の場合

本載荷方法は、手動油圧ポンプを用い、ハンドルを上下に動かすことで油をシリンダーへ送る機構であることから断続的な載荷となり、安定したデータを測定することが困難である。また、ねじを回転させて油を送るタイプの手動油圧ポンプであれば連続的に載荷することは可能であるが、油圧ポンプの特性として載荷停止後に若干の圧力低下が発生するため荷重保持が困難となる。荷重を保持した時の時間との関係を確認した結果（**図 2.4** 及び**写真 2.1**）、時間の経過と共に荷重低下（約 2 分間で 1.25kN）が確認されたことから適当ではないと判断した。

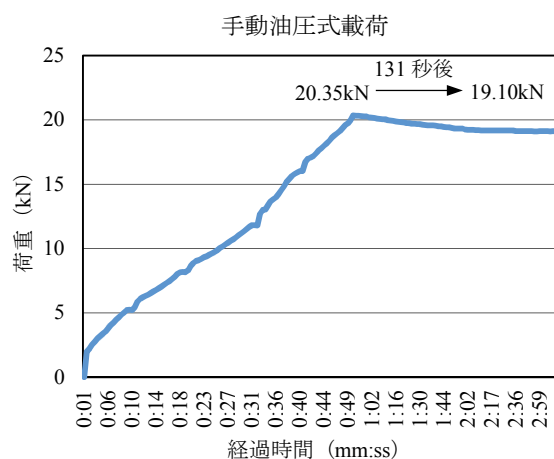


図 2.4 荷重保持と時間の関係

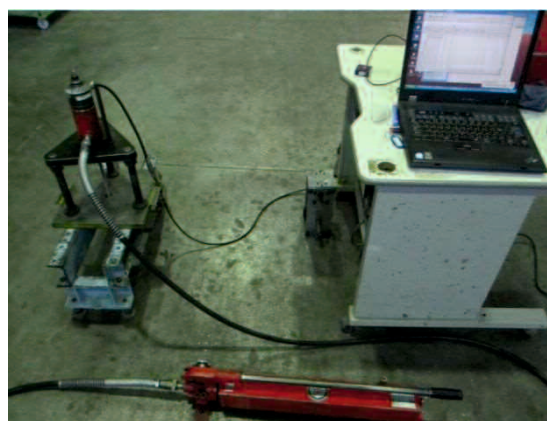


写真 2.1 載荷方法の試験状況

#### ③ねじ締め式載荷の場合

本載荷方法は、雌ねじをスパナ等で回転することで荷重を負荷するものであるため、載荷停止後の荷重低下は比較的小さいが、載荷荷重が大きくなるとねじの締め付トルクが増加するため、人力での載荷が困難になる。そこで、載荷に必要な締め付トルクを低減する載荷補助方法を検討することとした。

## 2.5.2 载荷補助機構の検討

ハンドル径を大きくすることで载荷に必要なトルクを低減することは可能である。また、作業性を考慮し、開水路の外側でハンドルを回転させる部品構成を考え、異なる歯車数のプーリーとタイミングベルトを組み合わせる方法とした。期待する効果を実証するため、 $\phi 120$  のハンドルとプーリーの歯車数比を 1:3 とした载荷補助装置 (図 2.5 及び写真 2.2) の製作ならびに評価 (図 2.6 及び写真 2.3) を実施した。評価を開始したところ、 $\phi 120$  のハンドルでは若干負荷が大きいと感じられたため、ハンドル径を見直すこととした。そこで、容易に载荷が可能となる距離を確認するため、ハンドルをラチェットスパナに変更した。回転軸の中心から持ち手の位置が 80mm 以上であれば、容易に载荷できることから、ハンドル径は  $\phi 180$  以上が必要であることを確認した。载荷停止後 (20.23kN)、155 秒後の荷重は 20.16kN となり、荷重の低下は、約 2.5 分間で 0.07kN であったことから、载荷補助装置を用いてもネジ締め式载荷で期待できる効果が得られることを確認した。

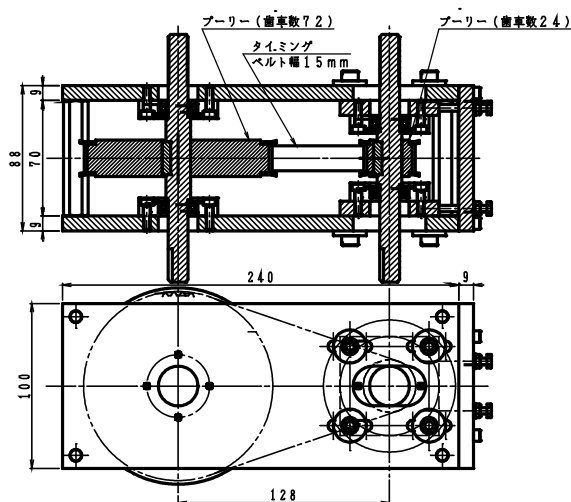


図 2.5 評価用の载荷補助装置の概要図



写真 2.2 評価用の载荷補助装置

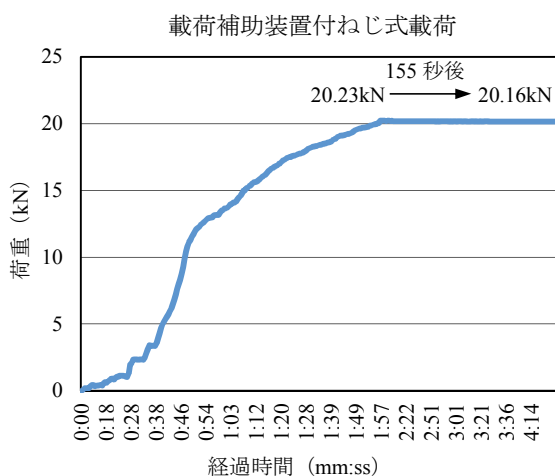


図 2.6 荷重保持と時間の関係



写真 2.3 载荷方法の試験状況

### 2.5.3 変位計の検討

現地での試験作業時間の短縮化を図るため、変位計を水路壁載荷装置に組み込むことが望ましいと考えた。そこで、水路壁載荷装置試作後に装置の挙動を確認し、変位計を本装置に組み込むかの検討を実施した。

試験は、写真2.4に示すとおり、鉄骨とボルトを用いて引張方向及び圧縮方向の確認ができるような架台を組み立て、水路壁載荷装置を取り付けて試験を行った。変位計の測定箇所は、水路壁の挙動に近い水路壁つかみ部（載荷用ハンドル側を手前とする）とロードセルを固定しているプレートの部品、載荷時に移動する台形ネジ用ナットが取り付けられているプレートの4ヵ所に変位計を取り付けた。

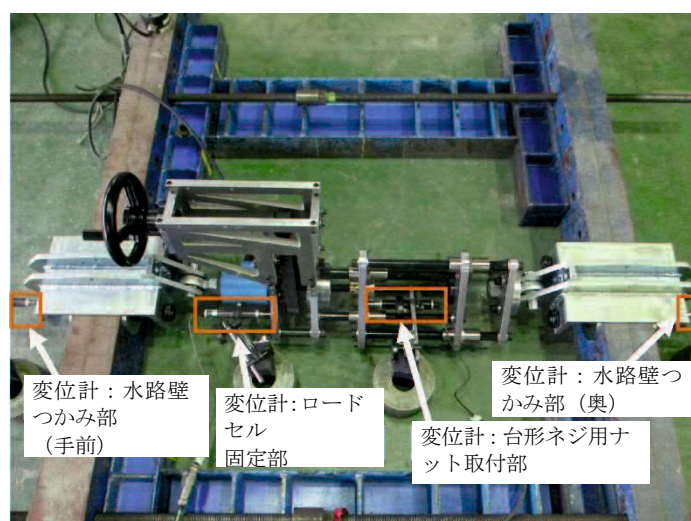


写真 2.4 試験状況

装置の挙動確認試験結果として、荷重と変形量の曲線を図 2.7 に示す。なお、ロードセルの引張方向をプラス（+）とし、圧縮方向をマイナス（-）とする。表 2.3 に試験から得られた結果を示す。

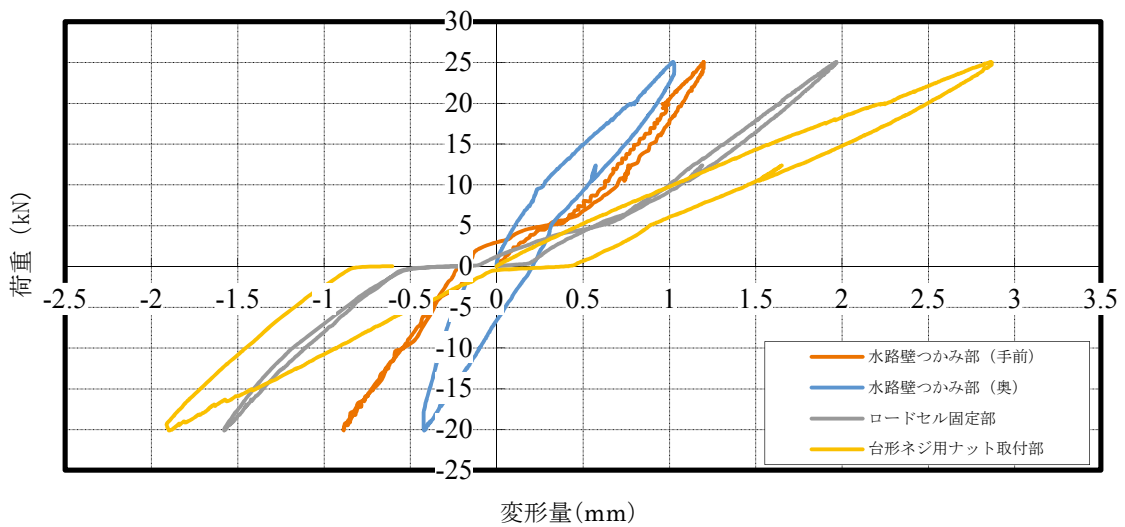


図 2.7 試験装置の挙動確認試験結果

表 2.3 試験結果とまとめ

試験結果	まとめ
各変位測定箇所は、類似する挙動を示さなかった。	水路壁載荷装置に変位計を組み込むのではなく、別途変位測定装置を設計する。
ロードセル固定部や台形ネジ用ナット取付部の装置本体部品は、水路壁つかみ部より変位量が大きくなった。	
載荷－除荷時の荷重変位曲線が類似している測定箇所は、ロードセル固定部であった。	
引張から圧縮に載荷方向を変えた際、台形ネジと台形ネジ用ナットとのクリアランス、水路壁つかみ部と装置本体を接合するピンのクリアランスによる変位が発生した。	水路壁つかみ部（手前）－載荷装置（本体）－水路壁つかみ部（奥）を直線的に設置するための治具を追加する。
水路壁つかみ部は、載荷時に壁の傾きの影響を受けるため、水平方向の変形量に変化が生じやすかった。	変位測定装置は水平方向に変位量を測定するため、水路壁の傾きの影響を受けないようにする。

## 2.5.4 水路壁載荷装置の仕様

水路壁載荷装置の仕様は、表 2.4 のとおりとした。

表 2.4 水路壁載荷装置の仕様

適用できる水路内空幅	経験上のボリュームゾーンである 1,000mm～2,500mm とする。
適用できる水路内空高さ※ <sup>1</sup>	労働安全衛生法により 2,000mm 未満とする。
適用できる水路厚さ	コンクリート二次製品によると 100mm～200mm 程度とする。ただし、現場打ちコンクリートの厚さは未定である。
測定内容	荷重と変形量をコンパクトなデータロガー等にて自動計測する。荷重を載荷する方向は、内面及び外面載荷に適用する。
測定する長手方向の箇所数	測定する長手方向の箇所数は、1 バレル又は水路長さ当たり 1 箇所とする。（長手方向の中央）
装置の重量※ <sup>2</sup>	労働基準法を参考に 50kg 以下とする。
載荷速度	人力にてハンドルを回し、一定速度を保持する。
載荷する方向	内面及び外面の両方向裁荷できるものとする。
載荷荷重の上限値	フリーム単体の弾性域内と見なせる 5kN 以内とする。
変位量の上限値	フリーム単体の弾性域内と見なせる 1mm 以内とする。

※1：労働安全衛生規則 第九章 墜落、飛来崩壊等による危険の防止（第五百十八条）には、「高さが二メートル以上の箇所（作業床の端、開口部等を除く。）で作業を行なう場合において墜落により労働者に危険を及ぼすおそれのあるときは、足場を組み立てる等の方法により作業床を設けなければならない。」と規定されている。

※2：労働基準法によると、「満 18 才以上の男子労働者が人力のみにより取り扱う重量は、55kg 以下にすること。また、当該男子労働者が、常時、人力のみにより取り扱う場合の重量は、当該労働者の体重のおおむね 40%以下となるよう努めること。」と規定されている。

### 2.5.5 水路壁載荷装置の試作

水路壁載荷装置の1号機の概要は、表2.5及び図2.8に示すとおりである。

表 2.5 水路壁載荷装置（1号機）の仕様

項目	内容
変位計	変位計は、装置と分離構造とした。
載荷方法	載荷ハンドルを正回転に回すと引張荷重，逆回転に回すと圧縮荷重を載荷するものとした。
載荷原理	載荷ハンドルを回転させることで、プーリー及び台形ネジを回転させ、ねじの螺旋形状を利用して、載荷装置を伸縮させる構造とした。
ロードセル	今回は、フリュームの破壊も考慮し、50kN仕様とした。
設計時に検討した内容	水路壁のつかみ部と装置伸縮部の接合は、載荷時の水路形状を考慮し、球面型のベアリングとピンを用いたヒンジ構造とした。
	人力での載荷を可能とするため、歯車の違うプーリーと大径のハンドルを用いた。
	載荷時の負荷を軽減するため、軸力が発生する回転部にはベアリングを組み込み、装置伸縮時の摩擦軽減にリニアシャフトとリニアブッシュを用いた。
	軽量化を図るため、摩擦を生じない部品の材料は、主にジュラルミンを用いた。（1号機の参考重量は約53kg）

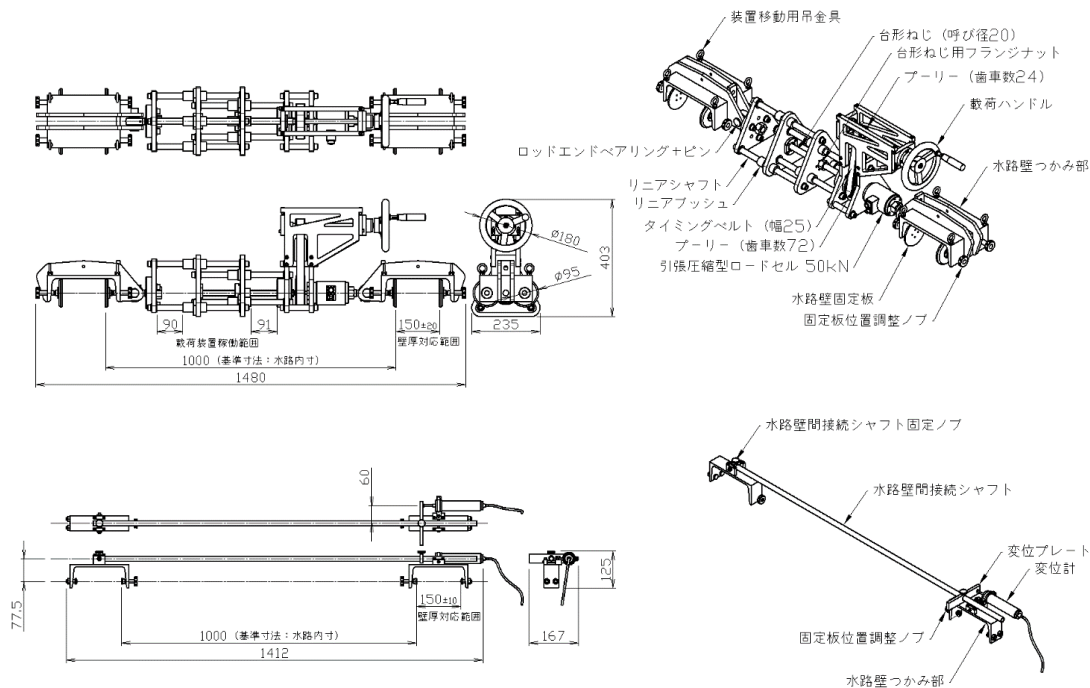


図 2.8 水路壁載荷装置（1号機）の概要図

また、水路壁載荷装置の軽量化及び精度向上を図るために、水路壁載荷装置 2 号機について、表 2.6 の改良を実施した。

表 2.6 水路壁載荷装置（2号機）の改良内容

項目	内容
ロードセルの精度向上	ロードセルの容量を 50kN（ひずみ出力値 $21.62\text{N}/1 \times 10^{-6}$ ）から、20kN（ひずみ出力値 $4.00\text{N}/1 \times 10^{-6}$ ）に変更した。
装置の軽量化	各 부품の寸法を見直し、材質をアルミ合金に変更した結果、装置の重さは 30kg となった。
装置の固定方法	装置を移動する際の金具を変更し、運搬作業の向上を図った。
装置設置の作業性向上	装置本体と水路壁固定部材との接合部形状を長孔に変更することで、装置本体の伸縮長さと水路壁間距離とのズレを吸収する構造とした。
変位計の測定精度向上	変位計の許容量を 50mm（ひずみ出力値 $0.005\text{mm}/1 \times 10^{-6}$ ）から、25mm（ひずみ出力値 $0.002\text{mm}/1 \times 10^{-6}$ ）に変更した。また、接続シャフトと変位計を同軸上に変更することで、設置時及び載荷時の縦・横方向の傾きによる誤差を防止した。
変位計の保護	変位計測定子の損傷を防止するために、変位計を部品内に組み込む構造とした。

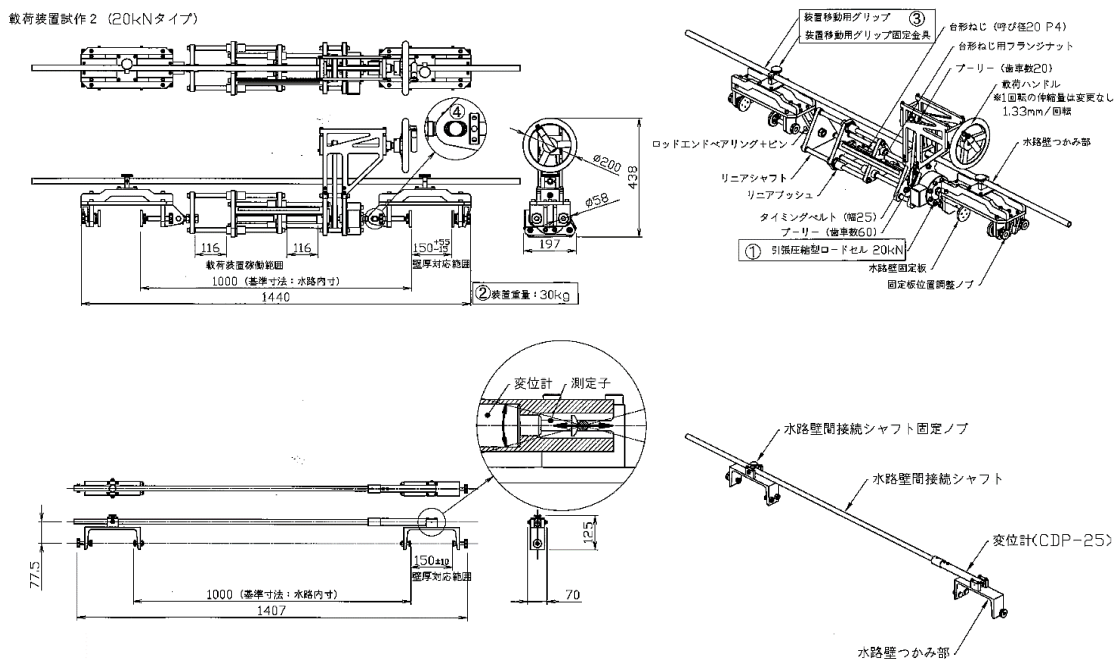


図 2.9 水路壁載荷装置（2号機）の概要図

試作した水路壁載荷装置を図 2.9 に示す。装置には最大 20 kN まで測定可能なロードセル（東京測器研究所製，TCLM-20KNB，非直線性 0.05%RO）を内蔵している。

載荷の機構は、水路側壁をつかみ部で固定し、装置に搭載した載荷ハンドルを回転させることで、ハンドルを正回転に回すと内面載荷、逆回転に回すと外面載荷が作用する。この時、側壁部に作用する荷重は、つかみ部に設置されている固定板（14,176 mm<sup>2</sup>）によって伝達される。変位計は装置に組み込んだ場合、載荷による装置のひずみを計測することが考えられるため分割構造とした。使用する変位計は接触式変位計（東京測器研究所製 CDP25，非直線性 0.1%RO）である。変位計は、装置と分割することにより、測定したい任意の位置に設置することができる。また、装置に使用した主要材料は、軽量化を図るため、主にアルミニウム合金を採用した。なお、本手法は、載荷によって水路壁が損傷すると曲げ剛性の低下や変形量の急激な増大が発生する。これらを防ぐために、荷重と変形量をリアルタイムでモニタリングし、損傷が生じる前に試験を終了できる構造とした。



### 2.5.6 水路壁載荷装置の構造

水路壁載荷装置及び変位計の構造は、表 2.7、図 2.10～図 2.11 に示すものとする。本装置は、内空幅に応じて、延長ジョイントを組付けする構造とした。

表 2.7 水路壁載荷装置の仕様

項目	内容	
適用内空幅	1,000mm～2,500mm	
適用壁厚	100mm～250mm	
装置構成	荷重測定部	載荷装置
		載荷装置固定クランプ ※壁厚に応じて、壁厚調整シャフト 2 本と M16 ネジを交換 壁厚 75～100 用, 100～150 用, 150～200 用, 200～250 用の計 4 種
		延長ジョイント (L200・L400・L650・L800)
	変位測定部	変位計
		変位計固定クランプ(変位計取付側) 変位計固定クランプ(伸縮ポール固定側)
		変位計接続伸縮ポール ※内空幅 1,000～1,500 用, 1,500～2,500 用の計 2 種
	記録装置	データロガー
最大載荷荷重	10kN	
最大測定変位量	外面載荷方向：10mm 内面載荷方向：10mm	
載荷方法	外面載荷－ハンドルを正(右)回転 内面載荷－ハンドルを逆(左)回転	
載荷原理	載荷ハンドルを回転させることで、プーリー及び台形ネジを回転させ、ねじの螺旋形状を利用、装置を伸縮させる。	
参考重量	30kg	

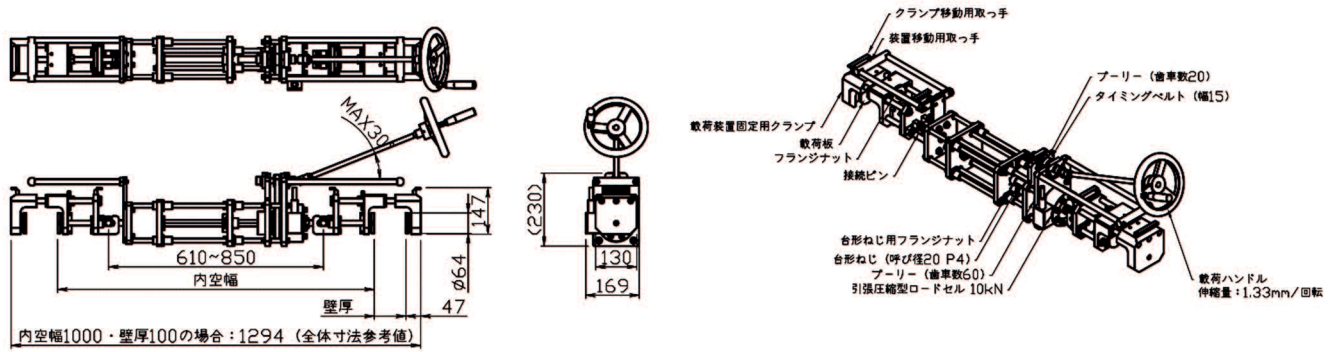


図 2.10 水路壁載荷装置（荷重測定部）概要図

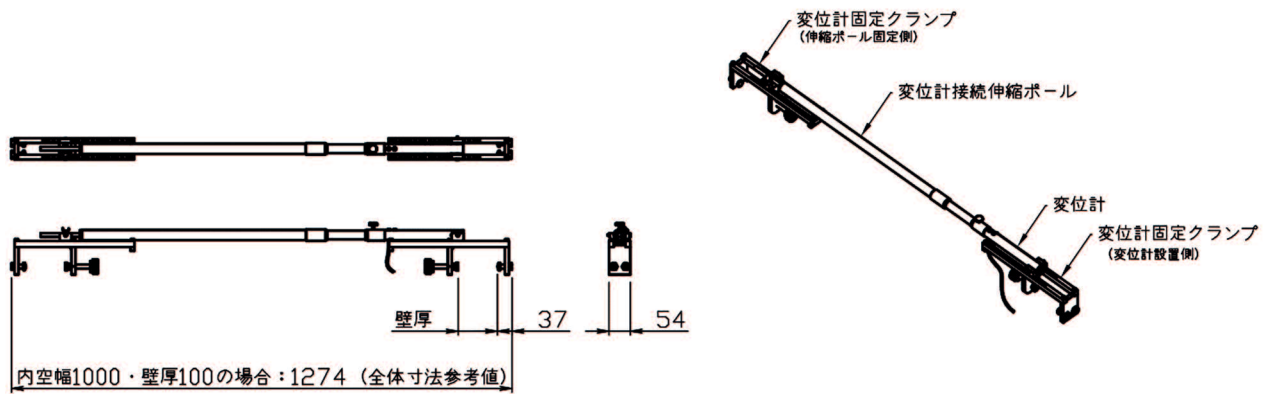


図 2.11 水路壁載荷装置（変位測定部）概要図

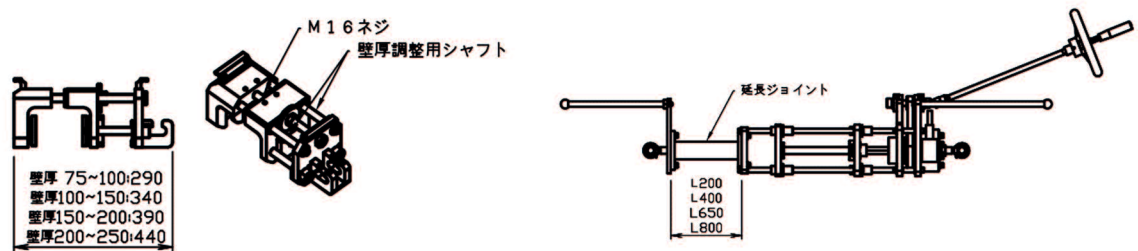


図 2.12 水路壁載荷装置（壁厚-内空幅対応）概要図

## 2.6 第2章の結論

本章では、本研究を進めるに当たり、対象とするコンクリート開水路及び変状について整理した。また、水路壁載荷装置の構造について整理した。

- ① 対象とするコンクリート開水路は、底版と側版が一体化している擁壁型水路の鉄筋コンクリート開水路とし、フリーム、プレキャストコンクリートフリーム、排水フリーム及び大型フリームとする。
- ② コンクリート開水路の変状は、外力が作用したことにより既に変形が生じているものや寒冷地に起因する凍害の影響を受けているものは、水路壁載荷装置の設置や荷重を負荷することは難しいと判断し、対象からは除外した。
- ③ 水路壁載荷装置における荷重の載荷は、負荷する荷重の微調整や負荷した荷重の保持状況を考慮し、ねじ締め式を採用した。
- ④ 変位計は、荷重を保持した時に発生する装置の歪みを計測し、一定した変形量の計測ができないことから、装置に組み込む構造ではなく、装置と分離する構造とした。
- ⑤ 装置の構造は、開水路の内面方向から荷重を負荷する内面載荷と開水路の外側から荷重を負荷する外面載荷の二方向から耐力を評価することができるものとした。
- ⑥ 装置の取り回しが容易に行えるように、人力で持ち運べる重量の約30kgとした。水路壁載荷法の特徴は、計測した直後に結果を確認することができるものであり、また、非破壊診断であることから、試験後の修復等は必要としないものとした。

## 第2章の参考文献

- [1] 農林水産省農村振興局整備部設計課：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「水路工」，2014
- [2] 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の長寿命化のための手引き，2015
- [3] 農林水産省：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」，2016
- [4] 兵頭正浩，石井将幸，佃亮平，緒方英彦，野中資博：埋設管の現有耐力評価手法としての内面載荷法の提案，農業農村工学会論文集 第300号，pp.I\_215-I\_220，2015
- [5] 兵頭正浩，緒方英彦，石井将幸：埋設管の耐力評価手法としての内面載荷法の提案，農業農村工学会論文集 第304号，pp.I\_1-I\_6，2017

## 第3章 コンクリート二次製品を対象とした構造安全性評価

### 3.1 概要

水路壁載荷法による検証を進めるためには、コンクリート開水路の側壁に発生する荷重と変形量の関係を確認する必要がある。そこで、比較的品质が安定しているコンクリート二次製品における挙動を定量的に把握した。

本章では、健全なプレキャストコンクリートフリームについて、水路壁載荷装置を用いた水路壁載荷法による試験を実施した。水路壁載荷装置は、内面載荷及び外面載荷の二方向に荷重を負荷することができる構造である。まず、装置にてフリームの側壁部に荷重を負荷させ、側壁部に発生する変形量から傾きを確認した結果、弾性域の下では線形性があり、左右側壁の挙動は、均等であることを確認した。載荷方向が違っていても荷重と変形量の傾きは、ほぼ同等であることを確認した。また、試験速度の違いにより側壁部に発生する荷重と変形量の傾きを確認した結果、ほぼ同じ挙動を示すことを明らかにした。

今回の試験条件は、左右対称なプレキャストコンクリートフリームの長手方向における中央部を基準とし、内面載荷及び外面載荷における集中荷重を作用させた時にフリームの側壁に発生する変形量を計測したものである。そこで、フリームの側壁部に発生する変形量について理論式を導き、理論式における計算結果と試験における測定値を比較した結果、同等の結果であることを確認した。よって、理論式から変形量を推定することができることを明らかにした。

### 3.2 水路壁載荷装置を用いた開水路単体の挙動確認

#### 3.2.1 水路壁載荷装置によるプレキャストコンクリートの外圧試験

プレキャストコンクリート製品であるフリュームをアムスラー式外圧試験機（東京衡機製造所, TK-10 型, 最大荷重 1,000kN）にて、ひび割れ荷重並びに変形量を計測することで、試験体を損傷させない荷重値を確認した。次に、水路壁載荷装置を使用した外圧強度試験を実施した。試験体は、微振動成形による高流動コンクリート（粉末系）にて成形した幅 1,000 mm×高さ 1,000 mm×厚さ 150 mm×長さ 1,000 mm のコンクリート二次製品のフリュームである。試験体の概要図と詳細図を図 3.1 に示す。なお、コンクリートの圧縮強度は実測値で 40.1 N/mm<sup>2</sup>（材齢 28 日）であったため、コンクリート標準示方書設計編 [1] の理論式から、静弾性係数を算出した。式 (3-1) に上記圧縮強度の実測値を代入した結果、静弾性係数は、31,020 N/mm<sup>2</sup> である。

$$E_c = \left( 3.1 + \frac{f'_c - 40}{50} \right) \times 10^4 \dots\dots\dots (3-1)$$

ここに、 $E_c$  : 静弾性係数 (N/mm<sup>2</sup>)

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度 (N/mm<sup>2</sup>)

$$E_c = \left( 3.1 + \frac{40.1 - 40}{50} \right) \times 10^4 = 31,020 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

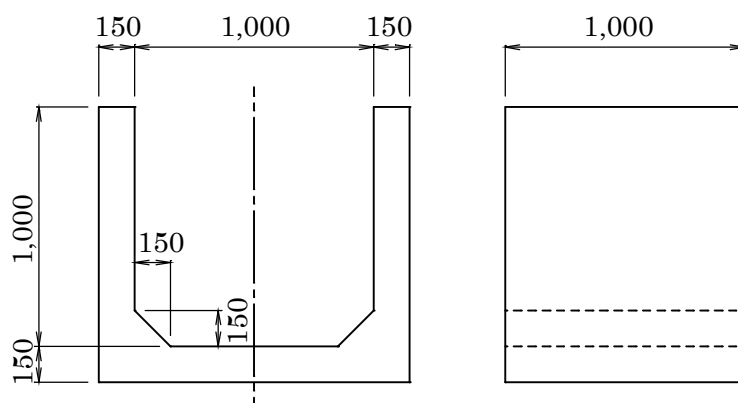


図 3.1 試験体の概要図

### 3.2.2 アムスラー式外圧試験による曲げ荷重と変形量の検証

曲げ試験は JIS A 5372「プレキャスト鉄筋コンクリート製品推奨仕様 G-1 ケーブルトラフ G-1.7 製品の曲げ耐力試験」に準拠して、試験を行った。図 3.2 に示すように試験体を設置し、長手方向に一様に負荷されるよう 1mm/秒の速度で荷重を加え、荷重と変位の関係及びクラック発生状況を確認した。また、ひび割れの発生位置及び状況についても観察した。変形量は、データロガー（東京測器研究所 TDS-530）により、2 秒間隔で計測した。

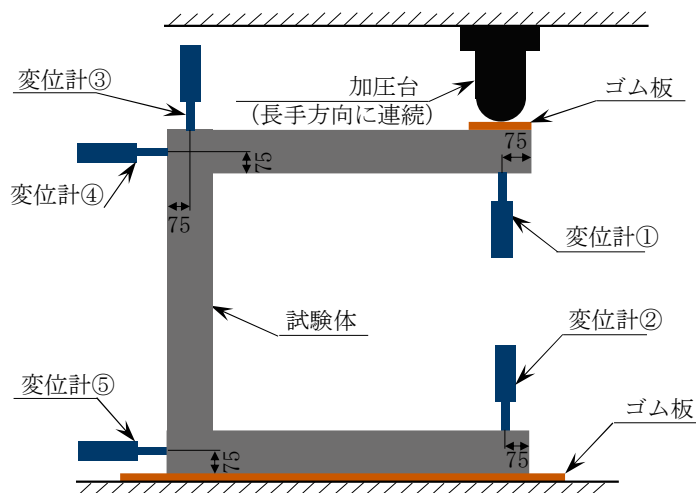


図 3.2 曲げ試験概要図

試験結果を図 3.3 に示すが、試験体は、20kN 付近で破壊する結果となった。水路壁載荷装置により負荷する荷重は、暫定ではあるが、弾性域と見なせる 5kN 以内、変形量の上限值は 5mm 以内を目安として設定した。

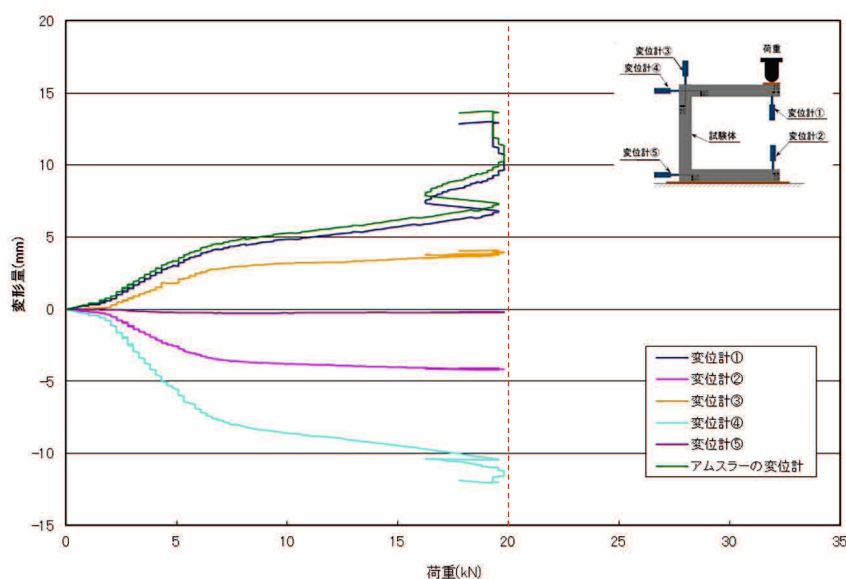


図 3.3 試験結果（荷重と変形量の関係）

### 3.2.3 水路壁載荷装置による試験

試験体の側壁部に発生する変形量は、試験体頂部に設置した水路壁載荷装置による載荷と同時に計測した。試験条件は、表 3.1 に示すとおりである。水路壁載荷装置による載荷は、装置に取り付けたハンドルを回転させることで行う。載荷速度は、約 0.054kN/秒（1 回転当たりの約 60 秒）を目安に一定速度となるようにした。また、速度による影響を確認するために、約 0.113kN/秒（1 回転当たりの約 12 秒）及び約 0.026kN/秒（1 回転当たりの約 120 秒）についても併せて検討した。装置の設置は試験体の軸方向中央部とし、載荷方向は内面載荷（試験体の内面側から外面側に載荷）と外面載荷（試験体の外面側から内面側に載荷）とした。横断面における変位計の設置は図 3.4 に示すとおりである。なお、横断方向の設置に関しては、変位計 C～K は装置の軸線下にあり、変位計 A 及び B は、装置との干渉をさけるために水平方向の離隔距離を 105mm とした。底版の底面からの変位計の高さは、A 及び B が 1,150mm、C 及び D が 930mm、E 及び F が 710mm、G 及び H が 490mm、J 及び K が 270mm とした。なお、荷重と変形量のデータは、データローガー（東京測器研究所 TDS-530）により 2 秒間隔で計測した。

表 3.1 試験条件

条件	載荷方向	載荷速度	変位計の位置
1	内面	約 0.054kN/秒（約 60 秒/回転）	中央
2	外面	約 0.054kN/秒（約 60 秒/回転）	
3	内面	約 0.113kN/秒（約 12 秒/回転）	
4	外面	約 0.026kN/秒（約 120 秒/回転）	

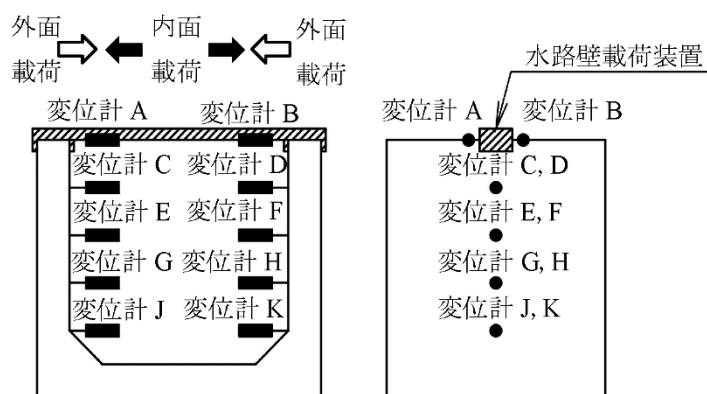


図 3.4 変位計設置断面図

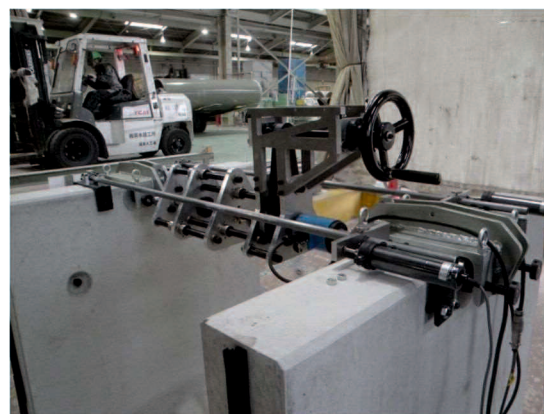


写真 3.1 試験実施状況



### 3.2.4 試験結果

#### (1) 荷重時における左右側壁の挙動

水路壁載荷法を現場で適用するためには、健全な開水路に本手法を適用した際、左右側壁の挙動が等しくなる必要がある。条件1は、水路壁載荷装置及び変位計を試験体の中央部に設置し、内面載荷より変形量を測定した結果である。また、条件2は、条件1の荷重する方向を外面載荷とした場合である。この時の最上部に設置した変位計A及び変位計Bに発生した荷重と変形量の関係を図3.5及び図3.6に示す。変位計A、Bにおける近似直線の傾きは、それぞれ14.0kN/mmであり、同じ挙動を示す結果となった。

よって、健全開水路に本手法を適用した際における左右の側壁は、内面及び外面載荷に伴って、均等に変形していることを確認できた。

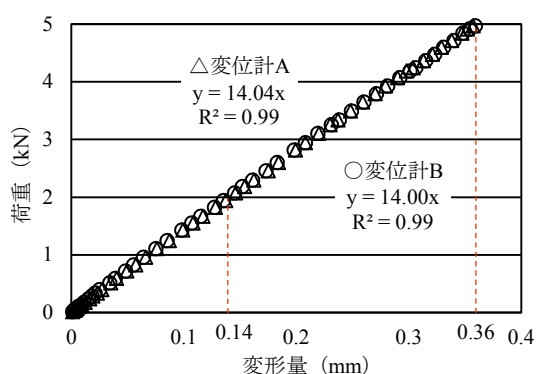


図 3.5 内面載荷における荷重と変形量の関係 (条件 1)

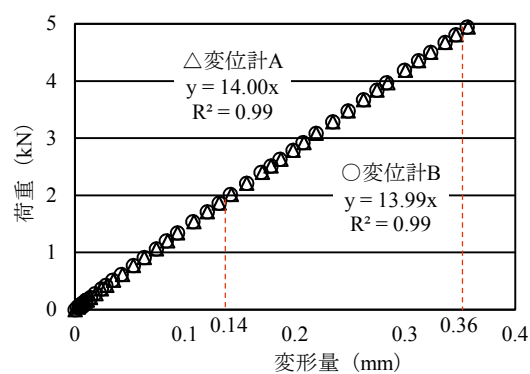
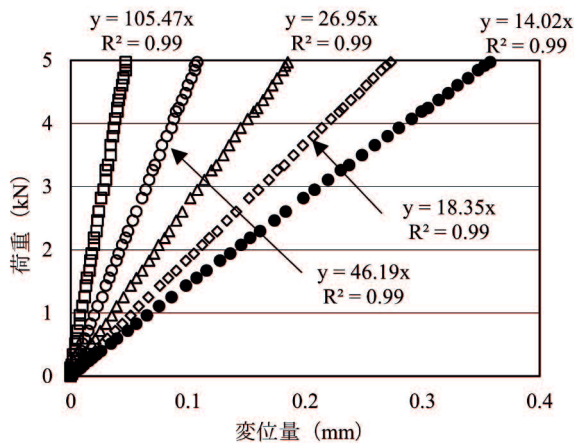


図 3.6 外面載荷における荷重と変形量の関係 (条件 2)

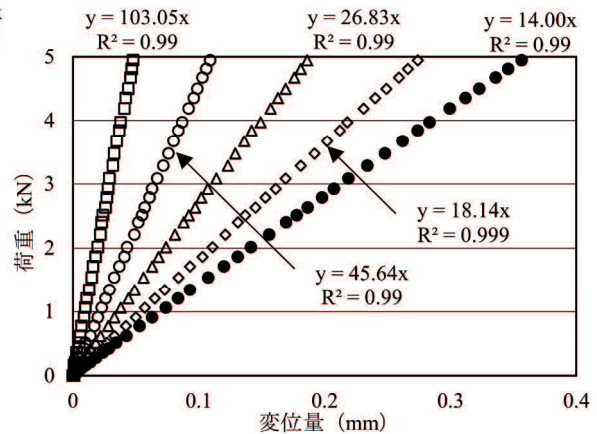
#### (2) 荷重方向が荷重と変形量の関係に与える影響

本研究で用いたフリュームはハンチを有している。ハンチの影響を確認するために、条件1、条件2の内面載荷時及び外面載荷時における全ての測定位置の荷重と変形量に対して考察を加えることにした。荷重と変形量の関係を図3.7と図3.8に示す。全ての測定位置における荷重と変形量の近似直線は、内面載荷及び外面載荷ともに、それぞれの決定係数が0.99以上と非常に高い相関を示した。各変位計における傾きは、変位計A、Bについては前述したとおりであり、変位計C、Dでは内面載荷が18.3kN/mm、外面載荷が18.1kN/mmとほぼ同じになった。変位計E、F並びに変位計G、H、変位計J、Kにおいても同様であり、内面載荷と外面載荷の両者において近似直線の傾きは概ね同じ値となることが確認できた。



●変位計 A,B の平均値    ◇変位計 C,D の平均値  
 △変位計 E,F の平均値    ○変位計 G,H の平均値  
 □変位計 J,K の平均値

図 3.7 内面載荷における荷重と変形量  
 の関係 (条件 1)



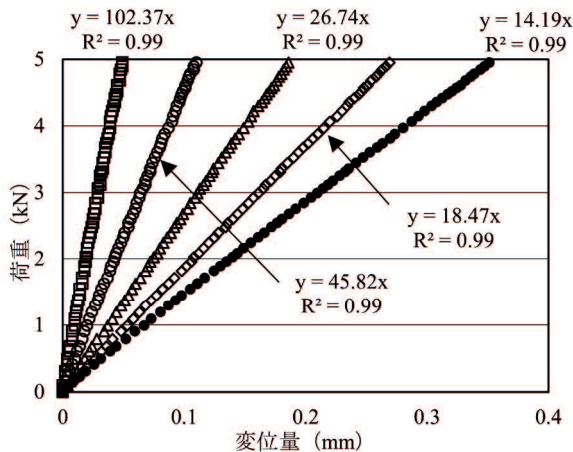
●変位計 A,B の平均値    ◇変位計 C,D の平均値  
 △変位計 E,F の平均値    ○変位計 G,H の平均値  
 □変位計 J,K の平均値

図 3.8 外面載荷における荷重と変形量  
 の関係 (条件 2)

### (3) 載荷速度が荷重と変形量の関係に与える影響

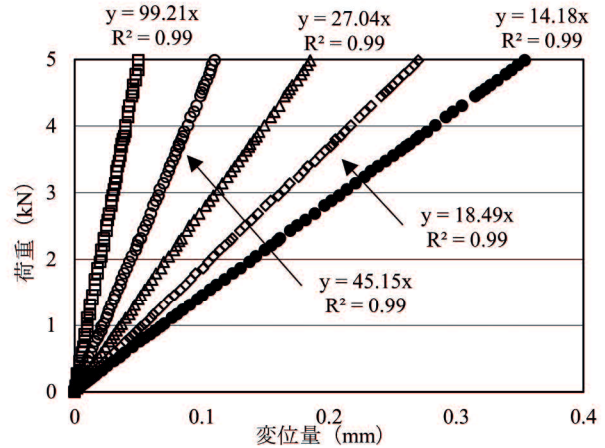
小山ら [2] の既往の研究によると、荷重速度と静弾性係数の関係は、JIS A 1108 が示す載荷速度の範囲であれば、速度が静弾性係数に与える影響はあまり大きなものではないと報告されている。コンクリートの圧縮強度試験方法である JIS A 1108 では、試験時の速度は毎秒  $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2$  と規定している。圧縮強度試験での最小載荷速度である  $0.2 \text{ N/mm}^2$  に対して最大値は 5 倍の  $1.0 \text{ N/mm}^2$  であり、同様に割裂引張試験も最小値と最大値で 5 倍の違いがある。そこで、本節では載荷速度が荷重と変形量の傾きに与える影響について評価した。目標とした載荷速度は、約  $0.054 \text{ kN/s}$  (ハンドル 1 回転当たり 60 秒程度) を目安にハンドルの回転が一定速度となるようにした。また、速度による影響を確認するために、速度が約  $0.113 \text{ kN/s}$  (ハンドル 1 回転当たり 12 秒程度) 及び約  $0.026 \text{ kN/s}$  (ハンドル 1 回転当たり 120 秒程度) についても併せて検討した。条件 3 (約  $0.113 \text{ kN/s}$ ) は、条件 4 ( $0.026 \text{ kN/s}$ ) の約 4.3 倍の載荷速度である。この時の荷重と変形量の傾きを測定した結果をそれぞれ図 3.9 と図 3.10 に示す。各変位計における荷重と変形量の傾きは、載荷方向に関係なく同程度の値となる結果であった。

以上から、本試験条件における載荷速度の範囲内では、荷重と変形量の傾きに与える影響は比較的小さいことを確認した。



●変位計 A,B の平均値    ◇変位計 C,D の平均値  
 △変位計 E,F の平均値    ○変位計 G,H の平均値  
 □変位計 J,k の平均値

図 3.9 内面載荷における荷重と変形量の関係 (条件 3)



●変位計 A,B の平均値    ◇変位計 C,D の平均値  
 △変位計 E,F の平均値    ○変位計 G,H の平均値  
 □変位計 J,K の平均値

図 3.10 外面載荷における荷重と変形量の関係 (条件 4)

### 3.3 弾性理論に基づく計算値と実測値との比較

本試験条件は、左右対称な試験体の中央部を基準とし、内面及び外面載荷において集中荷重を作用させた時に装置近傍の側壁に発生する変形量を計測したものである。図 3.11 を用いて外面載荷において C 点に発生する変形量について、理論式による計算方法を説明する。

図 3.11 は、試験体底版の中心部である A 点を固定端とし、自由端である C 点に荷重  $P$  を水平方向に加えたものである。この時の C 点に発生する変形量は、A 点においては試験体の中央部であるため、たわみ角は 0 となる。断面二次モーメントは、A~BA1 間と BC1~C 間においては、壁厚は  $h$  で一定であるが、ハンチである BA1~BA2 間と BC1~BC2 間では、壁厚が  $h$  から  $2h$  まで変化する。そこで、BA1~BA2 間と BC1~BC2 間における断面二次モーメントは、平均値を使用するものとした。A~BA1 間と BC1~C 間における断面二次モーメント  $I_1$  は、壁厚と試験体長さとの長方形断面であるため式 (3-2) のように導くことができる。一方、BA1~BA2 間と BC1~BC2 間における断面二次モーメント  $I_2$  は、上述のとおり、壁厚が  $h$  から  $2h$  と線形的に変化するため、式 (3-3) のように導いた。また、B~BA2 間と B~BC2 間においては、式 (3-4) に示すとおり、断面二次

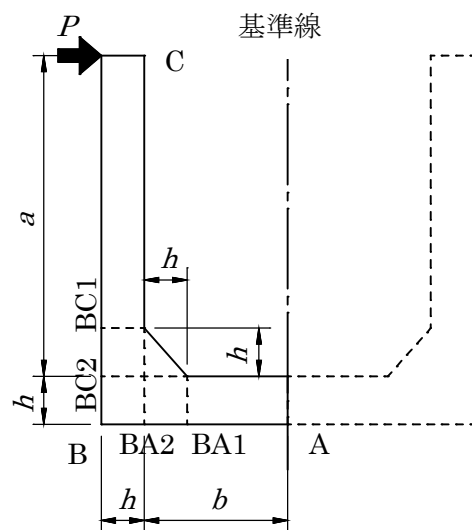


図 3.11 理論式検討概要図

モーメント  $I_3$  は過大な数値となり、変形量も非常に小さな数値になることから剛域と設定した。断面二次モーメントは、それぞれ以下のとおりである。

$$I_1 = \frac{1}{12} L \cdot h^3 \quad \dots\dots\dots (3-2)$$

$$I_2 = \frac{1}{h} \int_0^h \frac{L}{12} \cdot (2h-x)^3 dx = \frac{5}{16} L \cdot h^3 \quad \dots\dots\dots (3-3)$$

$$I_3 = \frac{1}{12} L(a+h)^3 \quad \dots\dots\dots (3-4)$$

- ここに、  $I_1$  : A～BA1 間と BC1～C 間における断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)  
 $I_2$  : BA1～BA2 間と BC1～BC2 間における断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)  
 $I_3$  : B～BA2 間と B～BC2 間における断面二次モーメント (mm<sup>4</sup>)  
 $h$  : 壁厚 (mm)  
 $L$  : 試験体の長さ (mm)

A～BA1 区間における回転角  $\theta_{BA1}$  は、曲げモーメント  $M_{(x)}$  を積分し、式 (3-5) のように導くことができる。

$$M_{(x)} = P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right)$$

$$\theta_{(x)} = \frac{1}{EI_1} \int_0^x M_{(t)} dt + \theta_{(a)} = \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot (b + 2h) \cdot x + 0$$

$$\theta_{BA1} = \theta_{(x=a-h)} = \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right) \cdot (a-h) \dots\dots\dots (3-5)$$

BA1～BA2 区間における回転角  $\theta_{BA2}$  は、曲げモーメント  $M_{(x)}$  を積分し、式 (3-6) のように導くことができる。

$$M_{(x)} = P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right)$$

$$\theta_{(x)} = \frac{1}{EI_2} \int_{a-h}^x M_{(t)} dt + \theta_{BA1}$$

$$= \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right) (x-a+h) + \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right) (a-h)$$

$$\theta_{BA2} = \theta_{(x=a)} = \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right) \cdot h + \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2} h \right) \cdot (a-h) \dots\dots\dots (3-6)$$

BC1～BC2 区間における回転角  $\theta_{BC2}$  及び変形量  $y_{BC2}$  は、曲げモーメント  $M_{(x)}$  を積分し、

式 (3-7) のように導くことができる。

$$M_{(z)} = P \cdot (b - h - z)$$

$$\theta_{(z)} = \frac{1}{EI_2} \int_{-h}^z M_{(t)} dt + \theta_{BC1} (= \theta_{BA2})$$

$$= \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left\{ (b-h)(z+h) - \frac{1}{2}(z^2 - h^2) \right\} + \theta_{BA2}$$

$$\theta_{BC2} = \theta_{(z=0)} = \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left\{ (b+h) \cdot h + \frac{1}{2}h^2 \right\} + \theta_{BA2}$$

$$= \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left\{ \left( b - \frac{1}{2}h \right) \cdot h \right\} + \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2}h \right) \cdot h + \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left( b + \frac{1}{2}h \right) \cdot (a-h)$$

$$y_{(z)} = \int_{-h}^z \theta_{(t)} dt + y_{BC1}$$

$$= \frac{P}{EI_2} \int_{-h}^z \left[ \left\{ (b-h)h + (b-h)t - \frac{t^2}{2} + \frac{h^2}{2} \right\} + \theta_{BA2} \right] dt + y_{BC1}$$

$$= \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left\{ (b-h) \cdot h \cdot (z+h) + \frac{1}{2}(b-h) \cdot (z+h)^2 - \frac{1}{6}(z+h)^3 + \theta_{BA2} \cdot (z+h) \right\}$$

$$y_{BC2} = y_{(z=0)} = \frac{1}{EI_2} \cdot P \cdot \left\{ (b-h) \cdot h^2 + \frac{1}{2}(b-h) \cdot h^2 - \frac{1}{6}h^3 + \theta_{BA2} \cdot h \right\} \cdots (3-7)$$

BC2～C 区間における (C 点に発生する) 変形量  $y_c$  は、曲げモーメント  $M_{(z)}$  を積分し、式 (3-8) のように導くことができる。

$$M_{(z)} = P \cdot (b - h - z)$$

$$\theta_{(z)} = \frac{1}{EI_1} \int_0^z M_{(t)} dt + \theta_{BC2} = \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left\{ (b-h) \cdot z - \frac{1}{2}z^2 \right\} + \theta_{BC2}$$

$$y_{(z)} = \int_0^z \theta_{(t)} dt + y_{BC2} = \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left\{ \frac{1}{2}(b-h) \cdot z^2 - \frac{1}{6}z^3 \right\} + \theta_{BC2} \cdot z + y_{BC2}$$

$$y_c = y_{(z=b-h)} = \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \left\{ \frac{1}{2}(b-h) \cdot (b-h)^2 - \frac{1}{6}(b-h)^3 \right\} + \theta_{BC2} \cdot (b-h) + y_{BC2}$$

$$= \frac{1}{EI_1} \cdot P \cdot \frac{(b-h)^3}{3} + \theta_{BC2} \cdot (b-h) + y_{BC2} \cdots \cdots \cdots (3-8)$$

計算は、試験時の荷重  $P$  が中央付近である 2,000 N と最大荷重値である 5,000N について実施した。式 (3-8) に、側壁の高さ  $a$  が 1,000 mm, 底版部の幅  $b$  が 500 mm, 壁厚  $h$  が 150mm, コンクリートの弾性係数  $E$  が 31,020 N/mm<sup>2</sup>, 断面二次モーメント  $I_1$  が 28,125×10<sup>4</sup> mm<sup>4</sup>,  $I_2$  が 105,468.75×10<sup>4</sup> mm<sup>4</sup> を代入した結果、荷重  $P$  が 2,000N の場合の変形量は、0.138 mm となり、荷重  $P$  が 5,000N の場合の変形量は、0.345mm となった。

実測値の結果は、図 3.5 及び図 3.6 から荷重  $P$  が 2,000N の場合の変形量は 0.14 mm, 荷重  $P$  が 5,000N の場合の変形量は 0.36 mm であったため、計算値と実測値はほぼ同じ値となり、弾性領域内における変形量は、理論式にて推定できる可能性があることを確認した。

### 3.4 第3章の結論

本章では、試作した水路壁載荷装置にて、プレキャスト製コンクリートフリームによる外圧試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認した。また、理論式による計算結果と試験による実測値との比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 健全なコンクリートフリームにおける左右の側壁は、内面及び外面載荷に伴って、弾性域内においては均等に変形している。
- ② 健全なコンクリートフリームの弾性域内における荷重と変形量の傾きは、載荷方向に関係なく、一定である。
- ③ 載荷速度が、0.113kN/秒（ハンドル1回転当たり12秒程度）から0.026kN/秒（ハンドル1回転当たり120秒程度）の範囲内では、荷重と変形量の傾きは、ほぼ同等である。
- ④ 試験体最上部に設置した変位計A及びBに発生する変形量について理論式を導いた時の計算結果と試験における実測値は、一致したため、変形量は理論式により推定できる可能性がある。

### 第3章の参考文献

- [1] 小山善行, 鈴木澄江, 早川光敬, 陣内浩: 圧縮強度試験における荷重速度と強度レベルがコンクリートの強度・変形性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, 31, pp.409-414, 2009
- [2] 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, p.39, 2012



## 第4章 コンクリート二次製品の劣化モデルを対象とした構造安全性評価

### 4.1 概要

本章では、ひび割れを発生させた鉄筋コンクリートフリームにおける荷重と変形量を計測し、健全な鉄筋コンクリートフリームとの比較を行った。

まず、ひび割れについては、現状の開水路内面からの目視による診断方法では、確認することができないコンクリート開水路の外面部にひび割れが発生した場合を想定した。コンクリート開水路は、埋設状況に置かれた場合が多いため、その状況下でコンクリート開水路の外部から作用する外力（例えば、土圧や活荷重等）が作用した場合を想定し、水路壁載荷装置を使用し、外面載荷によりひび割れを発生させた試験体を作製した。

もう一つは、コンクリート開水路に発生するひび割れで最も多い乾燥収縮が原因で発生するひび割れを想定し、側壁の長手方向中央付近に鉛直の貫通したひび割れを発生させた試験体を作製した。

これら試験体にて、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係を確認した結果、フリームの底版部にひび割れを発生させた試験体の場合は、健全品よりも内面載荷で約1.2倍、外面載荷で1.5倍の差が生じる結果となった。内面載荷はひび割れが閉じようとし、ひび割れ面が圧縮する方向に作用し、外面載荷はひび割れが開こうとする方向に作用したため、載荷方向による差が生じたと考える。一方、側壁に貫通ひび割れを発生させた試験体の場合、健全品とほぼ同等の結果となった。これは、ひび割れが発生している場合でも、鉄筋が健全な状態であれば、一体変形することから、健全品との差が生じなかったと考える。

以上から、水路壁載荷法は、コンクリート開水路の外面部に発生したひび割れを検知することができる診断手法である。

## 4.2 コンクリート開水路に発生するひび割れ

コンクリート開水路には、一般的に表 4.1 に示すひび割れが発生している。これらは、現在実施されている開水路内面からの目視診断等により、ひびわれ幅から現状の健全度についてランク分けされている。既往の研究において、森ら [1] による連続画像スキャニング手法としてレーザー光及び CCD カメラによる手法は、コンクリート表面のひび割れ箇所を検知することができるが、開水路背面側のひび割れを検知することができない。また、岩野ら [2] による衝撃弾性波法では、コンクリート内部のひび割れ等の欠陥を探查することができ、特定箇所を選定した場合は効果な方法であるが、膨大な延長のコンクリート開水路の調査には、時間等の制約から難しいと考える。よって、現状の診断方法では、水路の外面にひび割れが発生している等の目視確認できない異常については、効果的な診断方法がないのが現状である。

土圧や活荷重等の外力が作用した時に発生するひび割れは、側壁及び底版の外側を引張とする向きの最大曲げモーメントが生じることから、ひび割れは側壁の外側下部及び底版外側両端に水路軸方向にある程度の長さを持って発生すると言われている [3]。そこで、上記状態を再現するために水路壁載荷装置を使用し、開水路の外側から荷重を負荷させる外側載荷により開水路外側の底版部にひび割れが発生するまで（荷重が低下するまで）荷重を負荷させ、コンクリート開水路の内側からは確認できない外側面にひび割れを発生させた試験体を作製した。

また、表 4.1 に示すひび割れの中でもコンクリート開水路に発生するひび割れは、施工初期に発生する乾燥収縮によるひび割れが全体の約 96%と最も多いと言われている。ひびわれが貫通している場合は、ひび割れ幅が 1mm 未満であっても劣化因子（水や二酸化炭素等）が侵入し、鉄筋の腐食や関連する劣化の促進に繋がるおそれがある [3]。そこで、上記状態を再現するために、開水路側壁部の垂直方向に貫通ひび割れを発生させた試験体を製作した。なお、ひび割れ幅 ( $w$ ) は、 $0.1\text{mm} \leq w < 0.3\text{mm}$  が最も多いと言われているため [3]、この範囲を目安にひび割れを設けることとした。

表 4.1 鉄筋コンクリートに作用するひび割れ [4]

タイプ	形状	原因
初期ひび割れ	目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ	乾燥収縮・温度応力
劣化要因不特定のひび割れ	特徴的な形状を示さないひび割れ	症状が複合的であり劣化要因を特定できないもの
ひび割れ先行形ひび割れ	格子状・亀甲状などのひび割れ	ASR や凍害などの劣化要因
外力によるひび割れ	側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ	構造物に作用する曲げ・せん断力
鉄筋腐食先行形ひび割れ	鉄筋に沿ったひび割れ	中性化・塩害

### 4.3 底版ひび割れモデルによる検証

#### 4.3.1 試験体

試験体は、図 4.1 に示すとおり、鉄筋コンクリート大型フリューム（農業土木事業協会型）の張り出し無しタイプとし、その寸法は、内空幅 1,000mm、内空高さ 1,000mm、長さは 2,000mm である。

ひび割れの発生は、試験体側壁の天端、長手方向の中央に水路壁載荷装置を設置し、試験体の外面側から内面側に引き込む外面載荷により、反力が低下するまで荷重を加えた。この時、変位計は、装置を中心とし、図 4.2 に示す箇所に設置した。荷重と変形量の関係は図 4.3 に、最大荷重時における各変位計の変形量を表 4.2 に示すが、最大荷重が 18.37kN、最大変形量が 3.72mm をピークに荷重が低下したため、この時点で健全性が損なわれたと判断した。荷重と変形量の傾きは、弾性領域内では、変位計 1R、1L、6R 及び 6L と変位計 2R、2L、5R 及び 5L と変位計 3R、3L、4R 及び 4L の 3 つのグループに分かれていることが確認できる。つまり、荷重の増加とともに変形量がほぼ均等に増加していることから、試験体の両側壁は、ひび割れ荷重までほぼ同じ挙動により変形していることが確認できる。なお、ひび割れは、写真 4.1、写真 4.2 及び図 4.4 に示すとおり、試験体の底版部のハンチ近傍に発生した。しかし、最大曲げモーメントが発生する底版部には想定とおりに発生したが、同様に最大曲げモーメントが発生する側壁部には、発生することはなかった。ひび割れは、試験体の断面には、片側 3 箇所とその反対側には 2 箇所に発生しており、ひび割れ長さは、18mm～48mm であった。ひび割れ幅は、クラックスケールで計測した結果、約 0.3mm であった。今回発生させたひび割れ幅は、農業水利施設の機能保全の手引きの鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表では、健全度ランクが S-4 に該当 [4] することになる。

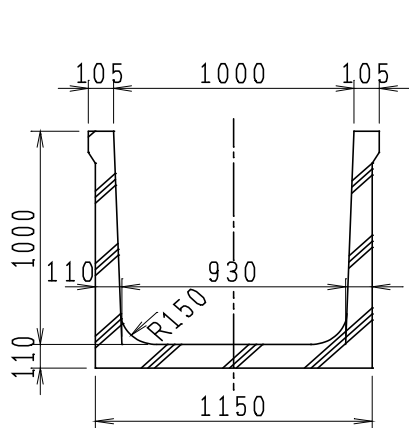


図 4.1 試験体の断面図

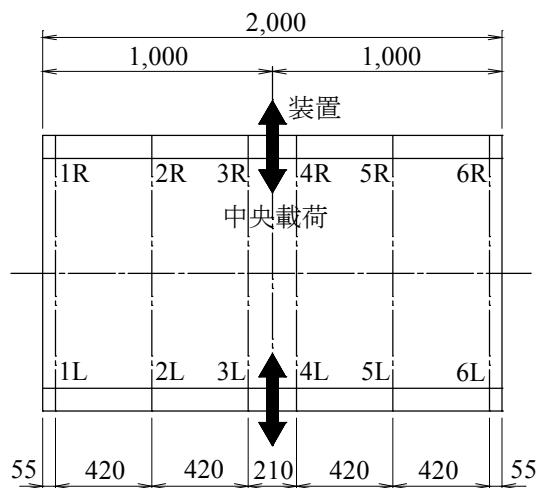
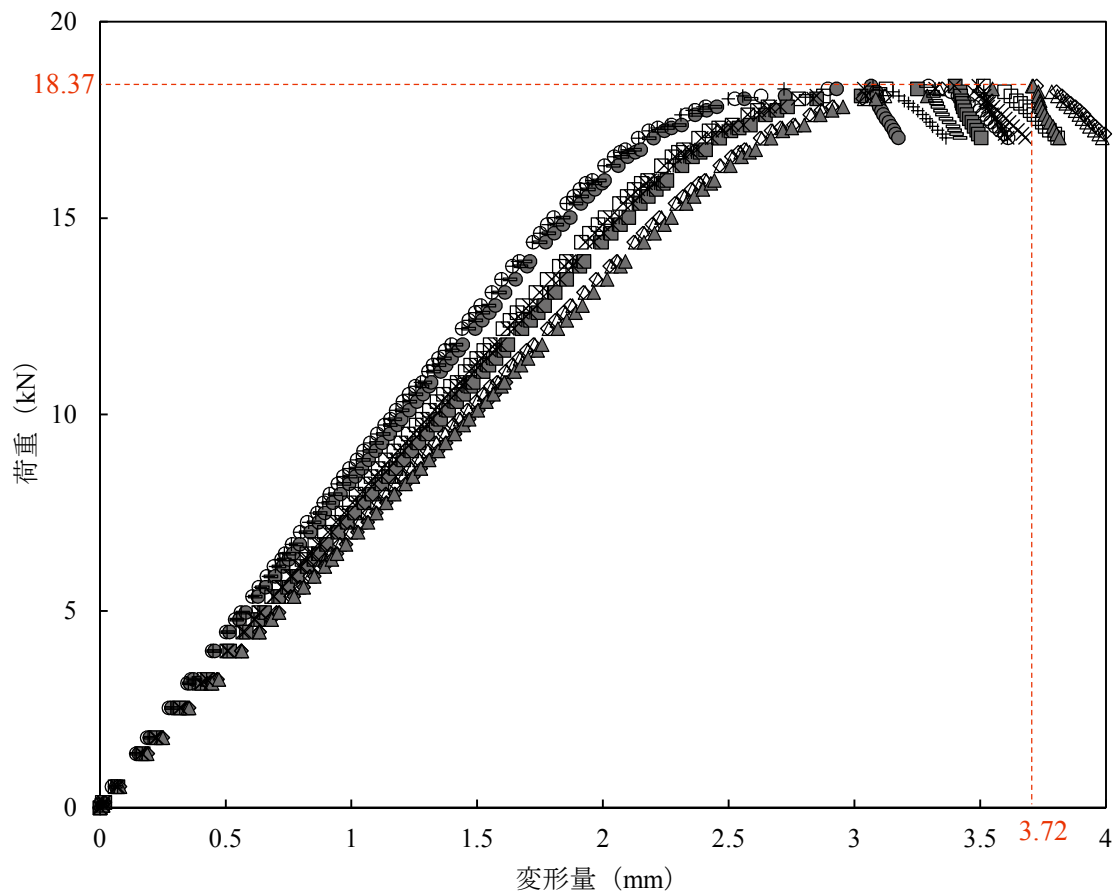


図 4.2 変位計の設置状況



○1R : $y=6.49x$ $R^2=0.70$	●1L : $y=6.84x$ $R^2=0.85$	□2R : $y=6.02x$ $R^2=0.76$	■2L : $y=6.14x$ $R^2=0.86$
◇3R : $y=5.61x$ $R^2=0.82$	◆3L : $y=5.65x$ $R^2=0.86$	△4R : $y=6.09x$ $R^2=0.82$	▲4L : $y=6.09x$ $R^2=0.83$
×5R : $y=6.09x$ $R^2=0.82$	*5L : $y=6.09x$ $R^2=0.83$	+1R : $y=6.58x$ $R^2=0.77$	-1R : $y=6.79x$ $R^2=0.78$

図 4.3 ひび割れ荷重と変形量の関係

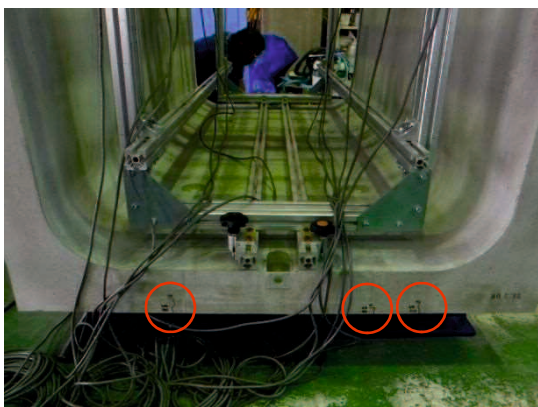


写真 4.1 ひび割れ状況

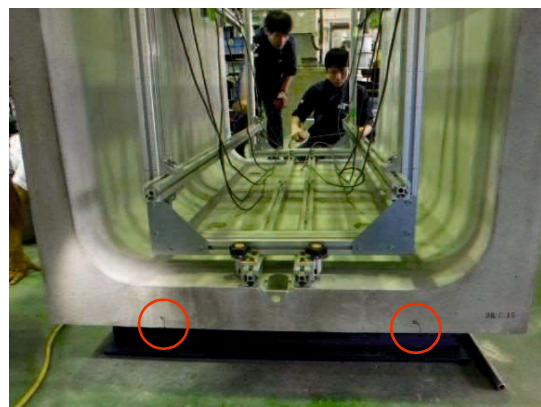


写真 4.2 ひび割れ状況

表 4.2 ひび割れ発生時の最大荷重と変形量

最大荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
18.37kN	3.29mm	3.07mm	3.51mm	3.40mm	3.72mm	3.68mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	3.71mm	3.71mm	3.40mm	3.49mm	3.07mm	3.29mm

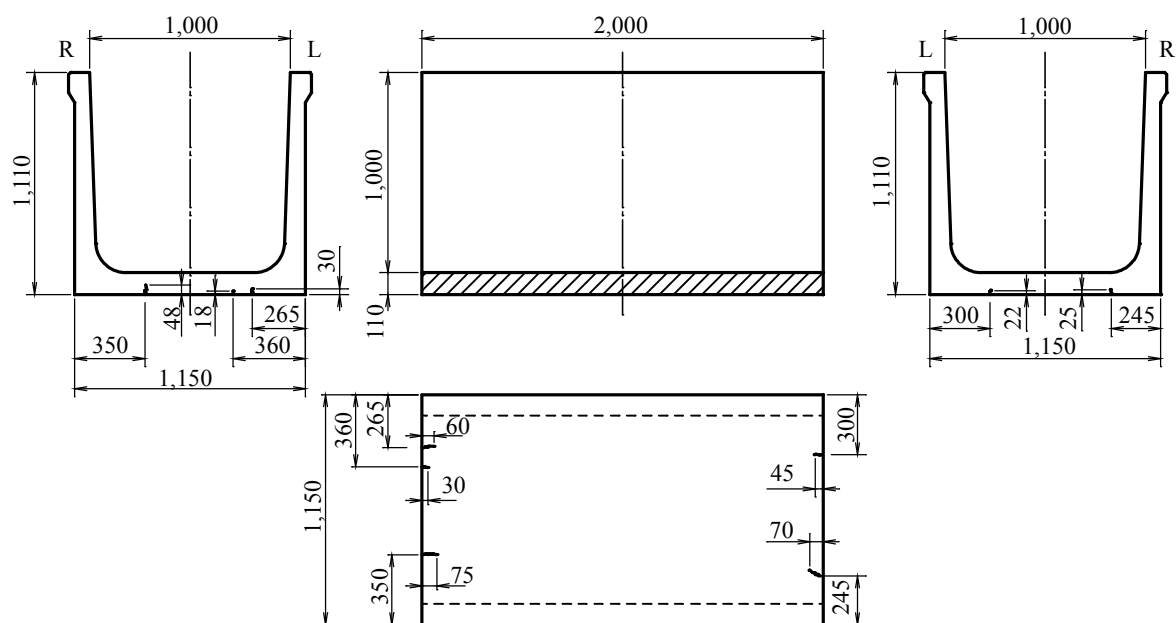


図 4.4 試験体に発生したひび割れ詳細図

### 4.3.2 試験方法

試験体に発生する変形量は、試験体の側壁頂部に設置した水路壁載荷装置によって徐々に載荷することで計測した。水路壁載荷装置は、試験体の長手方向中央部に設置した。載荷する方向は、試験体の内面側から外面側に載荷する内面載荷と試験体の外面側から内面側に載荷する外面載荷の2方向とし、載荷速度はハンドル1回転当たり60秒程度とした。試験条件を表4.3に示す。また、変位計は、図4.5に示す位置に設置した。なお、変位計は接触式（東京測器研究所CDP25、非直線性0.1%RO）を使用した。試験の実施状況を写真4.3及び写真4.4に示す。

表 4.3 試験条件

条件	状態	亀裂の状況		載荷方向	装置位置
		幅	位置		
1	健全	—	—	内面	中央
2		—	—	外面	
3	ひび割れ	約 0.3mm	底板部の中央付近及び両ハンチ付近 (図 4.4)	内面	
4				外面	

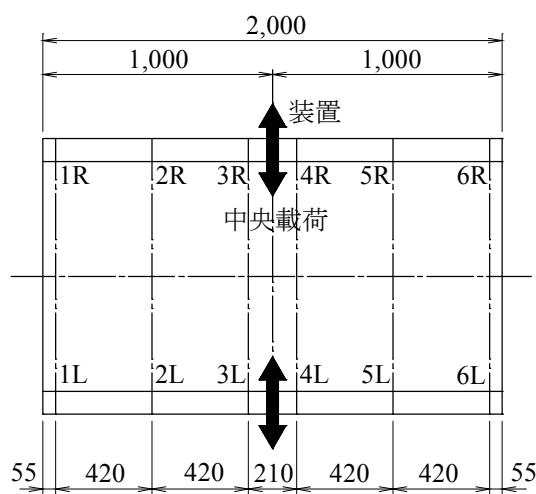


図 4.5 変位計の設置状況



写真 4.3 試験の実施状況



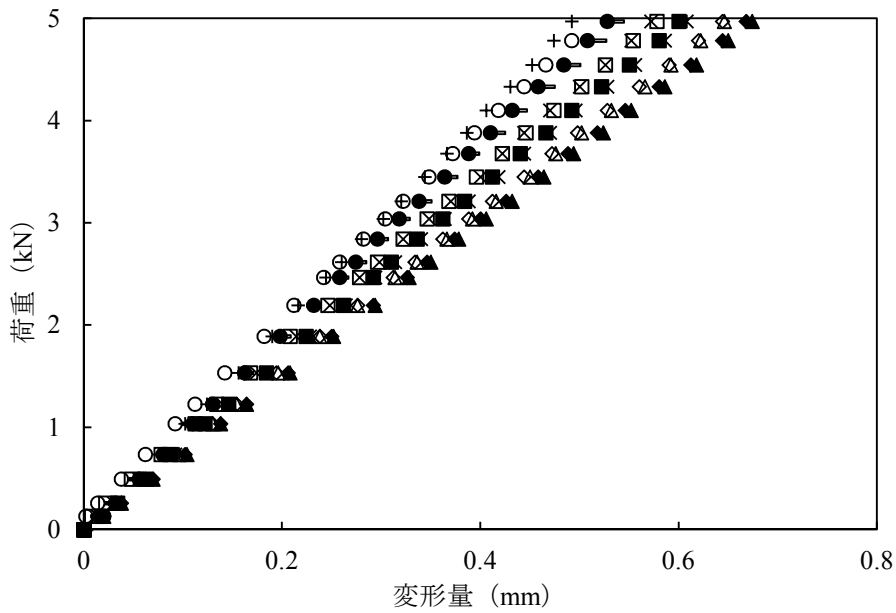
写真 4.4 試験の実施状況

#### 4.3.3 試験結果

試験結果は、図 4.6～図 4.9、表 4.4～表 4.7 に示すとおり、ひび割れの有無に関わらずすべての試験条件において、R 側の変位計と L 側の変位計は、ほぼ同じ値を示したことから、試験体側壁における長手方向の挙動は荷重装置の設置軸を中心に対称となる結果となった。ここで、各変位計における R と L の荷重と変形量の傾きと変形量の平均値をまとめた結果を表 4.8 に示す。内面荷重による条件 1（健全）と条件 3（ひび割れ）における荷重と変形量の傾きを比較した結果、約 1.2 倍の差が生じた。一方、外面荷重による条件 2（健全）と条件 4（ひび割れ）の荷重と変形量の傾きを比較すると、約 1.5 倍の差が生じた。条件 4 の傾きが条件 3 よりも大きくなったのは、条件 4 の外面荷重では、荷重の増加とともにフリーム外面のひび割れが開こうとする方向に作用するため、ひび割れが閉じ、さらに圧縮される条件 3 の内面荷重よりも同一荷重による変形が大きくなったためであると考えられる。

今回、ひび割れを発生させた鉄筋コンクリートフリームに対して水路壁荷重法による試験を実施した結果、底版の外面に健全性を損なうようなひび割れが発生した場合でも、荷重と変形量の傾き及び同一荷重における変形量は、健全な場合（新品）と比較して差が生じることを確認した。

以上から、水路壁荷重法は、内面からの目視調査では確認できない開水路外面部にひび割れが発生したコンクリート開水路について、健全性を評価することができる。



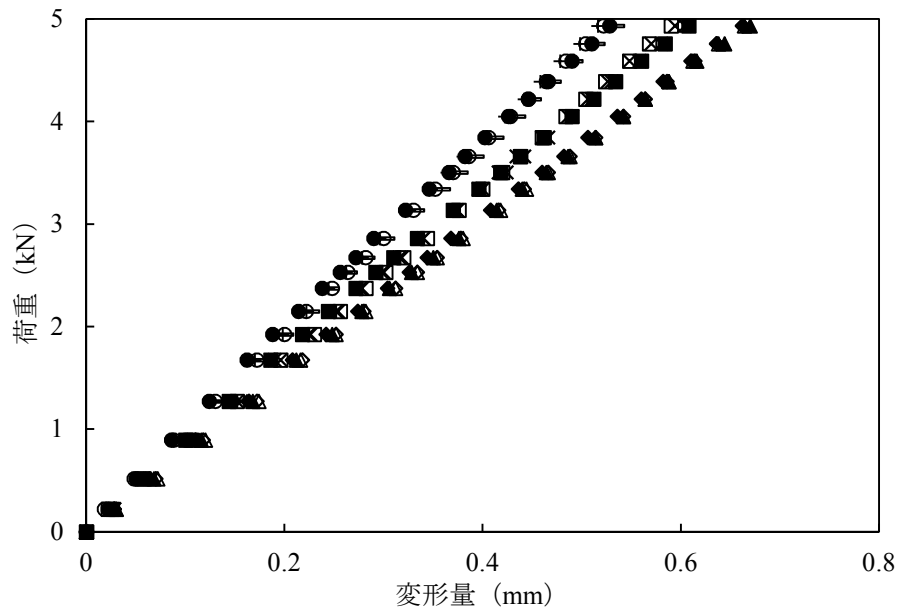
○1R : $y=9.92x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=9.46x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=8.70x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=8.32x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=7.77x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.48x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=7.72x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.41x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=8.71x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=8.24x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=10.07x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=9.29x$ $R^2=0.99$

図 4.6 荷重と変形量の関係 (条件 1:内面載荷)

表 4.4 5kN 時における変形量 (条件 1:内面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.51mm	0.53mm	0.58mm	0.60mm	0.64mm	0.67mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.65mm	0.67mm	0.57mm	0.61mm	0.49mm	0.54mm



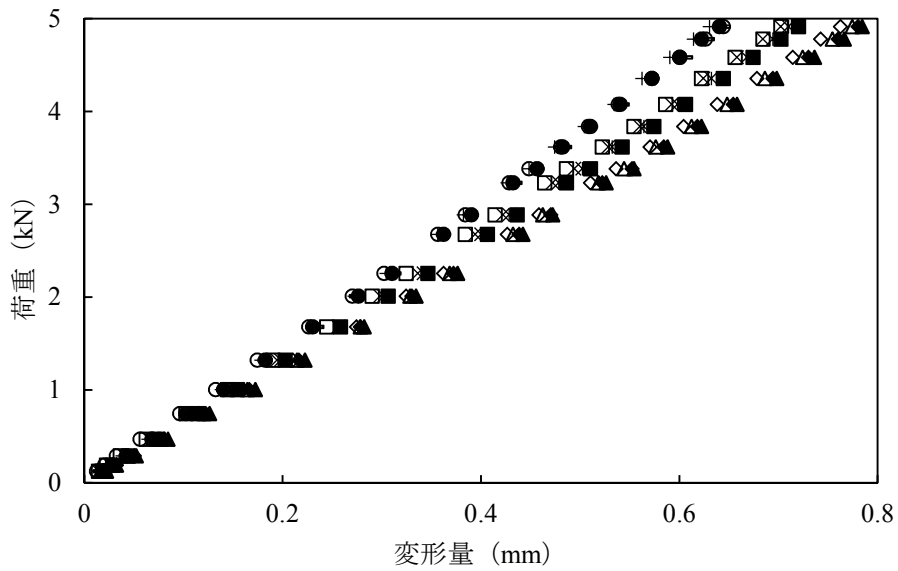


○1R :  $y=9.49x$   $R^2=0.99$  ●1L :  $y=9.53x$   $R^2=0.99$  □2R :  $y=8.37x$   $R^2=0.99$  ■2L :  $y=8.31x$   $R^2=0.99$   
◇3R :  $y=7.51x$   $R^2=0.99$  ◆3L :  $y=7.58x$   $R^2=0.99$  △4R :  $y=7.50x$   $R^2=0.99$  ▲4L :  $y=7.49x$   $R^2=0.99$   
×5R :  $y=8.37x$   $R^2=0.99$  \*5L :  $y=8.29x$   $R^2=0.99$  +6R :  $y=9.60x$   $R^2=0.99$  -6L :  $y=9.31x$   $R^2=0.99$

図 4.7 荷重と変形量の関係 (条件 2:外面載荷)

表 4.5 5kN 時における変形量 (条件 2:外面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.52mm	0.53mm	0.59mm	0.61mm	0.66mm	0.66mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.66mm	0.67mm	0.59mm	0.60mm	0.52mm	0.54mm

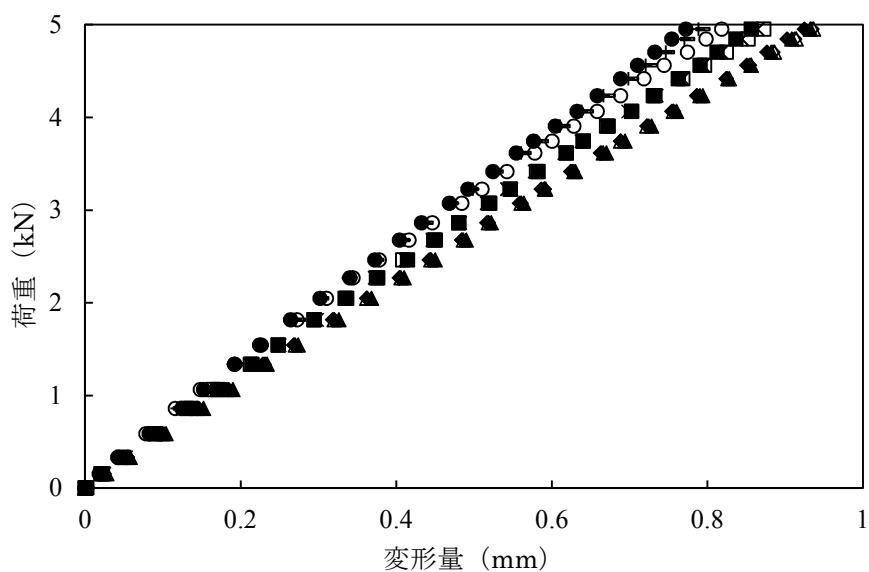


○1R : $y=7.60x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=7.57x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=6.98x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=6.74x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=6.39x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=6.24x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=6.30x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=6.19x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=6.92x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=6.83x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=7.68x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=7.53x$ $R^2=0.99$

図 4.8 荷重と変形量の関係 (条件 3:内面載荷)

表 4.6 5kN 時における変形量 (条件 3 : 内面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.66mm	0.65mm	0.72mm	0.73mm	0.78mm	0.80mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.79mm	0.80mm	0.72mm	0.73mm	0.64mm	0.66mm



○1R : $y=6.21x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=6.49x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=5.81x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=5.84x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=5.40x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=5.42x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=5.39x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=5.38x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=5.83x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=5.83x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=6.40x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=6.36x$ $R^2=0.99$

図 4.9 荷重と変形量の関係 (条件 4:外面載荷)

表 4.7 5kN 時における変形量 (条件 4 : 外面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.83mm	0.78mm	0.89mm	0.87mm	0.95mm	0.94mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.95mm	0.95mm	0.88mm	0.89mm	0.80mm	0.81mm

表 4.8 各条件における変位計の R と L を平均した荷重と変形量の傾きと変形量

载荷方向		内面载荷		外面载荷	
条件		1	3	2	4
試験体の状態		健全	ひび割れ	健全	ひび割れ
変位計 1	傾き	$y=9.69x$	$y=7.59x$	$y=9.51x$	$y=6.35x$
	変形量 (mm)	0.52	0.66	0.53	0.81
傾きの変化* (倍)		1.28		1.50	
変位計 2	傾き	$y=8.51x$	$y=6.86x$	$y=8.34x$	$y=5.83x$
	変形量 (mm)	0.59	0.73	0.60	0.88
傾きの変化* (倍)		1.24		1.43	
変位計 3	傾き	$y=7.63x$	$y=6.32x$	$y=7.55x$	$y=5.41x$
	変形量 (mm)	0.66	0.79	0.66	0.95
傾きの変化* (倍)		1.21		1.40	
変位計 4	傾き	$y=7.57x$	$y=6.25x$	$y=7.50x$	$y=5.39x$
	変形量 (mm)	0.66	0.80	0.67	0.95
傾きの変化* (倍)		1.21		1.39	
変位計 5	傾き	$y=8.49x$	$y=6.88x$	$y=8.33x$	$y=5.83x$
	変形量 (mm)	0.59	0.73	0.60	0.89
傾きの変化* (倍)		1.23		1.43	
変位計 6	傾き	$y=9.68x$	$y=7.61x$	$y=9.68x$	$y=6.38x$
	変形量 (mm)	0.52	0.65	0.52	0.81
傾きの変化* (倍)		1.27		1.52	

※傾きの変化は、以下のように計算した数値である。

内面载荷：条件 1（健全）／条件 3（ひび割れ）

外面载荷：条件 2（健全）／条件 4（ひび割れ）

## 4.4 貫通ひび割れモデルによる検証

### 4.4.1 試験体

試験体は、鉄筋コンクリート大型フリーム（農業土木事業協会型）の張り出し無しタイプとし、その寸法は、内空幅 1,000mm、内空高さ 1,000mm、長さは 2,000mm である。

貫通ひび割れは、試験体の L 側における変位計 2 と変位計 3 の間に発生させた。その方法は、鉄筋を損傷させないように小径コアにて約 200mm 程度の間隔で 5 箇所削孔し、削孔した孔にひび割れ誘発アンカー（ボルトを締結することで、アンカーの外径が拡張することでひび割れを誘発させる構造）を挿入し、頂部の孔から順番にひび割れを発生させた。作業状況を写真 4.5～写真 4.8 に示す。なお、ひび割れの発生域は、図 4.10 に示すとおり側壁頂部からハンチ上までとしたが、側壁上面部にもひび割れが発生したため、ハンチ付近より上は、貫通したひび割れが発生した状態である。なお、ひび割れ幅は約 0.3mm となり、これは、農業水利施設の機能保全の手引きの鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表では、健全度ランクが S-4 に該当 [4] することになる。



写真 4.5 小径コアによる削孔状況



写真 4.6 ひび割れ誘発アンカー



写真 4.7 ボルト締結状況



写真 4.8 ひび割れ発生状況

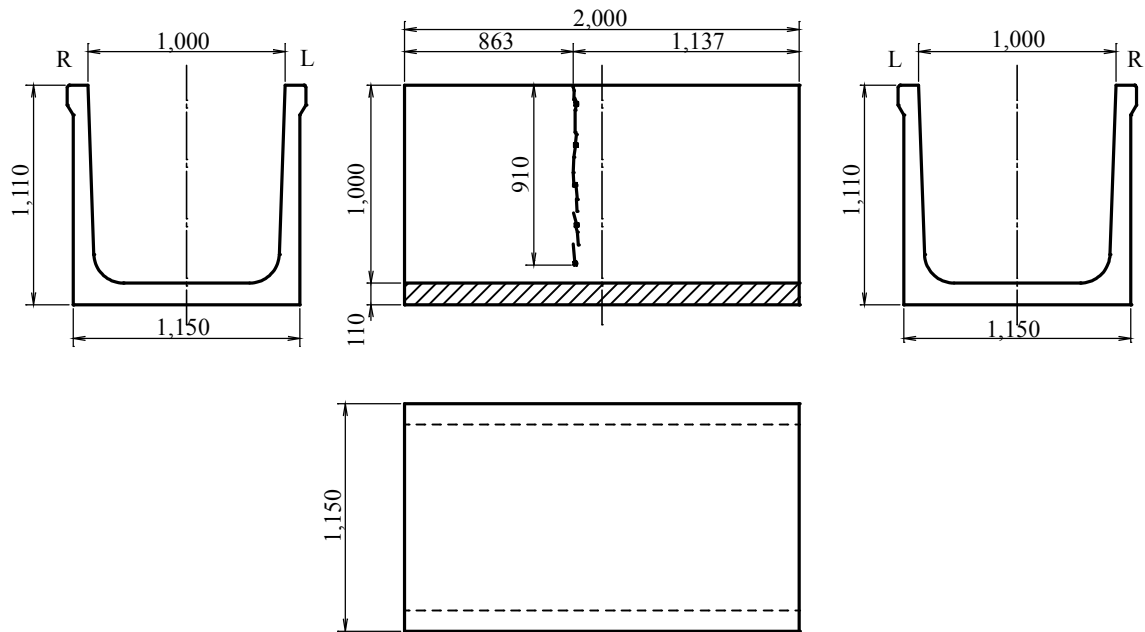


図 4.10 試験体に発生したひび割れ詳細図

#### 4.4.2 試験方法

試験体に発生する変形量は、側壁頂部に設置した水路壁載荷装置によって徐々に载荷することで計測した。水路壁載荷装置は、試験体の長手方向中央部（ひび割れ部を外した位置に装置を設置）に設置した。载荷する方向は内面载荷と外面载荷の2方向とし、载荷速度は、ハンドル1回転当たり60秒程度とした。試験条件を表4.9に示す。

変位計の設置は、4.3.2の図4.5に示す位置とした。なお、変位計は接触式（東京測器研究所 CDP25、非直線性 0.1%RO）を使用した。

表 4.9 試験条件

条件	状態	ひび割れの状況		载荷方向	装置位置
		幅	位置		
1	健全	—	—	内面	中央
2		—	—	外面	
3	ひび割れ	約 0.3mm	試験体中央の側壁（L側のみ） 及び側壁頂部の貫通ひび割れ	内面	
4				外面	

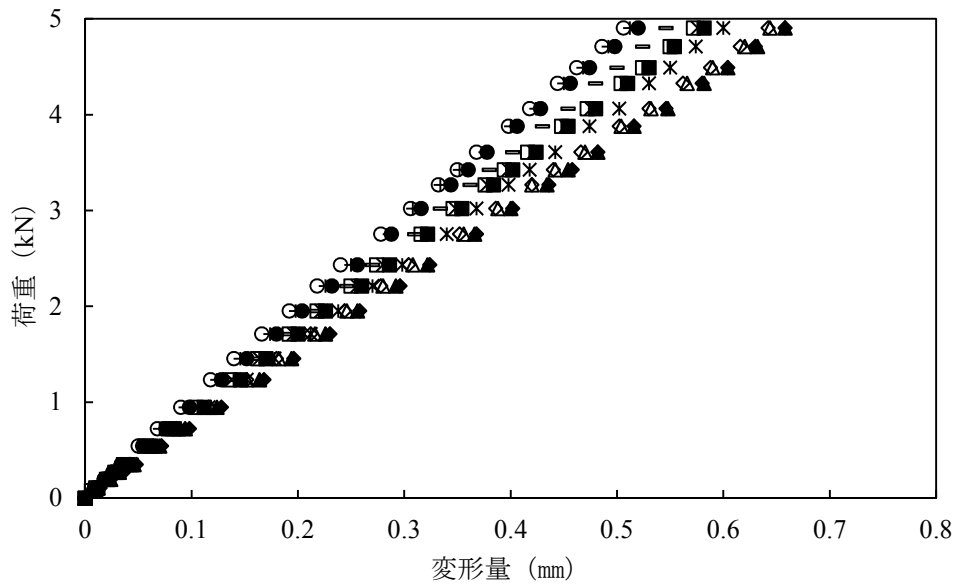
#### 4.4.3 試験結果

試験結果は、図 4.11～図 4.14、表 4.10～表 4.13 に示すとおり、すべての試験条件において、R 側の変位計と L 側の変位計は、ほぼ同じ値を示したことから、試験体側壁における長手方向の挙動は載荷装置の設置軸を中心に対称となることを確認した。ここで、ひび割れを発生させた L 側の変位計における荷重と変形量の傾きと変形量の平均値をまとめた結果を表 4.14 に示す。

内面載荷による条件 1（健全）と条件 3（ひび割れ）の荷重と変形量の傾きを比較すると、変位計 6 以外は大きな差は確認されなかった。外面載荷による条件 2（健全）と条件 4（ひび割れ）の荷重と変形量の傾きについては、内面載荷と同様に変位計 6 以外は大きな差は確認されなかった。特に、変位計 3 と変位計 4 の間にひび割れが発生しているため、荷重の載荷に伴い、傾きや変形量に差が生じることが想定されたが、ほぼ同じ挙動をする結果となった。また、載荷方向における差もほとんど発生していない結果であった。

貫通したひび割れについては、フリュームが無筋コンクリートの場合は、側壁部に荷重を負荷させた時に発生する変形は、ひび割れ部における骨材の噛み合わせ効果により一定荷重までは抑制しようとするが、最終的には骨材による噛み合わせ効果が低下し、ひび割れ部を境に別々の挙動をすることになる。一方、今回使用したフリュームは鉄筋コンクリートであるため、フリューム内の鉄筋が、側壁部に作用した荷重による変形を抑制する拘束効果を発揮し、一体変形することから、ひび割れが発生していても、荷重と変形量の傾きに与える影響は小さい。

以上から、フリュームの側壁部に貫通ひび割れが発生していても、弾性領域内では一体変形するとともに、健全な場合（新品）とほぼ同じ挙動を示すことを確認した。つまり、鉄筋が健全な状態であれば、コンクリート開水路の側壁に貫通ひび割れ発生している場合でも、荷重と変形量の傾きに与える影響は小さい。



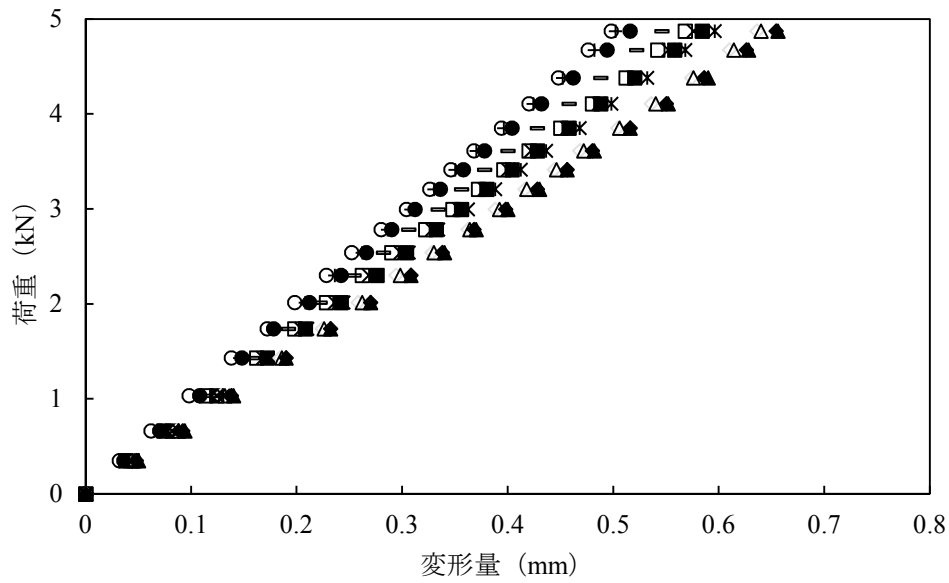
○1R : $y=9.80x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=9.50x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=8.66x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=8.50x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=7.74x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.47x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=7.70x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.49x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=8.57x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=8.18x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=9.66x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=8.99x$ $R^2=0.99$

図 4.11 荷重と変形量の関係 (条件 1:内面載荷)

表 4.10 5kN 時における変形量 (条件 1:内面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.52mm	0.53mm	0.59mm	0.60mm	0.66mm	0.68mm
	変位計 4R	変位計 4L	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.66mm	0.68mm	0.59mm	0.61mm	0.52mm	0.56mm



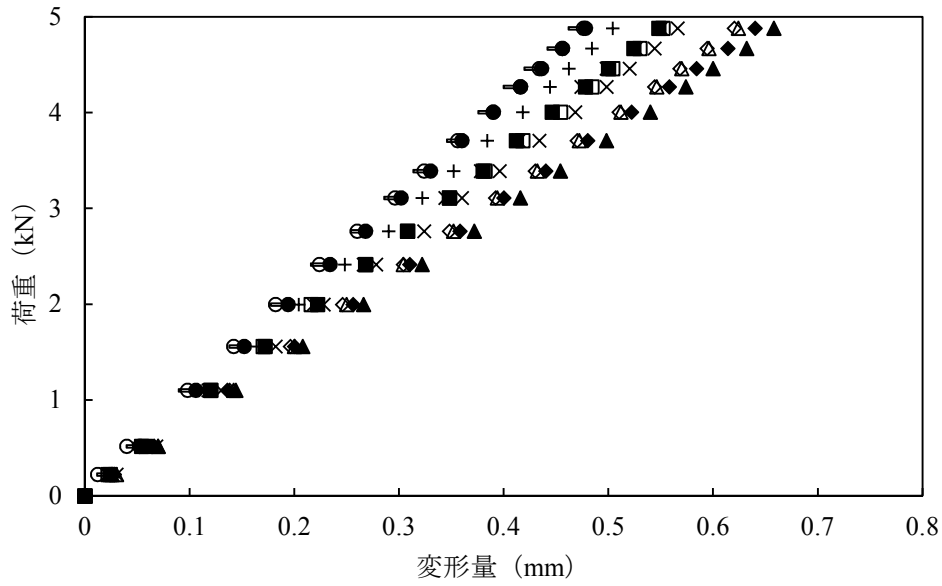


○1R : $y=9.85x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=9.51x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=8.61x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=8.39x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=7.68x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.48x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=7.64x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.46x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=8.48x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=8.25x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=9.72x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=8.99x$ $R^2=0.99$

図 4.12 荷重と変形量の関係 (条件 2:外面載荷)

表 4.11 5kN 時における変形量 (条件 2 : 外面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.51mm	0.53mm	0.59mm	0.60mm	0.66mm	0.67mm
	変位計 4R	変位計 4L	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.66mm	0.67mm	0.59mm	0.61mm	0.52mm	0.56mm

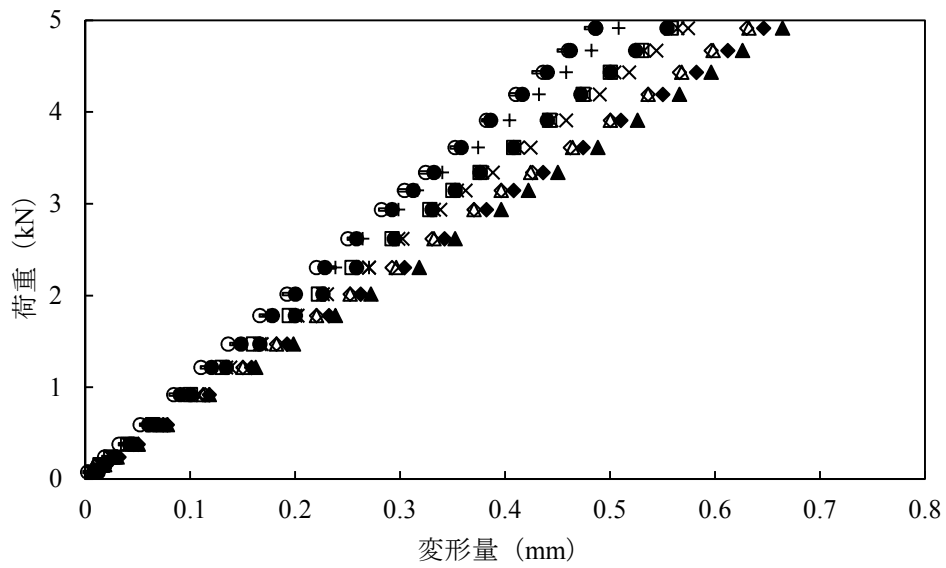


○1R : $y=10.35x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=10.25x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=8.87x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=8.94x$ $R^2=0.99$
◇3R : $y=7.88x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.67x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=7.84x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.43x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=8.59x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=8.95x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=9.64x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=10.52x$ $R^2=0.99$

図 4.13 荷重と変形量の関係 (条件 3:内面載荷)

表 4.12 5kN 時における変形量 (条件 3 : 内面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.50mm	0.50mm	0.57mm	0.57mm	0.64mm	0.66mm
	変位計 4R	変位計 4L	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.65mm	0.68mm	0.59mm	0.57mm	0.52mm	0.49mm



○1R : $y=10.25x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=10.09x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=8.88x$ $R^2=0.99$	■2L : $y=8.89x$ $R^2=1$
◇3R : $y=7.86x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.64x$ $R^2=0.99$	△4R : $y=7.83x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.42x$ $R^2=0.99$
×5R : $y=8.59x$ $R^2=0.99$	*5L : $y=8.79x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=9.74x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=10.23x$ $R^2=0.99$

図 4.14 荷重と変形量の関係 (条件 4: 外面載荷)

表 4.13 5kN 時における変形量 (条件 4: 外面載荷)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.50mm	0.50mm	0.57mm	0.57mm	0.64mm	0.66mm
	変位計 4R	変位計 4L	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.65mm	0.68mm	0.59mm	0.58mm	0.52mm	0.49mm

表 4.14 各条件におけるL側の変位計の荷重と変形量の傾きと変形量

荷重方向		内面荷重		外面荷重	
条件		1	3	2	4
試験体の状態		健全	ひび割れ	健全	ひび割れ
変位計 1	傾き	$y=9.50x$	$y=10.25x$	$y=9.51x$	$y=10.09x$
	変形量 (mm)	0.53	0.50	0.52	0.50
傾きの変化* (倍)		0.93		0.94	
変位計 2	傾き	$y=8.51x$	$y=8.94x$	$y=8.39x$	$y=8.89x$
	変形量 (mm)	0.60	0.57	0.60	0.57
傾きの変化* (倍)		0.95		0.94	
変位計 3	傾き	$y=7.47x$	$y=7.67x$	$y=7.48x$	$y=7.64x$
	変形量 (mm)	0.67	0.65	0.67	0.65
傾きの変化* (倍)		0.97		0.98	
変位計 4	傾き	$y=7.49x$	$y=7.43x$	$y=7.46x$	$y=7.42x$
	変形量 (mm)	0.67	0.67	0.67	0.67
傾きの変化* (倍)		1.01		1.01	
変位計 5	傾き	$y=8.18x$	$y=8.95x$	$y=8.25x$	$y=8.79x$
	変形量 (mm)	0.60	0.58	0.60	0.59
傾きの変化* (倍)		0.91		0.94	
変位計 6	傾き	$y=8.99x$	$y=10.52x$	$y=8.99x$	$y=10.23x$
	変形量 (mm)	0.54	0.51	0.54	0.51
傾きの変化* (倍)		0.85		0.88	

※傾きの変化は、以下のように計算した数値である。

内面荷重：条件 1（健全）／条件 3（ひび割れ）

外面荷重：条件 2（健全）／条件 4（ひび割れ）

#### 4.5 第4章の結論

本章では、ひび割れを発生させたプレキャスト製コンクリートフリームによる外圧試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① フリームの外面底版部にひび割れを発生させ試験体における荷重と変形量の関係は、弾性領域内においては線形であることを確認した。また、フリームの側壁部に貫通ひび割れを発生させた試験体においても同様であった。
- ② フリームの外面底版部にひび割れを発生させ試験体における荷重と変形量の傾きは、健全品よりも内面載荷で約 1.2 倍、外面載荷で約 1.5 倍の差が生じることを確認した。内面載荷では、荷重の増加とともにフリームの外面に発生させたひび割れが、開こうとする方向に作用するため、ひび割れが閉じ、さらに圧縮される内面載荷よりも同一荷重による変形が大きくなった。
- ③ 水路内面から目視確認できないひび割れが発生したフリームにおいて、水路壁載荷法により異常を検知することができる。
- ④ フリームの側壁部に貫通ひび割れを発生させた試験体の荷重と変形量の傾きは、鉄筋が健全な状態であれば、健全品とほぼ同等である。
- ⑤ 貫通ひび割れが発生したフリームについては、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係に差が生じなければ、鉄筋は健全であると考えられるため、本手法は鉄筋の健全性を検知できる可能性がある。

#### 第4章の参考文献

- [1] 森充広, 渡嘉敷勝, 長束勇, 石村英明: 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, No.230, pp.123-130, 2004
- [2] 岩野聡史, 極檀邦夫, 堺友昭: 衝撃弾性波によるコンクリート内部欠陥探査, コンクリート工学会年次論文集, Vol.24, No.1, pp.1521-1526, 2002
- [3] 農林水産省農村振興局整備部設計課: 農業水利施設の長寿命化のための手引き, 2015
- [4] 農林水産省: 農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」, 2016

## 第5章 埋設されたコンクリート開水路を対象とした構造安全性評価

### 5.1 概要

本章では、埋設環境下における鉄筋コンクリートフリームにおける荷重と変形量を計測し、健全な鉄筋コンクリートフリームとの比較を行った。

まず、鳥取県鳥取市の大井手土地改良区内で供用されている鉄筋コンクリートフリームについて、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係を計測した。本フリームは、均一に締固められた状態ではない条件において、フリーム内に滞留水がある場合とない場合について検証を行った結果、載荷方向並びに水の有無に関係無く、荷重と変形量の傾き及び変形量は同等であることを確認した。

次に、同路線内の複数箇所での荷重と変形量の関係を計測した結果、変形量並びに荷重と変形量の傾きは、大きな差が生じなかったことから、計測延長内の当該開水路は、健全である結果であった。これから、実現場においても水路壁載荷法を適用することができることを確認した。

更に、国立大学法人鳥取大学の敷地内において、基礎材を均一に締固めた埋設環境下における鉄筋コンクリートフリームについて、埋設後における荷重と変形量の傾きの径時変化を確認した結果、埋設1日後の荷重と変形量の傾きは、埋設前と比較して載荷方向に関係なく約6割程度変形し難い結果であった。これは、埋戻し土の締固めによる反力の影響によるものだと考える。

また、埋設4ヶ月後の荷重と変形量の傾きは、埋設1日後と比較して、内面載荷で約2割程度変形し難くなり、外面載荷で約1割変形しやすい結果となった。これは、埋戻し土の締固めが進行したことにより基礎材が自立したことによるものだと考える。また、同フリームの底版にひび割れを発生させた後、荷重と変形量の傾きを確認した結果、ひび割れ発生前と比較して約2倍の差が生じることを確認した。

よって、コンクリート開水路の内面から確認できないひび割れが発生している場合、水路壁載荷法により異常を検知することができることを明らかにした。

## 5.2 現地に埋設されたコンクリート開水路に対する検証

### 5.2.1 試験体

本研究で対象とした試験体は、鳥取県鳥取市の大井手土地改良区が管理している鉄筋コンクリート大型フリーム（農業土木事業協会規格）である。試験体のサイズは、内空幅 1,800mm、内空高さ 800mm であり、R 形状（R=100mm）のハンチを有するフリームである。試験体の概要は、表 5.1 に示すとおりである。試験体が設置されている環境としては、試験体の両側は、図 5.1 及び写真 5.1 に示すとおり側壁頂部まで発生土で埋設された状態である。なお、今回、落水時に試験を実施したため、試験体内には、水が流れていない（滞水していない）が、底版部は湿潤状況下である場合と試験体の上下流を合板とパイプサポートで堰き止めた後、水中ポンプにて試験体内に水を充水させた場合の 2 種類について検証した。充水させた時の水深は、約 50cm（6 割水深）であった（写真 5.2）。

表 5.1 試験体の概要

内空部の幅 (mm)	1,800
内空部の高さ (mm)	800
頂部の壁厚 (mm)	100
有効長 (mm)	2,000
ハンチ	有 (R 形状)
水路の背面状況	未舗装 (発生土)

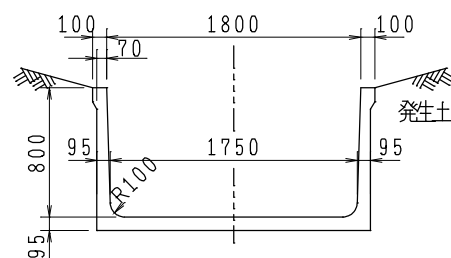


図 5.1 試験体の設置環境概要図



写真 5.1 充水状況に全体図



写真 5.2 充水状況（水深約 50cm）



### 5.2.2 試験方法

水路壁載荷法による試験体の側壁部に発生する変形量は、接触式変位計（東京測器研究所製 CDP25，非直線性 0.1%RO），荷重は、水路壁載荷装置に内蔵したロードセル（東京測器研究所製 TCLM-20KNB，非直線性 0.05%RO）にて測定した。載荷速度は 50N/sec を目安とし、測定間隔は 0.1 秒とした。水路壁載荷装置及び変位計の設置箇所は、図 5.2 及び表 5.2 に示すとおりである。変位計を載荷装置に組み込んだ場合、荷重によって載荷装置に生じる変形が変位測定に影響を及ぼすことから、載荷装置と変位計を分離して設置した。このとき、水路壁載荷装置の近傍に設置する変位計 1 は、設置に必要な離隔距離が 105mm となった。変位計 2 と変位計 3 の設置箇所は、試験体半分を対象とした 3 等分となる位置を目安に設定した。載荷方向は、内面載荷及び外面載荷とした。なお、変位計は、底版に不動点を持たず、両側壁の両端に固定されているため、両側壁に発生した変形量の合計を測定する構造である。

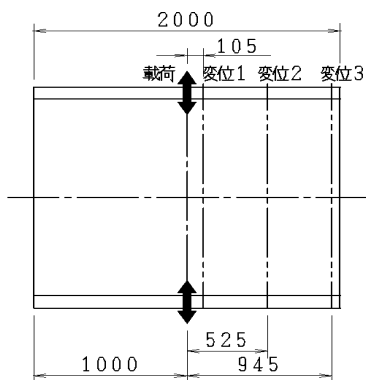


図 5.2 載荷装置と変位計の設置概要図

表 5.2 試験条件

載荷位置	載荷方向	変位計の位置 (装置からの距離)	
中央	内面載荷 外面載荷	変位計 1	105mm
		変位計 2	525mm
		変位計 3	945mm



写真 5.3 水路壁載荷装置の設置状況



写真 5.4 水路壁載荷装置の設置状況

### 5.2.3 試験結果

水路壁載荷装置を試験体の中央に設置した時の内面及び外面載荷より得られた荷重と変位量の関係を図 5.3 及び図 5.4 に示す。試験体内の水の有無に関係なく、内面及び外面載荷ともに、荷重と変位量の関係は線形性を有することを確認した。荷重と変位量の傾きは、試験体内に水がない場合は、変位計 1 では、内面載荷の場合は 12.20 (kN/mm)、外面載荷の場合は 10.75 (kN/mm) であり、試験体内に水がある場合は、内面載荷の場合は 12.92 (kN/mm)、外面載荷の場合は 12.18 (kN/mm) であった。また、表 5.3 と表 5.4 に 3kN 時における変形量を示しているが、地上部における試験結果と同様に、載荷方向に影響を受けないことを確認することができた。

試験体は埋設された状態であるため、地盤反力の影響を受ける内面載荷の方が外面載荷よりも大きな荷重、つまり荷重と変形量の傾きが大きくなると想定していたが、本実験で評価した試験体及び埋設状況下においては、比較的影響が小さく、第 4 章で実施した陸の上での試験結果と同様であった。これは、試験体外面の埋戻し材は発生土であり、埋戻し土の締固めが一定ではない状況で埋設されていることも影響していると考えられる。

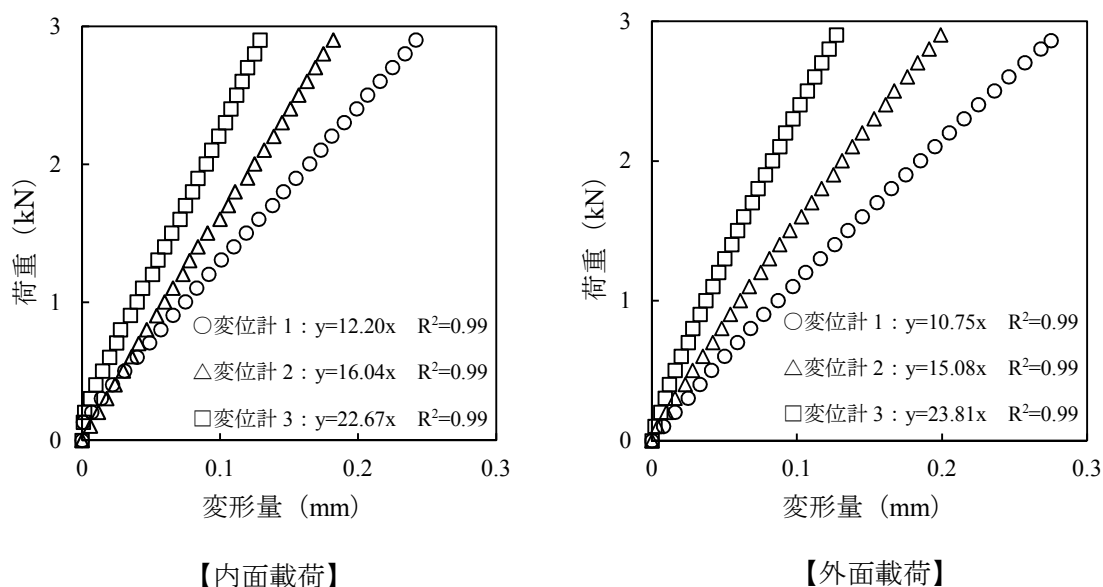
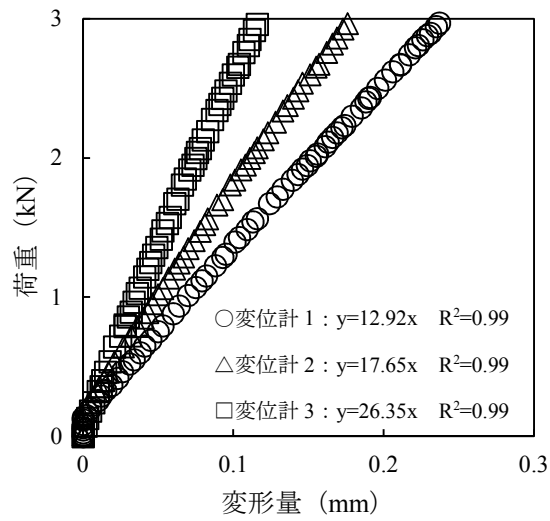


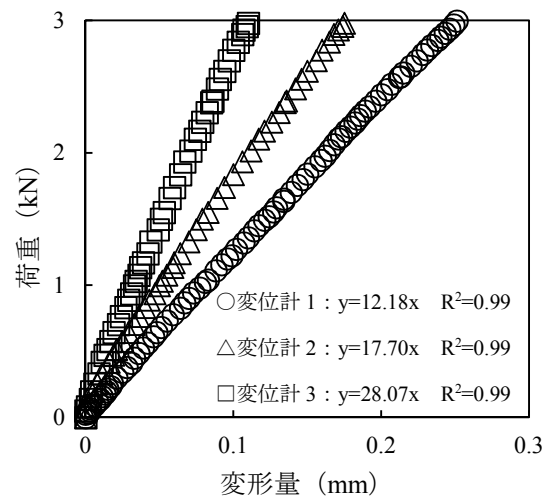
図 5.3 試験体内に水が無い場合の荷重と変形量の関係

表 5.3 試験体内に水が無い場合の 3kN 時の変形量

載荷位置	変位計の位置 (装置から離隔距離)		3kN 時の変位量	
			内面載荷	外面載荷
中央	変位計 1	105mm	0.244mm	0.242mm
	変位計 2	525mm	0.184mm	0.162mm
	変位計 3	945mm	0.099mm	0.098mm



【内面載荷】



【外面載荷】

図 5.4 試験体内に水が有る場合の荷重と変形量の関係

表 5.4 試験体内に水が有る場合の 3kN 時の変形量

荷重 位置	変位計の位置 (装置から離隔距離)		3kN 時の変形量	
			内面載荷	外面載荷
中央	変位計 1	105mm	0.240mm	0.252mm
	変位計 2	525mm	0.178mm	0.177mm
	変位計 3	945mm	0.118mm	0.111mm

### 5.3 複数箇所を測定した試験体の評価

5.2 と同一路線内の複数箇所における試験体の荷重と変形量の関係を確認することで、水路壁載荷法の現場適用性を評価するとともに、測定結果を評価する方法について検証を行った。

#### 5.3.1 試験方法

水路壁載荷法による試験体の側壁部に発生する変形量は、接触式変位計（東京測器研究所製 CDP25，非直線性 0.1%RO），荷重は、水路壁載荷装置に内蔵したロードセル（東京測器研究所製 TCLM-20KNB，非直線性 0.05%RO）にて測定した。水路壁載荷装置は、試験体長手方向の中央部に設置し、荷重の大きさは 3kN とし、載荷速度は 50N/sec 程度とした。変位計は、水路壁載荷装置から 105mm 離れた両側の位置に設置した。試験実施状況を写真 5.5 及び写真 5.6，装置及び変位計の設置概要を図 5.5 に示す。なお、変位計は、底版に不動点を持たず、両側壁の両端に固定されているため、両側壁に発生した変形量の合計を測定する構造である。



写真 5.5 試験実施状況



写真 5.6 試験実施状況

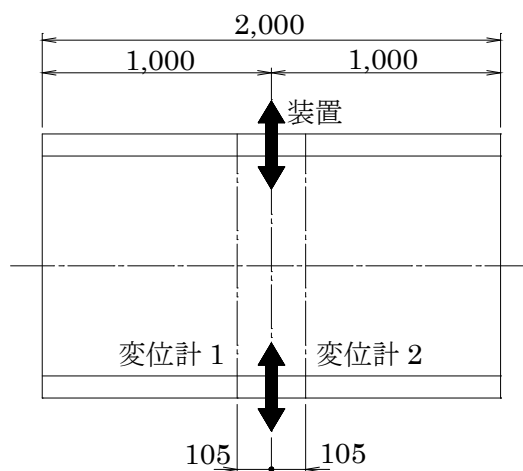


図 5.5 装置及び変位計設置概要図

### 5.3.2 試験結果

実現場について複数区間における荷重と変形量の関係を計測した結果を表 5.5、図 5.5～図 5.11 に示す。変位計は、底版に不動点を持たないため左右の変形量の合計である。そこで、表 5.5 は荷重が 3kN 時において計測した変形量を 2 で除した数値と荷重と変形量の傾きをまとめたものである。表 5.5 から、傾きと変形量の平均値と標準偏差を求めると、傾きの平均値は 11.04 であり、標準偏差は 0.57 であった。一方、変形量の平均値は 0.27mm であり、標準偏差は 0.01mm であった。また、変位計の性能は、以下に示すとおり±0.05mm の誤差が発生すると仮定した場合、当該開水路の傾き及び変形量のバラツキは小さいため、計測箇所については健全であると考ええる。

今回、複数箇所について試験を実施したが、同一路線内であれば使用材料及び施工条件はほぼ同じであると考えられることから、荷重と変形量の関係は同等であったと考える。

以上から、水路壁載荷法は、実現場においてもコンクリート開水路の健全性を評価することができる手法であると考ええる。

表 5.5 現場水路での変形量と傾きの測定結果

No.		内面載荷			外面載荷		
		変位計 1	変位計 2	平均	変位計 1	変位計 2	平均
1	傾き	y=11.94x	y=11.70x	y=11.82x	y=11.88x	y=11.52x	y=11.70x
	変形量 (mm)	0.25	0.25	0.25	0.24	0.26	0.25
2	傾き	y=11.61x	y=11.25x	y=11.43x	y=13.17x	y=11.04x	y=12.11x
	変形量 (mm)	0.26	0.27	0.27	0.24	0.27	0.26
3	傾き	y=11.40x	y=11.05x	y=11.23x	y=10.45x	y=10.50x	y=10.48x
	変形量 (mm)	0.26	0.27	0.27	0.28	0.28	0.28
4	傾き	y=10.50x	y=10.63x	y=10.57x	y=10.42x	y=10.42x	y=10.42x
	変形量 (mm)	0.29	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29
5	傾き	y=10.59x	y=10.56x	y=10.58x	y=10.99x	y=10.91x	y=10.95x
	変形量 (mm)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
6	傾き	y=11.17x	y=11.12x	y=11.15x	y=11.24x	y=10.98x	y=11.11x
	変形量 (mm)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
7	傾き	y=10.61x	y=10.54x	y=10.59x	y=10.32x	y=10.38x	y=10.35x
	変形量 (mm)	0.27	0.28	0.28	0.29	0.29	0.29

参考までに、使用している変位計（CDP-25）の精度は、式（5-1）により算出した。

$$\text{精度} = \sqrt{(E_1^2 + E_2^2 + E_3^2 + E_4^2)} \times L / \text{RO} \cdots \cdots (5-1)$$

ここに、 $E_1$ ：非直線性（0.1%RO）（東京測器研究所のカタログ値）

$$E_1 = 0.1\% \times 12,500 \mu = 12.5 \mu$$

$E_2$ ：ヒステリシス（0.1%RO とする）

$$E_2 = 0.1\% \times 12,500 \mu = 12.5 \mu$$

$E_3$ ：零点の温度特性（0.008%RO）（東京測器研究所のカタログ値）

$$E_3 = 0.008\% / ^\circ\text{C} \times 12,500 \mu \times 10^\circ\text{C} = 10 \mu$$

$E_4$ ：出力の温度特性（0.008%RO とする）

$$E_4 = 0.008\% / ^\circ\text{C} \times 12,500 \mu \times 10^\circ\text{C} = 10 \mu$$

RO：定格出力（12,500 $\mu$ ）（カタログ値）

$\Delta T$ ：温度変化（測定期間中の温度変化は小さいと考え 10 $^\circ\text{C}$ とした。）

L：変位計の容量（25mm）（カタログ値）

$$\text{精度} = \sqrt{(12.5^2 + 12.5^2 + 10^2 + 10^2)} \times 25 / 12,500 = 0.045 \text{mm}$$

以上から、計算上の精度は $\pm 0.045 \text{mm}$ となり、安全を考慮し $\pm 0.05 \text{mm}$ と設定した。

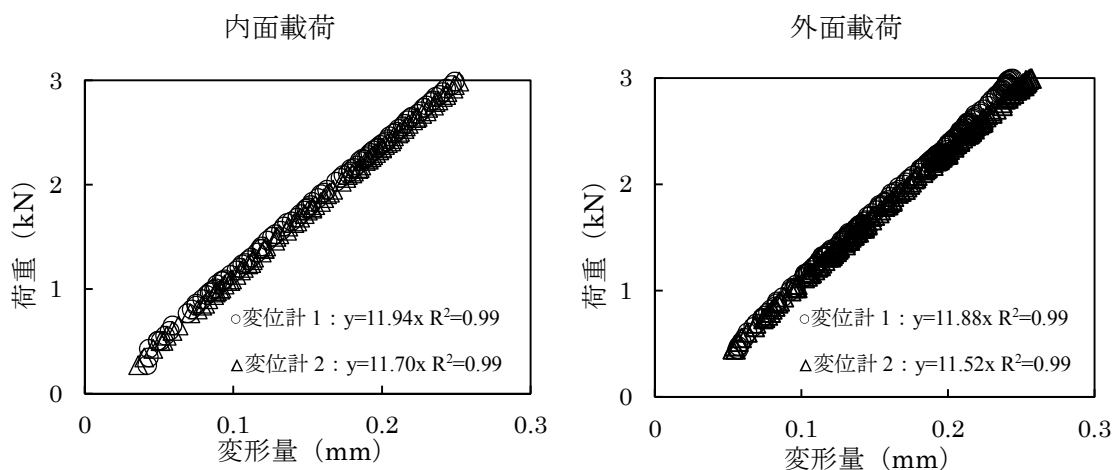


図 5.5 No. 1 荷重と変形量の関係

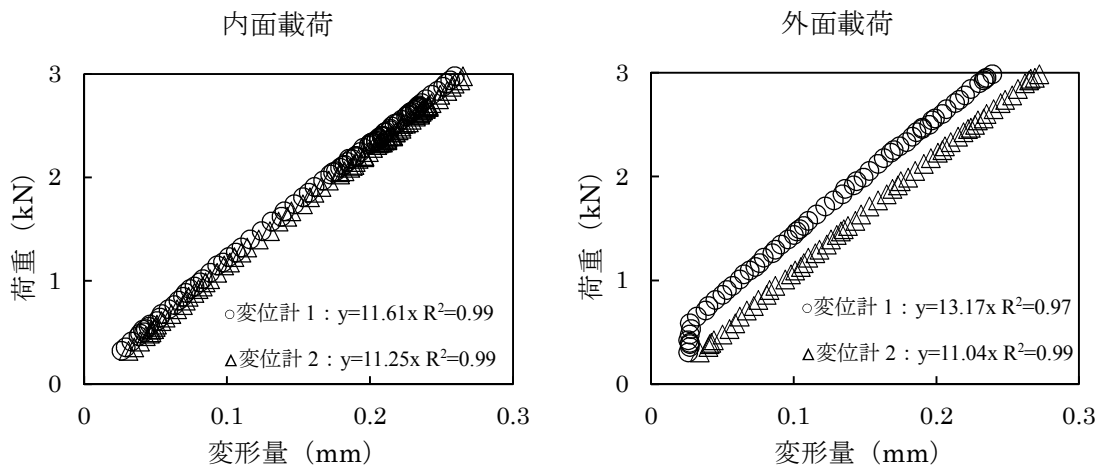


図 5.6 No. 2 荷重と変形量の関係

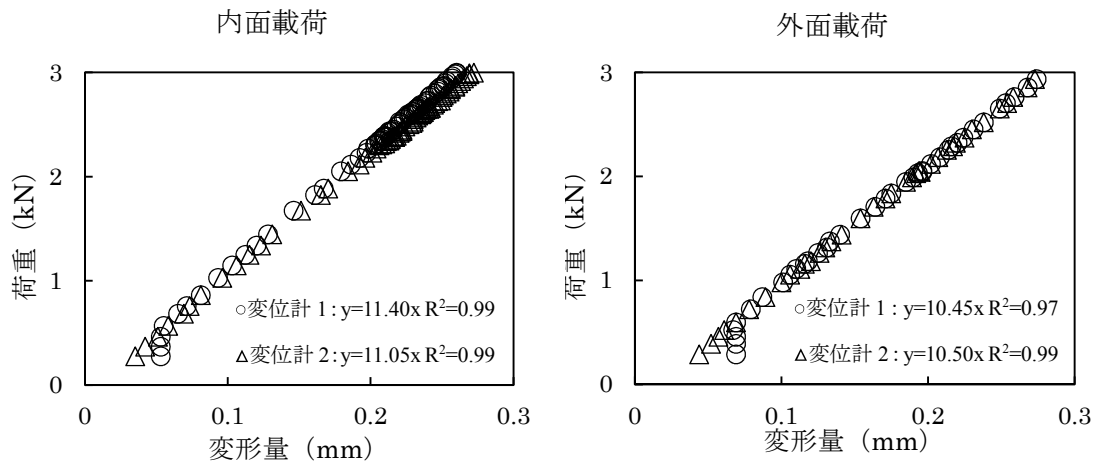


図 5.7 No. 3 荷重と変形量の関係

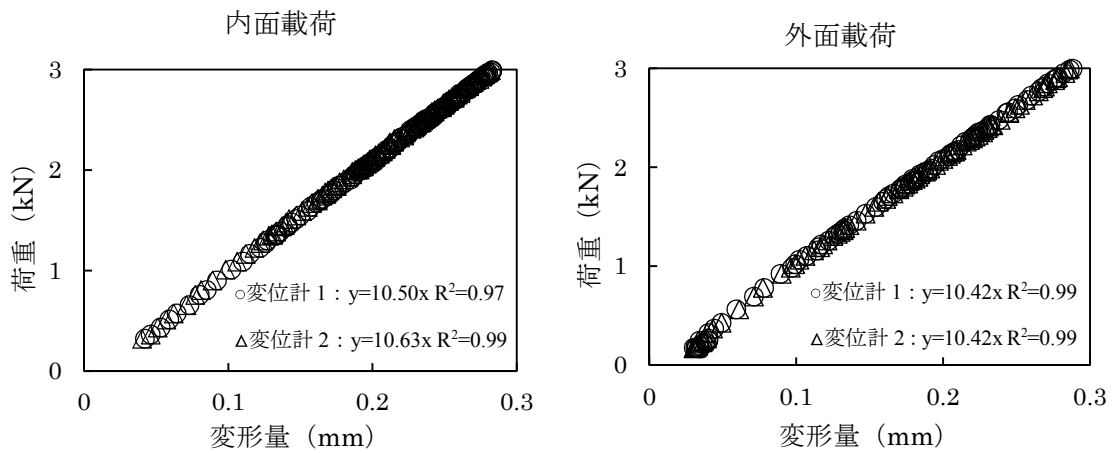


図 5.8 No. 4 荷重と変形量の関係

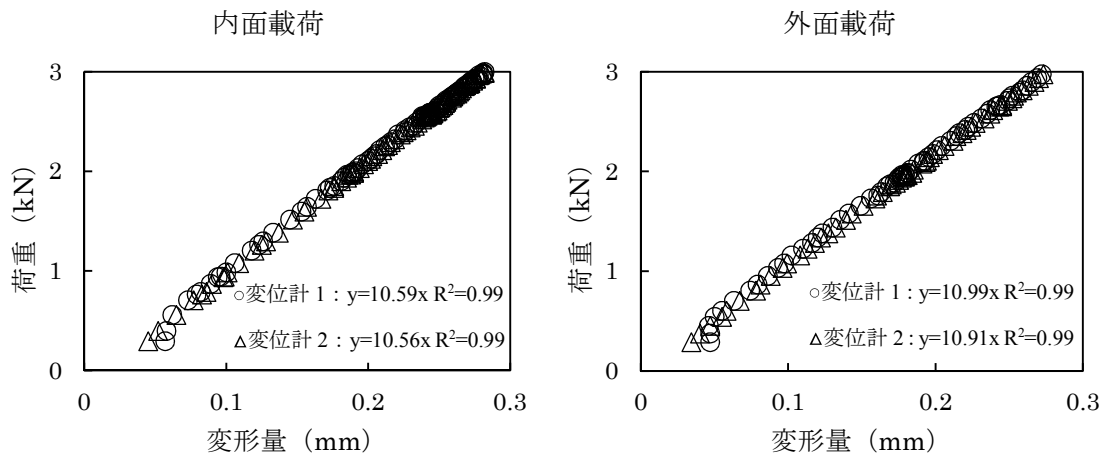


図 5.9 No. 5 荷重と変形量の関係

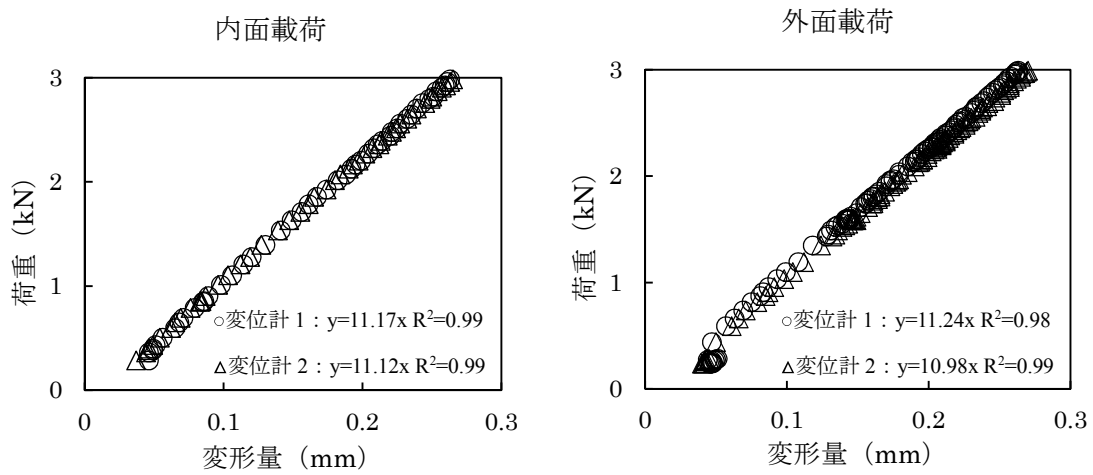


図 5.10 No. 6 荷重と変形量の関係

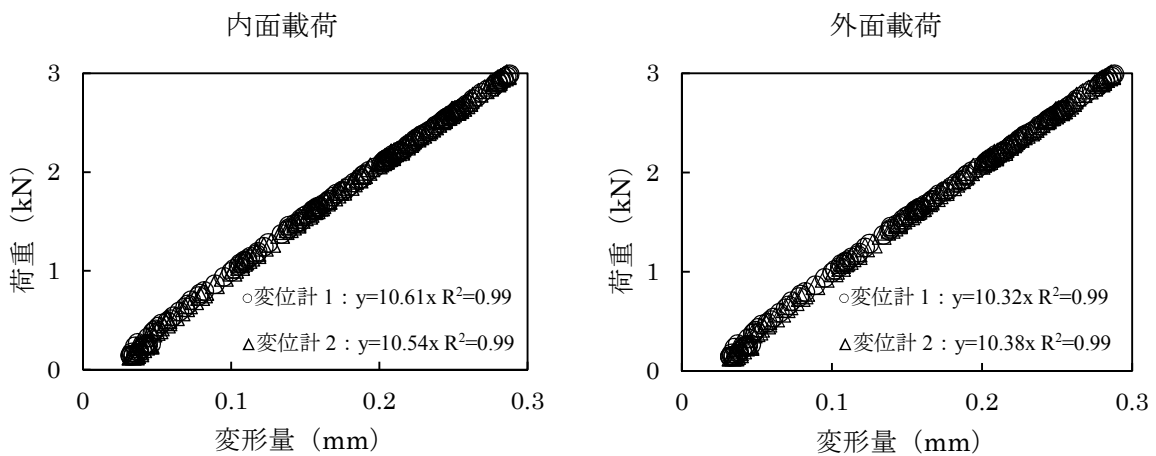


図 5.11 No. 7 荷重と変形量の関係



## 5.4 均一に締固められた埋設環境下におけるコンクリート開水路による検証

第4章では、土圧等の影響を受けない条件下において、背面底版部に亀裂を発生させたコンクリート製フリームの荷重と変形量の関係を水路壁載荷法により確認した結果、亀裂を発生させる前のフリームよりも変形量が大きくなることを確認した。本節では、埋め戻し土にて均一に締固められた埋設環境下におけるフリームについて、水路壁載荷法により荷重と変形量の関係を評価し、背面土圧が作用した時に傾きや変形量に与える影響を確認した。

### 5.4.1 試験体

試験体は、図5.12に示す形状寸法の鉄筋コンクリート大型フリーム（農業土木事業協会規格）を使用した。なお、有効長は2,000mmである。試験体の物性は、表5.6に示すとおりである。

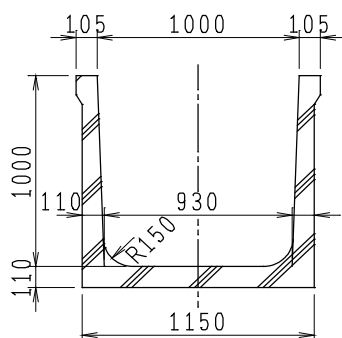


図 5.12 試験体の断面図

表 5.6 試験体の物性

試験体の材齢	14 日
圧縮強度 (n=3 の平均値)	50.6N/mm <sup>2</sup>
静弾性係数	27kN/mm <sup>2</sup>

#### 5.4.2 試験体の埋設

試験体の埋設は、図 5.14 に示すとおり、次の手順で埋設を行った。基床部は RC-40 を使用し、埋戻し土は、真砂土を使用した。なお、真砂土の締固め度は、JIS A 1214 による砂置換法による土の密度試験方法 [1] に準じて試験を実施した結果、88.7%であった。また、参考までに JGS 1431 によるポータブルコーン貫入試験 [2] も実施したが、当試験方法は、軟弱地盤を対象とした簡易計測機器であるため、正確な数値は計測できなかったため、適用外とした。

試験手順を以下に示し、その状況を写真 5.7～5.18 に示す。

- ①コンクリートカッターで切断後、重機にて上面のアスファルトを撤去した。
- ②掘削は、図 5.13 を参考に実施した。
- ③基床部の厚さは 200mm とし、砕石 RC-40 にてタンピングランマーにて転圧した。
- ④基床部に試験体を設置した。
- ⑤試験体の両側は、埋戻し土の流出を防止するためコンパネ及び土のうを設置した。
- ⑥真砂土をタンピングランマーで転圧しながら埋戻しを行った。埋戻し土の巻き出し厚さは、300mm を目安に実施した。
- ⑦施工完了後、砂置換法による土の密度試験により締固め度を計測した。

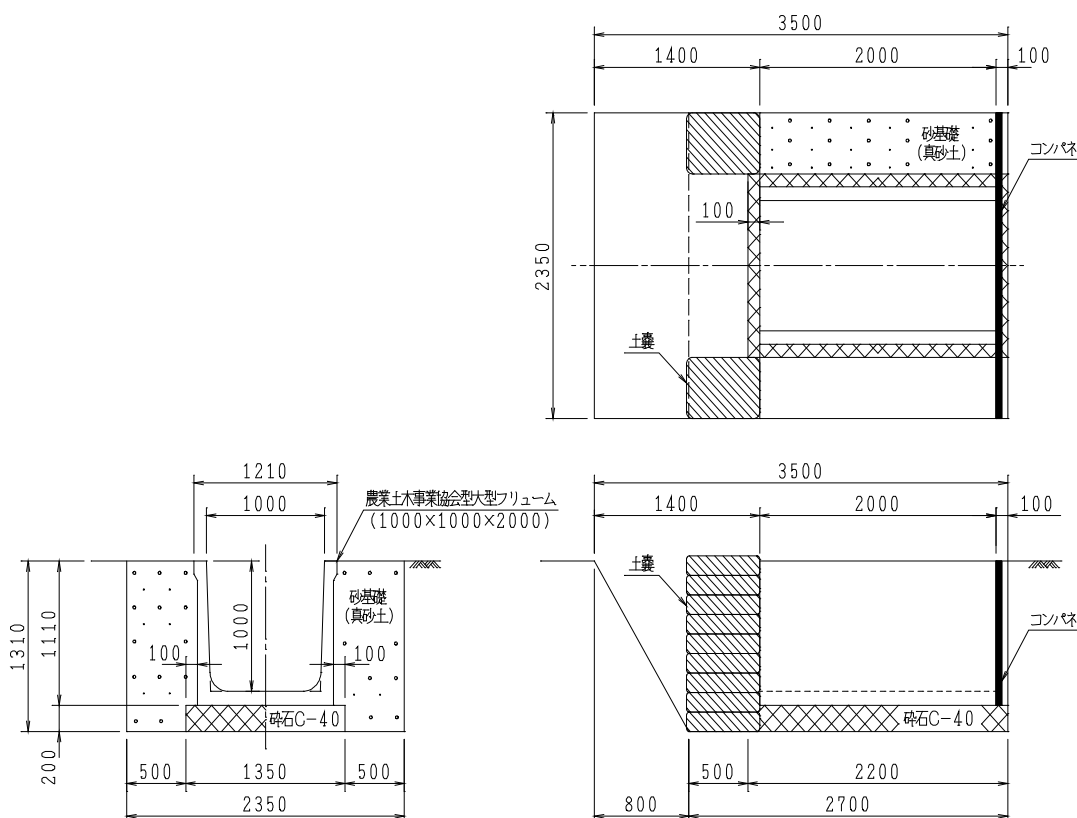


図 5.13 試験体の埋設概要図

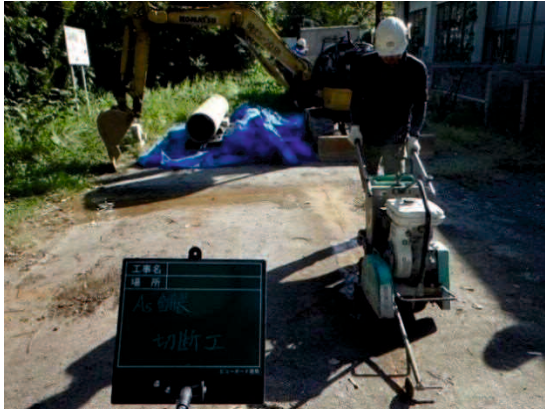


写真 5.7 舗装切断状況



写真 5.8 舗装取り壊し状況



写真 5.9 掘削状況



写真 5.10 砕石巻き出し状況



写真 5.11 砕石巻き出し状況



写真 5.12 試験体設置状況



写真 5.13 試験体設置状況

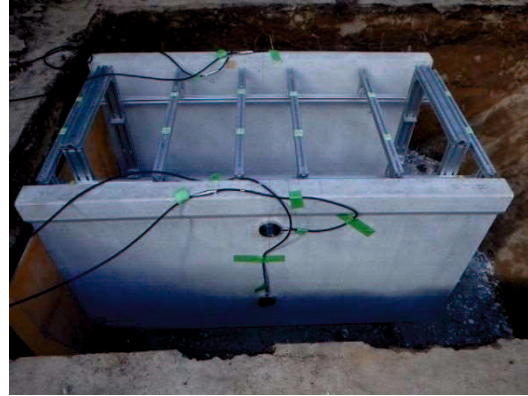


写真 5.14 試験体設置状況



写真 5.15 埋戻し土転圧状況



写真 5.16 施工完了状況



写真 5.17 ホータブルコン貫入試験状況



写真 5.18 砂置換法土密度試験状況

表 5.7 砂置換法による土の密度試験結果

No.	項目	単位	測定値
①	試験前 (砂+容器) 重量	g	8,040
②	試験後 (砂+容器) 重量	g	5,260
③	ベースプレート中の砂の重量	g	1,255
④	穴に詰めた砂の重量 (①-②-③)	g	1,555
⑤	砂の単位体積重量	g/cm <sup>3</sup>	1.291
⑥	穴の容積 (④/⑤)	cm <sup>3</sup>	1,204
⑦	(湿潤土+容器) 重量	g	2,300
⑧	⑦の容器の重量	g	0
⑨	湿潤土重量 (⑦-⑧)	g	2,300
⑩	湿潤密度 (⑨/⑥)	g	1.910
⑪	(乾燥土+容器) 重量	g	2,140
⑫	⑪の容器の重量	g	0
⑬	乾燥土重量 (⑪-⑫)	g	2,140
⑭	乾燥密度 (⑬/⑥)	g/cm <sup>3</sup>	1.777
⑮	水の重量	g	160
⑯	含水比 (100×⑮/⑬)	%	7.5
⑰	最大乾燥密度	g/cm <sup>3</sup>	2.003
⑱	締固め度 (100×⑭/⑰)	%	88.7

### 5.4.3 試験方法

試験は、表 5.8 の試験条件により以下の要領で実施した。

- (1) 試験体の側壁中央部に水路壁載荷装置を設置し、内面載荷及び外面載荷にて 5kN まで載荷し、荷重と変形量を計測する。埋設前と埋設 1 日後について実施した。
- (2) 埋設 4 ヶ月後における荷重と変形量の関係を確認した。その後、外面載荷にて試験体の底版部に亀裂が発生するまで荷重を載荷した。なお、この時の荷重と変形量の計測、並びに亀裂箇所の計測も実施した。ここで、ひび割れ幅は表 5.9 を参考に、健全度ランク S-4 の 0.2mm 以上～1.0mm 未満を目安とした。
- (3) 試験体の側壁頂部中央に水路壁載荷装置を設置し、内面載荷及び外面載荷にて 5kN まで載荷して、荷重と変形量の関係を確認した。荷重速度は、1 回転当たり 60 秒を目安とした。また、変位計は接触式（東京測器研究所 CDP25, 非直線性 0.1%RO）を使用し、設置箇所は、試験体の側壁高さから 50mm の位置とした。試験状況は写真 5.19 に、変位計の設置状況を図 5.14 に示す。なお、計測は載荷方向に関係なく、3 回連続して計測し、データが安定する 3 回目を採用するものとした。この時、荷重を完全に除荷するよりも低荷重を負荷させた方が取得するデータが安定するため、0.5kN 程度負荷させた状態で 5kN までの荷重を往復するものとした。

表 5.8 試験条件

試験条件	状態	ひび割れ	載荷方向	荷重	備考	
1	埋設前	無 (健全)	内面	5kN	埋設前の試験体	
2			外面			
3	埋設 1 日後		内面		埋設後における変化	
4			外面			
5	4 ヶ月後		内面		埋設期間における変化	
6			外面			
7			有	外面	ひび割れ荷重	底版部のひび割れ
8				内面	5kN	埋設後におけるひび割れの影響
9	外面					

表 5.9 鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表 [3]

健全度ランク		S-5	S-4	S-3	S-2
形状と幅	タイプ：初期ひび割れ 形状：目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ 原因：乾燥収縮・温度応力	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上 ～1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当するものが全体的
	タイプ：劣化要因不特定のひび割れ 原因：症状が複合的であり劣化要因を特定できないもの 形状：特徴的な形状を示さないひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上 ～1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当するものが全体的
	タイプ：ひび割れ先行型ひび割れ 原因：ASR や凍害などの劣化要因 形状：格子状・亀甲状などのひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上 ～1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当するものが全体的
	タイプ：外力によるひび割れ 原因：構造物に作用する曲げ・せん断力 形状：側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上 ～1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当するものが全体的

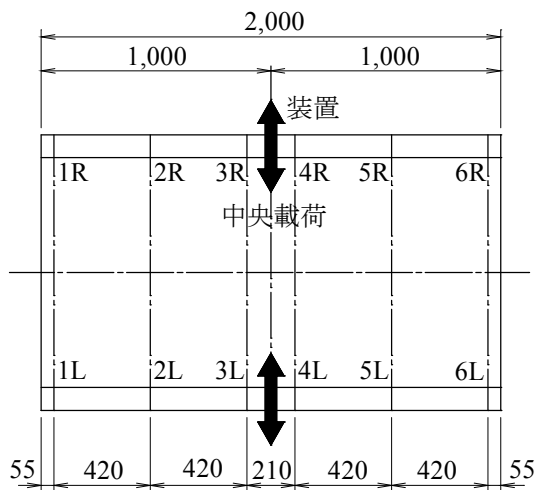


図 5.14 変位計の設置状況



写真 5.19 試験実施状況

#### 5.4.4 試験結果

各条件における荷重と変形量の傾き（縦軸を荷重，横軸を変形量とした時の近似曲線）及び 5kN 時の変形量を図 5.15 から図 5.24 及び表 5.10 から表 5.18 に示す．図 5.21 及び表 5.16 は，ひび割れ荷重における荷重と変形量の関係をまとめたものである．ひび割れが発生した時の荷重は 30.63kN であり，この時の最大変形量は，変位計 4L にて 3.23mm を計測した．

ひび割れは，L 側のハンチ近傍付近に約 0.2mm のひび割れが両断面に 1 本発生した．その状況を写真 5.20 と写真 5.21 に示す．この時のひび割れにおける健全度ランクは，表 5.9 によると S-4 相当に該当する．また，試験完了後において，試験体をつり上げた時に底版を目視確認したが，長手方向に発生するひび割れは，確認できなかった．

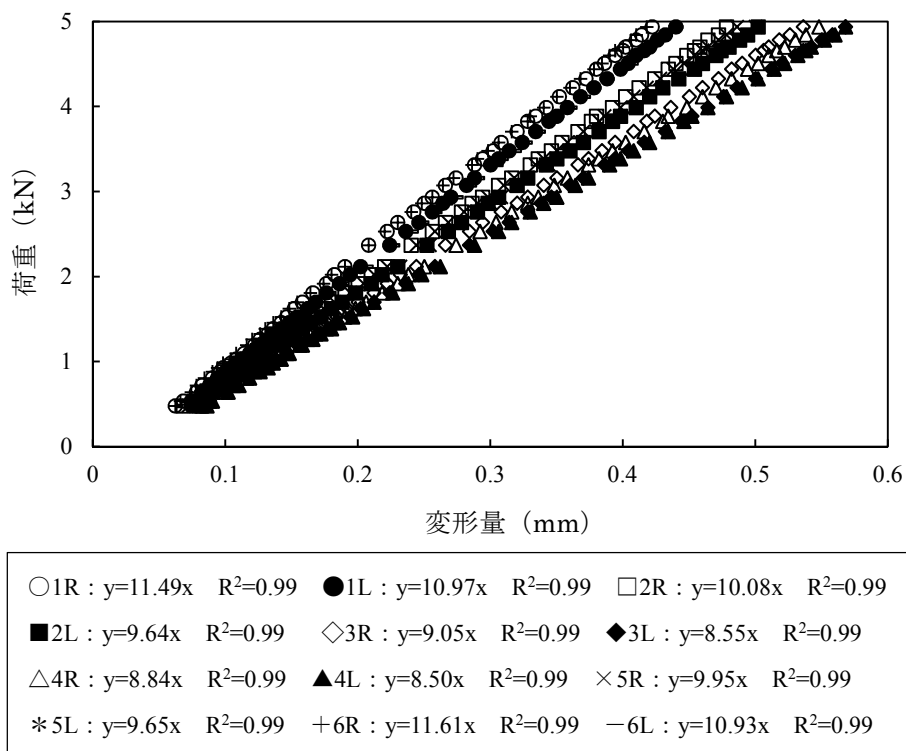
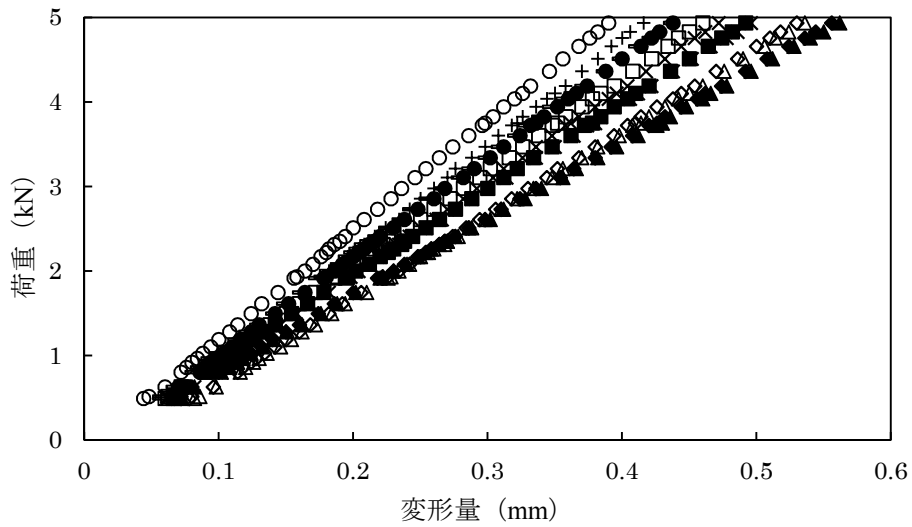


図 5.15 荷重と変形量の関係（条件 1：内面載荷／埋設前）

表 5.10 5kN 時における変形量（条件 1：内面載荷／埋設前）

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.43mm	0.45mm	0.49mm	0.51mm	0.54mm	0.58mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.56mm	0.58mm	0.49mm	0.51mm	0.42mm	0.45mm



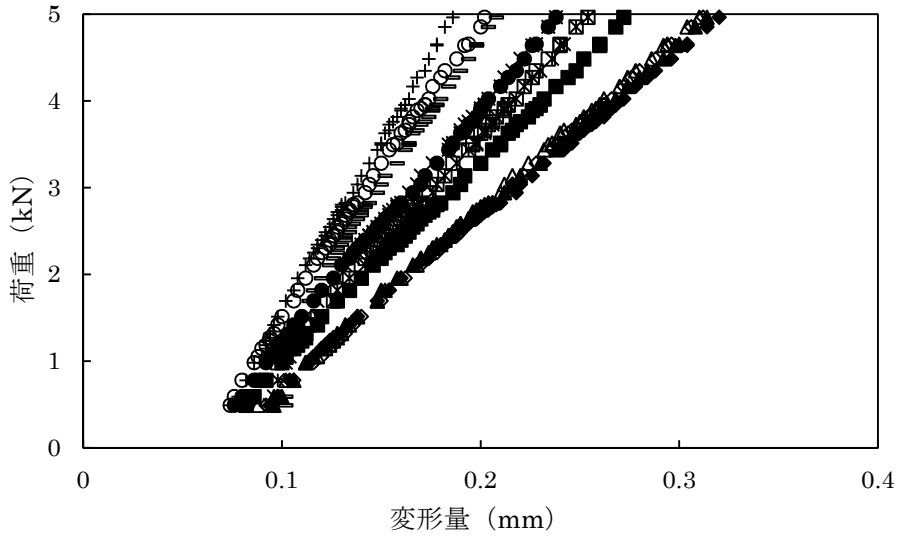


○1R : $y=12.55x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=11.09x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=10.58x$ $R^2=0.99$
■2L : $y=9.94x$ $R^2=0.99$	◇3R : $y=9.07x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=8.82x$ $R^2=0.99$
△4R : $y=8.97x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=8.75x$ $R^2=0.99$	×5R : $y=10.24x$ $R^2=0.99$
*5L : $y=9.91x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=11.52x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=11.25x$ $R^2=0.99$

図 5.16 荷重と変形量の関係 (条件 2:外面載荷/埋設前)

表 5.11 5kN 時における変形量 (条件 2:外面載荷/埋設前)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.40mm	0.45mm	0.47mm	0.50mm	0.54mm	0.57mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.55mm	0.57mm	0.48mm	0.50mm	0.42mm	0.44mm

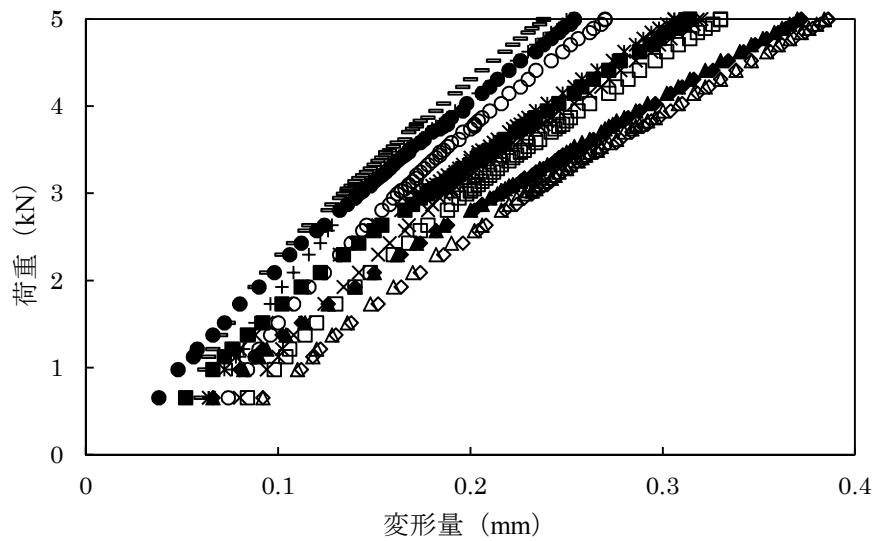


○1R : $y=21.29x$ $R^2=0.84$	●1L : $y=18.35x$ $R^2=0.89$	□2R : $y=17.34x$ $R^2=0.88$
■2L : $y=16.32x$ $R^2=0.91$	◇3R : $y=14.22x$ $R^2=0.90$	◆3L : $y=14.03x$ $R^2=0.92$
△4R : $y=14.42x$ $R^2=0.90$	▲4L : $y=14.24x$ $R^2=0.92$	×5R : $y=18.34x$ $R^2=0.87$
*5L : $y=17.21x$ $R^2=0.87$	+6R : $y=22.31x$ $R^2=0.79$	-6L : $y=20.10x$ $R^2=0.76$

図 5.17 荷重と変形量の関係 (条件 3:内面載荷/埋設 1 日後)

表 5.12 5kN 時における変形量 (条件 3:内面載荷/埋設 1 日後)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.21mm	0.24mm	0.26mm	0.28mm	0.32mm	0.33mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.32mm	0.32mm	0.24mm	0.26mm	0.19mm	0.21mm

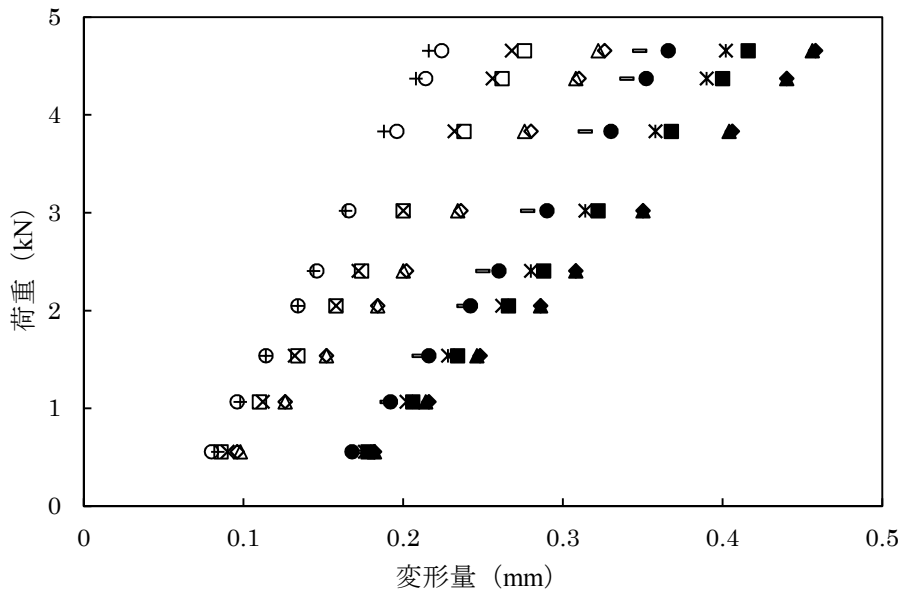


○1R : $y=18.42x$ $R^2=0.97$	●1L : $y=20.32x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=15.11x$ $R^2=0.97$
■2L : $y=16.40x$ $R^2=0.99$	◇3R : $y=12.89x$ $R^2=0.98$	◆3L : $y=13.65x$ $R^2=0.99$
△4R : $y=13.00x$ $R^2=0.98$	▲4L : $y=13.74x$ $R^2=0.99$	×5R : $y=15.75x$ $R^2=0.97$
*5L : $y=16.71x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=20.30x$ $R^2=0.97$	-6L : $y=21.63x$ $R^2=0.98$

図 5.18 荷重と変形量の関係 (条件 4: 外面載荷/埋設 1 日後)

表 5.13 5kN 時における変形量 (条件 4: 外面載荷/埋設 1 日後)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.27mm	0.25mm	0.33mm	0.31mm	0.39mm	0.37mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.39mm	0.37mm	0.32mm	0.31mm	0.25mm	0.24mm

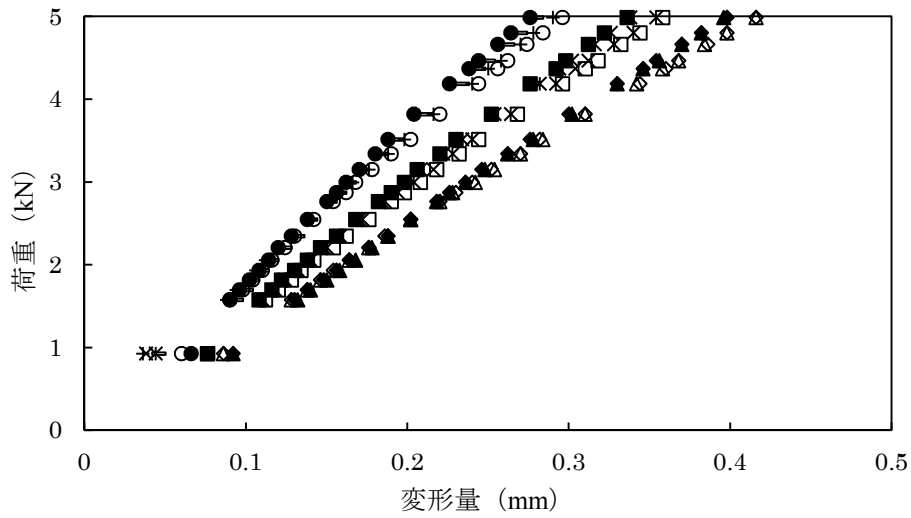


○1R : $y=26.36x$ $R^2=0.93$	●1L : $y=23.14x$ $R^2=0.92$	□2R : $y=20.30x$ $R^2=0.94$
■2L : $y=19.41x$ $R^2=0.94$	◇3R : $y=16.64x$ $R^2=0.95$	◆3L : $y=16.17x$ $R^2=0.95$
△4R : $y=16.78x$ $R^2=0.95$	▲4L : $y=16.48x$ $R^2=0.95$	×5R : $y=20.78x$ $R^2=0.92$
*5L : $y=20.79x$ $R^2=0.92$	+6R : $y=26.41x$ $R^2=0.87$	-6L : $y=26.97x$ $R^2=0.86$

図 5.19 荷重と変形量の関係 (条件 5:内面載荷/埋設後 4 ヶ月)

表 5.14 5kN 時における変形量 (条件 5 : 内面載荷/埋設後 4 ヶ月)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.18mm	0.20mm	0.23mm	0.24mm	0.29mm	0.29mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.28mm	0.29mm	0.22mm	0.22mm	0.17mm	0.17mm

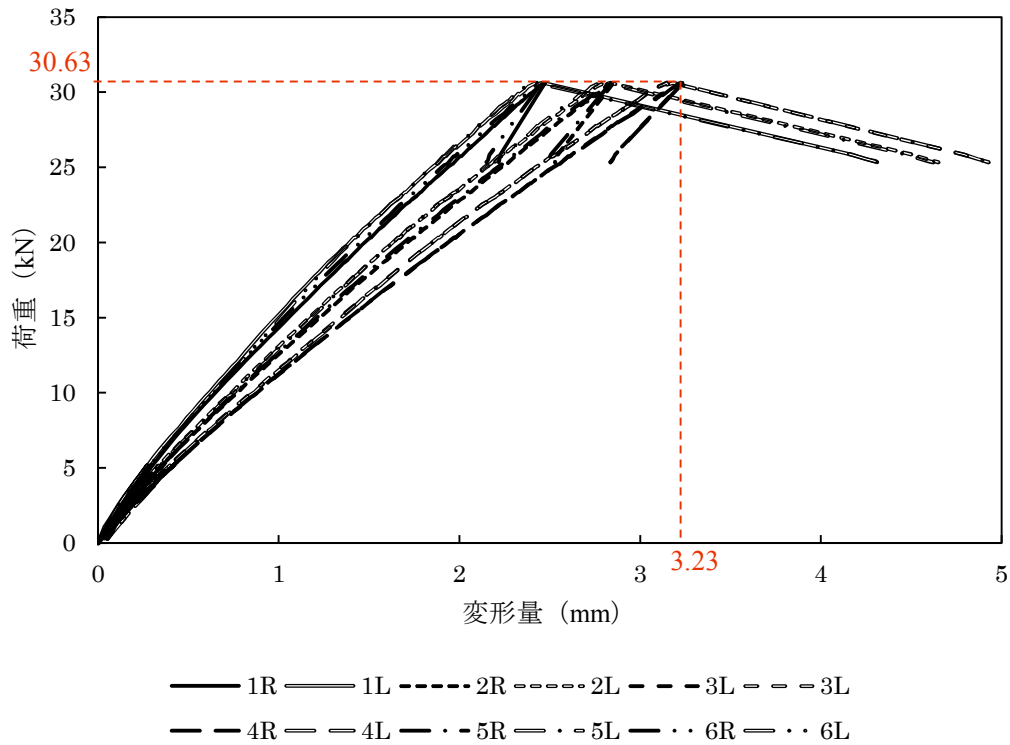


○1R : $y=17.23x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=18.30x$ $R^2=0.99$	□2R : $y=14.16x$ $R^2=0.99$
■2L : $y=15.02x$ $R^2=0.99$	◇3R : $y=12.23x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=12.61x$ $R^2=0.99$
△4R : $y=12.24x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=12.58x$ $R^2=0.99$	×5R : $y=14.41x$ $R^2=0.99$
*5L : $y=14.87x$ $R^2=0.99$	+6R : $y=17.59x$ $R^2=0.77$	-6L : $y=17.91x$ $R^2=0.99$

図 5.20 荷重と変形量の関係 (条件 6: 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月)

表 5.15 5kN 時における変形量 (条件 6 : 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.30mm	0.28mm	0.36mm	0.34mm	0.42mm	0.40mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.42mm	0.40mm	0.36mm	0.34mm	0.29mm	0.28mm



1R : $y=12.86x$ $R^2=0.98$	1L : $y=11.61x$ $R^2=0.76$	2R : $y=11.16x$ $R^2=0.99$	2L : $y=10.25x$ $R^2=0.81$
3R : $y=9.88x$ $R^2=0.99$	3L : $y=9.27x$ $R^2=0.85$	4R : $y=9.87x$ $R^2=0.99$	4L : $y=9.25x$ $R^2=0.85$
5R : $y=11.26x$ $R^2=0.99$	5L : $y=10.31x$ $R^2=0.82$	6R : $y=13.08x$ $R^2=0.98$	6L : $y=11.62x$ $R^2=0.76$

図 5.21 ひび割れ荷重と変形量の関係 (条件 7: 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月)

表 5.16 ひび割れ荷重時における変形量 (条件 7: 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月)

ひび割れ 荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
30.63kN	2.47mm	2.42mm	2.85mm	2.80mm	3.22mm	3.15mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	3.23mm	3.15mm	2.83mm	2.78mm	2.45mm	2.40mm

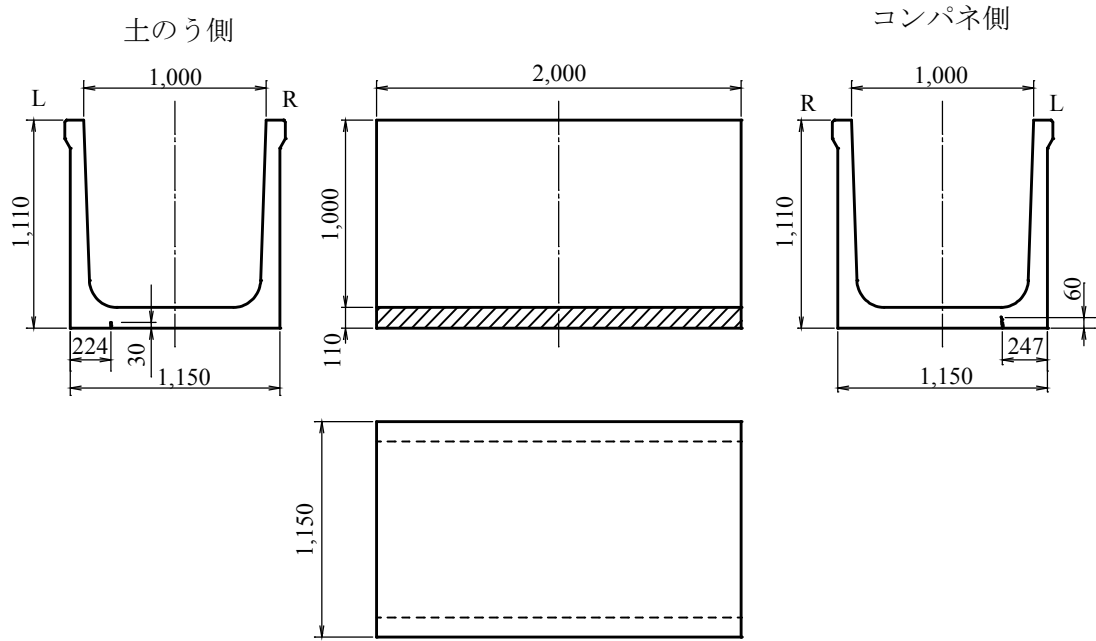


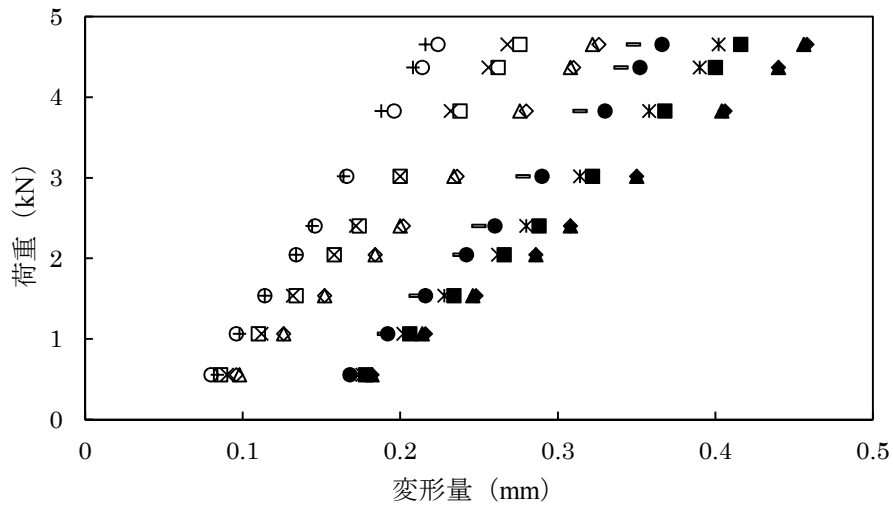
図 5.22 試験体のひび割れ概要図



写真 5.20 ひび割れ状況（土のう側）



写真 5.21 ひび割れ状況（コンパネ側）



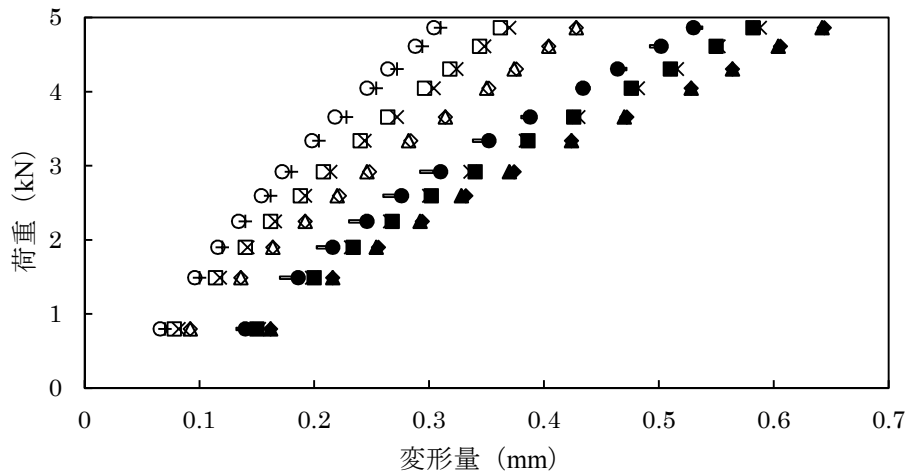
○1R : $y=18.79x$ $R^2=0.87$	●1L : $y=10.86x$ $R^2=0.76$	□2R : $y=15.59x$ $R^2=0.91$
■2L : $y=9.75x$ $R^2=0.80$	◇3R : $y=13.27x$ $R^2=0.92$	◆3L : $y=9.00x$ $R^2=0.83$
△4R : $y=13.39x$ $R^2=0.92$	▲4L : $y=9.00x$ $R^2=0.83$	×5R : $y=15.86x$ $R^2=0.89$
*5L : $y=10.00x$ $R^2=0.79$	+6R : $y=19.20x$ $R^2=0.84$	-6L : $y=11.23x$ $R^2=0.73$

図 5.23 荷重と変形量の関係 (条件 8:内面載荷/埋設後 4 ヶ月) (ひび割れ)

表 5.17 5kN 時における変形量 (条件 8:内面載荷/埋設後 4 ヶ月) (ひび割れ)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.24mm	0.38mm	0.29mm	0.44mm	0.35mm	0.48mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.34mm	0.48mm	0.28mm	0.42mm	0.23mm	0.37mm





○1R : $y=16.26x$ $R^2=0.99$	●1L : $y=9.19x$ $R^2=0.98$	□2R : $y=13.55x$ $R^2=0.99$
■2L : $y=8.39x$ $R^2=0.98$	◇3R : $y=11.47x$ $R^2=0.99$	◆3L : $y=7.63x$ $R^2=0.98$
△4R : $y=11.50x$ $R^2=0.99$	▲4L : $y=7.63x$ $R^2=0.98$	×5R : $y=13.27x$ $R^2=0.99$
*5L : $y=8.35x$ $R^2=0.98$	+6R : $y=15.81x$ $R^2=0.99$	-6L : $y=9.28x$ $R^2=0.98$

図 5.24 荷重と変形量の関係 (条件 9: 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月) (ひび割れ)

表 5.18 5kN 時における変形量 (条件 9: 外面載荷 / 埋設後 4 ヶ月) (ひび割れ)

荷重	変位計 1R	変位計 1L	変位計 2R	変位計 2L	変位計 3R	変位計 3L
5kN	0.32mm	0.55mm	0.38mm	0.60mm	0.44mm	0.67mm
	変位計 4L	変位計 4R	変位計 5R	変位計 5L	変位計 6R	変位計 6L
	0.44mm	0.67mm	0.39mm	0.61mm	0.32mm	0.55mm

表 5.19 各条件における変位計の R と L を平均した荷重と変形量の傾きと変形量

載荷方向		内面載荷			外面載荷		
条件		1	3	5	2	4	6
埋設期間		埋設前	埋設 1 日後	埋設 4 ヶ月後	埋設前	埋設 1 日後	埋設 4 ヶ月後
変位計 1	傾き	$y=11.23x$	$y=19.82x$	$y=24.75x$	$y=11.67x$	$y=19.37x$	$y=17.77x$
	変形量 (mm)	0.44	0.23	0.19	0.43	0.26	0.29
傾きの変化* (倍)		—	0.57	0.80	—	0.60	1.09
変位計 2	傾き	$y=9.86x$	$y=16.83x$	$y=19.86x$	$y=10.26x$	$y=15.76x$	$y=14.59x$
	変形量 (mm)	0.50	0.27	0.24	0.49	0.32	0.35
傾きの変化* (倍)		—	0.59	0.85	—	0.65	1.08
変位計 3	傾き	$y=8.80x$	$y=14.13x$	$y=16.41x$	$y=8.95x$	$y=13.27x$	$y=12.42x$
	変形量 (mm)	—	0.33	0.29	0.56	0.38	0.41
傾きの変化* (倍)		0.62	0.62	0.86	—	0.67	1.07
変位計 4	傾き	$y=8.67x$	$y=14.33x$	$y=16.63x$	$y=8.86x$	$y=13.37x$	$y=12.41x$
	変形量 (mm)	0.57	0.32	0.29	0.56	0.38	0.41
傾きの変化* (倍)		—	0.61	0.86	—	0.66	1.08
変位計 5	傾き	$y=9.80x$	$y=17.78x$	$y=20.79x$	$y=10.08x$	$y=16.23x$	$y=14.64x$
	変形量 (mm)	0.50	0.25	0.2	0.49	0.32	0.35
傾きの変化* (倍)		—	0.55	0.86	—	0.62	1.11
変位計 6	傾き	$y=11.27x$	$y=21.21x$	$y=26.69x$	$y=11.39x$	$y=20.97x$	$y=17.75x$
	変形量 (mm)	0.44	0.20	0.17	0.43	0.25	0.29
傾きの変化* (倍)		—	0.53	0.79	—	0.54	1.18

※傾きの変化は、以下のように計算した数値である。

内面載荷：埋設 1 日後＝条件 1（埋設前）／条件 3（埋設 1 日後），埋設 4 ヶ月後＝条件 3（埋設 1 日後）／条件 5（埋設 4 ヶ月後）

外面載荷：埋設 1 日後＝条件 2（埋設前）／条件 4（埋設 1 日後），埋設 4 ヶ月後＝条件 4（埋設 1 日後）／条件 6（埋設 4 ヶ月後）

まず、埋設前、埋設1日後、埋設4ヶ月後の荷重と変形量の傾き及び5kN時の変形量について、各変位計のRとLを平均したものを表5.19に示す。傾きの変化については、埋設1日後は埋設前と比較し、埋設4ヶ月後は埋設1日後と比較する。埋設1日後の傾きは、埋設前と比較して、載荷方向に関係なく、約6割程度変形し難くなる結果となった。これは、埋戻し土の締固めにおける反力の影響による結果であると考えられる。次に、埋設4ヶ月後における傾きは、埋設1日後と比較して、内面載荷で約2割程度変形し難くなり、外面載荷では約1割程度変形しやすい結果となった。変形量も傾きと同様の傾向であり、載荷方向が同じ場合の変化量は最大0.04mmと小さな数値であった。しかし、載荷方向が異なる場合の変形量の差は埋設前と埋設1日後に比べて、埋設4ヶ月後は最大0.12mmの差が生じた。今回、車両の通行が全くない場所に埋設したが、降雨等により埋戻し土の締固めが進行したため、フリームの内面から載荷する内面載荷では変形し難くなり、フリームの内側に引き込む外面載荷では、埋戻し土が自立した状態となり、変形しやすくなった。

水路壁載荷装置を用いて、外面載荷により試験体にひび割れを発生させた。ひび割れを発生させたフリームにおける傾きと5kN時の変形量を確認した結果を表5.20に示す。ひび割れ発生後の傾きは、ひび割れを発生させる前と比較して、内面載荷ではR側で約1.3倍、L側で約2倍、外面載荷ではR側で約1.1倍、L側で約1.6~2倍の差が生じる結果となった。

以上から、埋設環境下においてもコンクリート開水路の内面から確認できない開水路外面にひび割れが発生している場合、水路壁載荷法により開水路の異常を特定することができる。

表 5.20 埋設4ヶ月後とひび割れを発生させたフリームの荷重と変形量の関係

載荷方向		内面載荷		外面載荷	
条件		5	7	6	8
試験体の状態		健全	ひび割れ	健全	ひび割れ
変位計 1R	傾き	$y=26.36x$	$y=18.79x$	$y=17.23x$	$y=16.26x$
	変形量 (mm)	0.19	0.24	0.29	0.32
傾きの変化※ (倍)		1.40		1.06	
変位計 1L	傾き	$y=23.14x$	$y=10.86x$	$y=18.30x$	$y=9.19x$
	変形量 (mm)	0.24	0.38	0.35	0.55
傾きの変化※ (倍)		2.13		1.99	
変位計 2R	傾き	$y=20.30x$	$y=15.59x$	$y=14.16x$	$y=13.55x$
	変形量 (mm)	0.29	0.29	0.41	0.38
傾きの変化※ (倍)		1.30		1.05	
変位計 2L	傾き	$y=19.41x$	$y=9.75x$	$y=15.02x$	$y=8.39x$
	変形量 (mm)	0.29	0.44	0.41	0.60
傾きの変化※ (倍)		1.99		1.79	

表 5.20 埋設 4 ヶ月後とひび割れを発生させたフリュームの荷重と変形量の関係 (続き)

载荷方向		内面载荷		外面载荷	
条件		5	7	6	8
試験体の状態		健全	ひび割れ	健全	ひび割れ
変位計 3R	傾き	$y=16.64x$	$y=13.27x$	$y=12.23x$	$y=11.47x$
	変形量 (mm)	0.2	0.35	0.35	0.44
傾きの変化※ (倍)		1.25		1.07	
変位計 3L	傾き	$y=16.17x$	$y=9.00x$	$y=12.61x$	$y=7.63x$
	変形量 (mm)	0.17	0.48	0.29	0.67
傾きの変化※ (倍)		1.80		1.65	
変位計 4R	傾き	$y=16.78x$	$y=13.39x$	$y=12.24x$	$y=11.50x$
	変形量 (mm)	0.34	0.34	0.44	0.44
傾きの変化※ (倍)		1.25		1.06	
変位計 4L	傾き	$y=16.48$	$y=9.00x$	$y=12.58$	$y=7.63x$
	変形量 (mm)	0.48	0.48	0.67	0.67
傾きの変化※ (倍)		1.83		1.65	
変位計 5R	傾き	$y=20.78x$	$y=15.86x$	$y=14.41x$	$y=13.27x$
	変形量 (mm)	0.28	0.28	0.39	0.39
傾きの変化※ (倍)		1.31		1.09	
変位計 5L	傾き	$y=20.79x$	$y=10.00x$	$y=14.87$	$y=8.35x$
	変形量 (mm)	0.42	0.42	0.61	0.61
傾きの変化※ (倍)		2.08		1.78	
変位計 6R	傾き	$y=26.41x$	$y=19.20x$	$y=17.59x$	$y=15.81x$
	変形量 (mm)	0.23	0.23	0.32	0.32
傾きの変化※ (倍)		1.38		1.11	
変位計 6L	傾き	$y=26.97$	$y=11.23x$	$y=17.91$	$y=9.28x$
	変形量 (mm)	0.37	0.37	0.55	0.55
傾きの変化※ (倍)		2.40		1.93	

※傾きの変化は、以下のように計算した数値である。

内面载荷 = 条件 5 (健全) / 条件 7 (ひび割れ) , 外面载荷 = 条件 6 (健全) / 条件 8 (ひび割れ)

## 5.5 第5章の結論

本章では、埋設環境下におけるプレキャスト製コンクリートフリームについて水路壁載荷法による試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認した。また、本状況下においてひび割れを発生させた時の荷重と変形量の関係を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 埋設環境下におけるコンクリートフリームの荷重と変形量の傾きは、弾性領域内においては線形である。
- ② 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリームの荷重と変形量の傾きは、載荷方向に関係なく、一定である。
- ③ 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリーム内に水がある場合とない場合における荷重と変形量の傾き及び変形量は、差が生じない。
- ④ 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリームについて、同一区間における複数箇所の荷重と変形量の傾き及び変形量を確認した結果、同等であることを確認した。よって、実現場においても水路壁載荷法により健全性を確認することができる。
- ⑤ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリームについて、埋設1日後の荷重と変形量の傾きは、埋設前と比較して載荷方向に関係なく、約6割程度変形し難くなる。これは、埋戻し土の締固めによる反力が作用したためである。
- ⑥ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリームは、埋設4ヶ月後における荷重と変形量の傾きは、埋設1日後よりも、内面載荷で約2割程度変形し難くなり、外面載荷では約1割程度変形しやすい。これは、経年変化により埋戻し土の締固めが進行し、埋戻し土が自立した状態となったため、フリームの内面から載荷する内面載荷では変形し難くなり、フリームの内側に引き込む外面載荷では、変形しやすくなったためである。
- ⑦ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリーム底版の外面にひび割れを発生させた場合は、埋設4ヶ月後の荷重と変形量の傾きと比較して、内面載荷ではR側で約1.3倍、L側で約2倍、外面載荷ではR側で約1.1倍、L側で約2倍の差が生じる結果となった。よって、フリームの内面から目視確認できない外面底版部にひび割れが発生している場合は、水路壁載荷法により異常を特定することができる。

## 第 5 章の参考文献

- [1] 日本工業規格：砂置換法による土の密度試験方法，JISA1214，2013
- [2] 地盤工学会：ポータブルコーン貫入試験方法，JGS 1431，2012
- [3] 農林水産省：農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」，2016

## 第6章 コンクリート開水路の構造安全性評価手法の開発

### 6.1 概要

現状の機能診断は、事前調査、現地踏査、現地調査及び必要に応じて詳細調査が実施されている。今回開発した水路壁載荷法をどのタイミングで実施するかを検討した結果、現状、コンクリート開水路の構造安全性を評価することができる方法が実在しないことから、現地調査及び詳細調査にて実施することが適切であると考えた。そこで、本章では水路壁載荷装置をコンクリート開水路に設置する手順及び装置による荷重を負荷する手順を設定した。

また、水路壁載荷法により得られたデータからコンクリート開水路の健全性を判定する必要がある。しかし、コンクリート開水路の力学的な安全性能の評価基準は、実在していない。そこで、機能診断評価図による方法、推定式評価表による方法及び路線内相対評価表による方法について検討した結果、実現場における荷重と変形量を必要データ数が少なく、機能診断評価図や推定式による評価は現状では難しいと考え、暫定ではあるが路線内相対評価表による判定方法によりコンクリート開水路の力学的安全性を評価することを提案した。

## 6.2 水路壁載荷法の調査方法

### 6.2.1 調査前の準備

調査を実施するに当たり、全体の作業効率を高め、正確な計測と安全性を確保するために実施する。事前に準備及び確認すべき項目を整理する。

#### (1) 事前調査と事前確認・打ち合わせ

評価対象となる現場の地図，コンクリート開水路の図面，これまでの調査実績や補修実績などの確認を実施する。現場を示す地図からは，評価対象となる開水路の距離などの把握をし，開水路の図面からはそれぞれの寸法が適用範囲内かを把握する。開水路が埋設されており，**図 6.1** に示す範囲が土により埋め戻されている場合は，水路壁載荷装置を設置するための排土や除草が必要である（**写真 6.1**）。なお，事前に把握したこれらの箇所を現地調査で確認する。

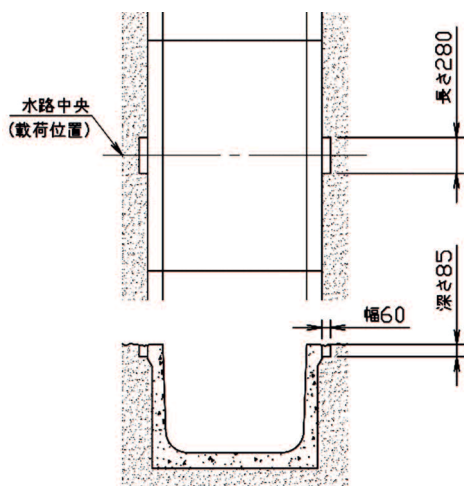


図 6.1 排土の範囲



写真 6.1 排土の実施状況例

#### (2) 調査計画書の策定・打ち合わせ

詳細調査に際して事前に調査計画書の策定を実施し，施主や関係各署との打ち合わせを実施する。調査計画には主に以下の内容を記述し，円滑かつ安全な調査に向けた検討を実施する。

- ①概要（工事名，概要，目的など）
- ②調査内容（期間，調査場所，調査区間など）
- ③調査方法（工法，手順，注意点など）
- ④成果物（データの書式，写真野帳，分析・解析結果の例など）
- ⑤調査の体制（現場組織，代表者，管理者など）
- ⑥作業フロー（調査の詳細手順など）
- ⑦使用機材（調査に使用する機材など）
- ⑧安全衛生対策（緊急事態発生時の連絡体制，現場における緊急連絡先など）



## 6.2.2 水路壁載荷装置

水路壁載荷装置は、図 6.2 及び図 6.3 に示すとおり、荷重計測、変位計測、記録装置で構成されており、内空幅や壁厚に応じて調整できる構造である。荷重計測は、開水路の側壁に設置するクランプとロードセルを組み込んだ載荷機構が分割されたものであり、変位計測は、開水路側壁について片側を固定し、もう一方に変位計を設置しているため、両側の側壁における変形量を計測するものである。なお、変位計は、装置とは独立したものである。記録装置とは、データロガーを示す。

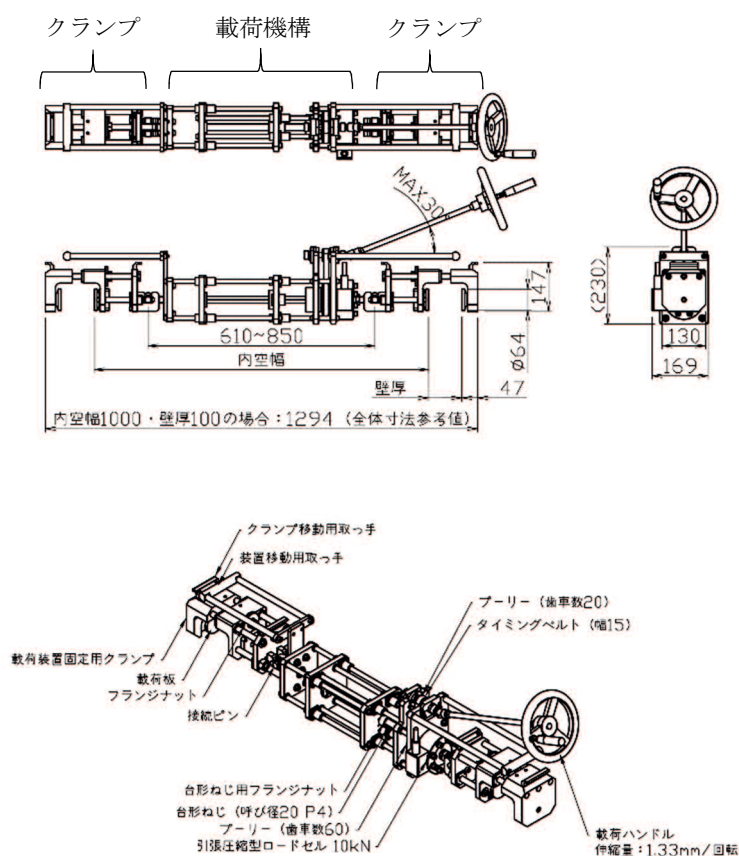


図 6.2 水路壁載荷装置（荷重計測部）概要図

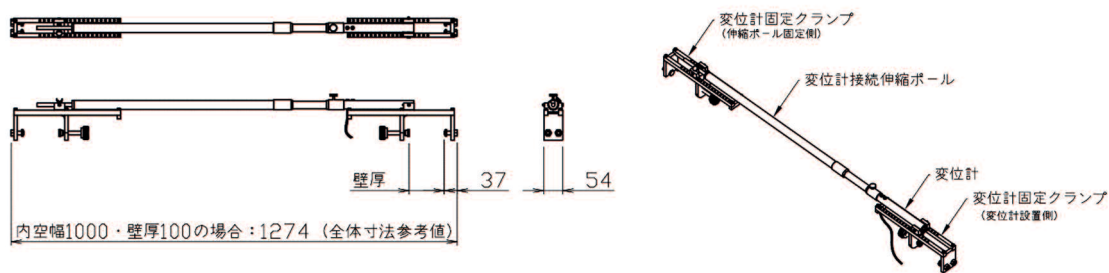


図 6.3 水路壁載荷装置（変位計測部）概要図

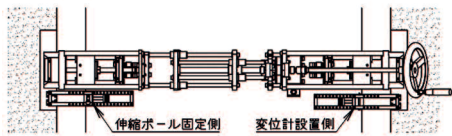
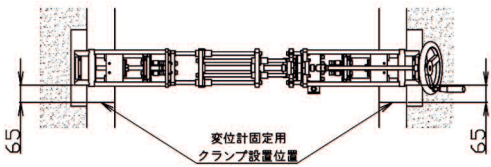
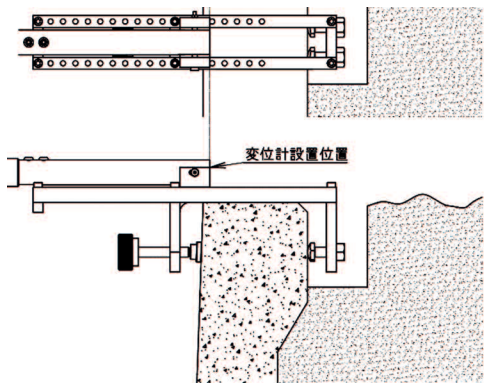
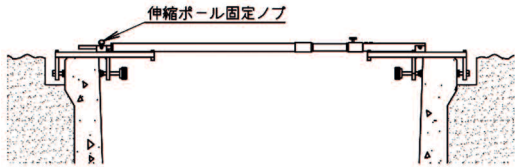
### 6.2.3 水路壁載荷装置の設置手順

水路壁載荷装置をコンクリート開水路に設置する時の手順は、表 6.1 に示すとおりである。

表 6.1 水路壁載荷装置の設置手順

手順 1：設置位置の墨出し	
<p>①開水路中央の側壁天端（装置の載荷する位置）に墨出しをする。これが、装置の載荷する位置になる。</p> <p>②載荷位置より 65mm の位置に墨出しをする。これが、載荷装置固定用クランプを設置する位置になる。</p>	
手順 2：載荷装置用クランプの取り付け	
<p>①片側のクランプを墨出し線に合わせて設置し、フランジナットをスパナにて固定する。反対側のクランプは手締めにて仮固定する。</p> <p>②クランプに専用の治具（レーザー発光部・受光部）を取り付ける。</p> <p>③受光部側にあるピンの先端にレーザー光が照射されるように、クランプの位置を調整し、固定する。</p>	
手順 3：載荷装置の設置	
<p>載荷装置の両端にある接続ピンをクランプの溝に挿入する。</p> <p>※事前にクランプの載荷装置設置側のプレート間（外側）の距離を実測し、載荷装置移動用取手が接続されているプレート間（外側）の距離を実測値から 260mm 除した寸法に調整する。</p>	

表 6.1 水路壁載荷装置の設置手順（つづき）

<p>手順 4：変位計固定用クランプの取り付け</p>	
<p>① 載荷装置固定用クランプの端部より 65mm に位置に墨出しする。これが変位計固定用クランプの設置する位置になる。</p>	
<p>② 墨出し線に合わせて、クランプ固定する。 ※ 載荷装置のハンドル側に変位計設置側を固定する。</p>	
<p>③ 変位計の先端をクランプの突起部の端面に位置を合わせる。 ※ 事前に内空幅に応じた伸縮ポールの長さを調整する。</p>	
<p>④ 伸縮ポール固定ノブを締め込み、変位計を固定する。</p>	

## 6.2.4 計測方法

### (1) 載荷する荷重と変形量

前章までの鉄筋コンクリートフリームについてひび割れを発生させた時の荷重は 20kN 程度であり、変形量は 3mm 程度であった。現状においてデータは少ないが、この結果から対象となるコンクリート開水路を破壊させない荷重と変形量を考慮し、載荷する荷重は 5kN 程度とし、変形量が 0.5mm 程度を暫定的に設定した。載荷による開水路側壁の破損を防止するため、目標となる変形量を超える載荷を行わないものとする。

コンクリートの弾性係数は、現場打ちコンクリートやコンクリート二次製品によっても大きく異なることや施工当初のデータが残っている場合も少ない等の理由から、机上計算により変形量を推定することは難しい。しかし、変形量の目安は、式 (6-1) により概ね推定することができる。ただし、実測時において変形量が計算値との乖離大きい場合や変形量が 0.5mm を超過する場合は、載荷する荷重を見直すものとする。

$$\delta = \frac{P \cdot a^3}{3EI}, \quad I = \frac{L \cdot t^3}{12}, \quad \delta = \frac{4P \cdot a^3}{E \cdot L \cdot t^3} \quad \dots\dots\dots (6-1)$$

ここに、 $\delta$  : 変形量 (mm)

$P$  : 載荷荷重 (N)

$a$  : 側壁高さ (mm)

$E$  : 弾性係数 (30,000N/mm<sup>2</sup> とする.)

$L$  : 荷重が作用する幅 (1,000mm とする.)

$t$  : 壁厚 (mm)

### (2) 計測位置

水路壁載荷装置は開水路の中央に設置し、変位計は装置両側から 130mm に位置に設置するものとする。装置と変位計の関係は、前章までの結果から、例えば、開水路の外面にひび割れが発生している場合は、変位計の位置に関係なく変化を確認することができるため、上記のように設定した。

### (3) 載荷方法

載荷速度は、前章までの試験から、ハンドル 1 回転当たり 12 秒以上の速度で回すことは難しいことと、ハンドル 1 回転当たり 12 秒から 120 秒の範囲では、荷重と変形量の変化がなかったことから、実用性を考慮し、ハンドルの回転速度は、1 回転あたり 12 秒～20 秒を目安とした。なお、載荷方向に応じたハンドルの回転方向は、外面載荷を実施する場合にはハンドルを正 (右) 回転とし、内面載荷を実施する場合にはハンドルを逆 (左) 回転とする。

#### (4) 載荷手順

載荷手順については、下記の検討結果から決定した。

図 6.4 は、水路壁載荷装置を健全な鉄筋コンクリートフリーム（農業土木事業協会型）の中央に設置し、変位計は、装置を中心に 130mm の位置に設置した後、外面載荷にて 5kN まで荷重を負荷させた時における変形量の関係を示したものである。1 回目は荷重がフリーな状態から 5kN まで負荷し、2 回目以降は 0.5kN まで除荷した後に 5kN まで負荷した。なお、フリームの寸法は、第 4 章で使用した内空幅 1,000mm、内空高さ 1,000mm、有効長 2,000mm である。

1 回目と 2 回目の荷重と変形量の傾きは、5%程度の差が生じているが、2 回目と 3 回目及び 3 回目と 4 回目の傾きは、1%程度の差であった。これは、荷重を負荷させた時に装置に発生する歪みが影響しているのか、またはフリームに起因するものなのか確認することができていないが、載荷手順は、3 回連続して実施後にデータが安定する 3 回目のデータを採用するものとした。

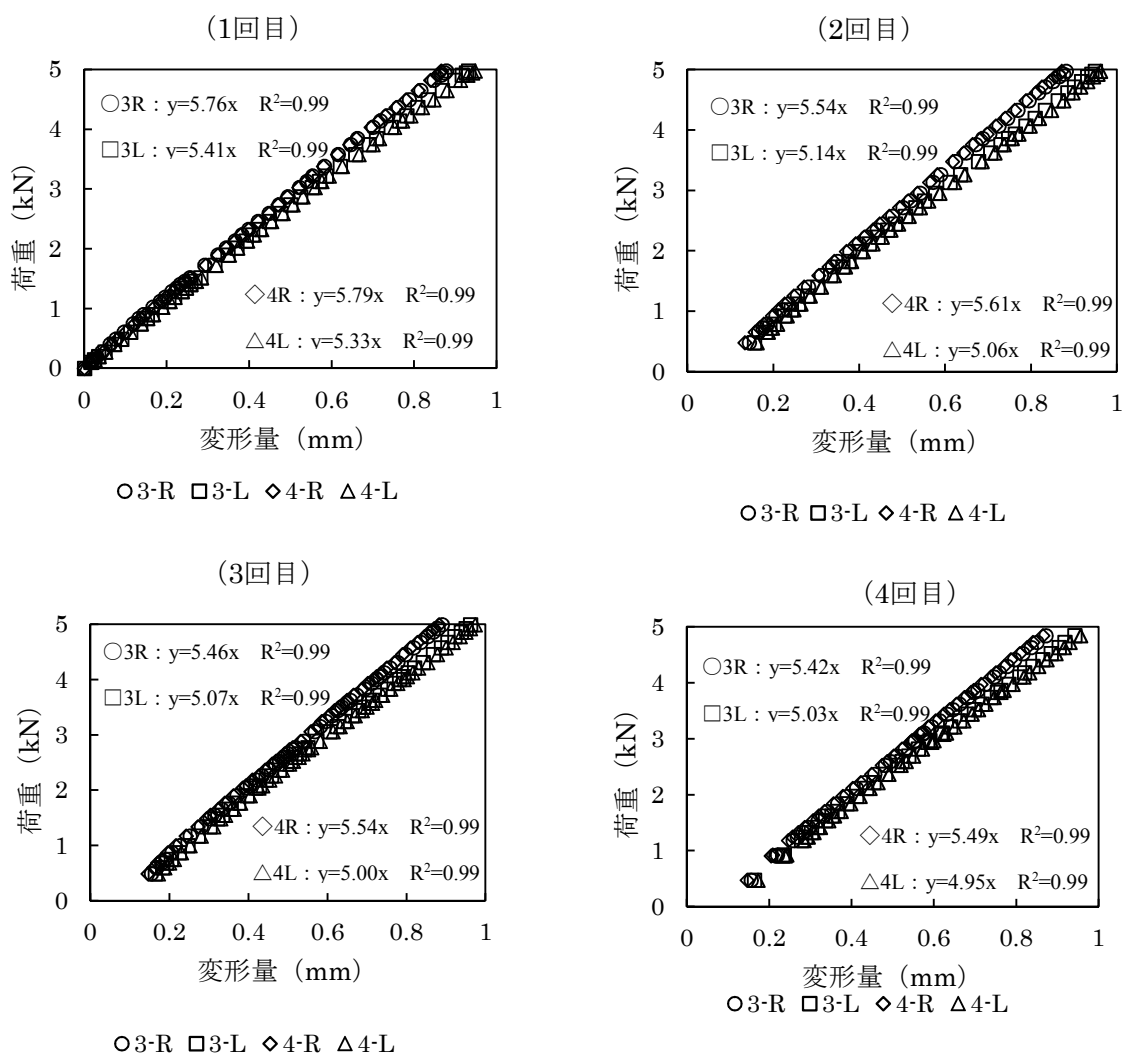


図 6.4 外面載荷における荷重と変形量の関係

また、コンクリート構造物にひび割れが発生している場合は、骨材の影響により噛み合わせ効果が発生する。稲森ら [1] は、コンクリート要素のせん断強度を定量化するために、粗骨材の種類や量がおよぼす影響について実験的検討を試みた結果、粗骨材の噛み合わせ効果により純せん断強度が大きくなることを明らかにしている。コンクリート開水路の内面からは目視確認ができない開水路の外面にひび割れが発生している場合、水路壁載荷法を実施するとひび割れ部の骨材による噛み合わせ効果により荷重や変形量に影響が生じることが考えられる。また、ひび割れの界面は、相互に接触している状況が多種多様なものであるため、ひび割れ界面のずれに応じて寄与するひび割れ形状の影響度も様々であると考えられる。そこで、計測は複数回実施することで安定したデータを採用するものとする。

以上から、外面載荷（初期載荷）→内面載荷（3回）→外面載荷（3回）の順番で実施する。データは、①～②の荷重と変形量の傾き、⑦と⑬の変形量及び荷重と変形量の傾きを採用する。なお、3回目除荷が完了するまで連続で作業を実施する。

① 載荷荷重値まで載荷	.....	初期載荷	.....外面載荷
② 載荷荷重値まで載荷	.....	1回目載荷	} 内面載荷
③ 載荷荷重値の10%まで荷重を除荷	.....	1回目除荷	
④ 載荷荷重値まで載荷	.....	2回目載荷	
⑤ 載荷荷重値の10%まで荷重を除荷	.....	2回目除荷	
⑥ 載荷荷重値まで載荷	.....	3回目載荷	
⑦ 載荷荷重値が0になるまで荷重を除荷	.....	3回目除荷	
⑧ 載荷荷重値まで載荷	.....	1回目載荷	} 外面載荷
⑨ 載荷荷重値の10%まで荷重を除荷	.....	1回目除荷	
⑩ 載荷荷重値まで載荷	.....	2回目載荷	
⑪ 載荷荷重値の10%まで荷重を除荷	.....	2回目除荷	
⑫ 載荷荷重値まで載荷	.....	3回目載荷	
⑬ 載荷荷重値が0になるまで荷重を除荷	.....	3回目除荷	

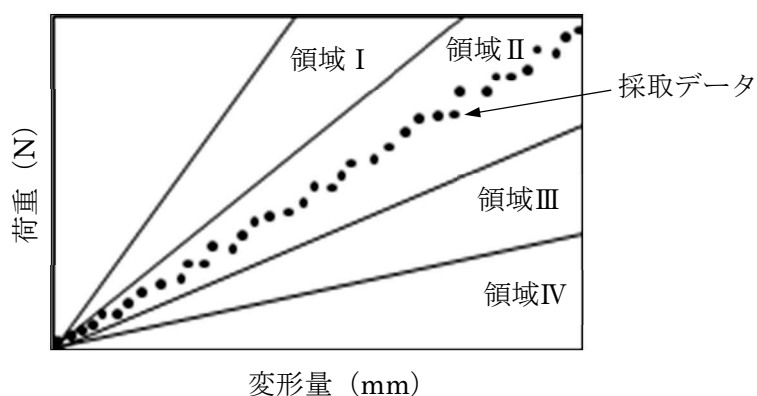
### 6.3 判定方法の提案

水路壁載荷法によって得られる荷重と変形量の傾き及び変形量により力学的な安全性能を評価するためには、判定方法を定める必要がある。しかし、コンクリート開水路の力学的な安全性能の評価基準は、実在していない。

そこで、水路壁載荷法により得られたデータを用いて機能診断を行うために 3 方法の評価基準を検討し、判定方法を提案する。

#### (1) 機能診断評価図による判定

コンクリート開水路の壁厚等の寸法、ひび割れ本数や発生箇所等を考慮した機能診断評価図を作成し、これと実測したデータを用いて評価することが考えられる。図 6.5 は機能診断評価図のイメージであるが、評価対象とするコンクリート開水路の領域を農業用水利施設の健全度評価表 [2] を参考に 4 段階に区分し、採取したデータと重ね合わせることで、現状の健全性を判定するものである。この判定方法は、データを採取した時点で診断が可能となる。しかし、現場によって開水路の壁厚、ひび割れ本数や発生箇所等は様々であることから、機能診断評価図を作成するためには、膨大な量の計測データの蓄積やそのデータ採取においても膨大な時間が必要になると考える。また、数値解析により計測データと組み合わせることで機能診断評価図を作成することは可能であると考えられるが、膨大な調査と分析が必要になると考える。



領域 I : 対策不要, 領域 II : 要観察  
領域 III : 要対策 (補修あるいは補強), 領域 IV : 改築

図 6.5 機能診断評価図のイメージ [3]

## (2) 推定式評価による判定

たわみの理論式で推定した変形量，コンクリート開水路の形状（壁厚や水路高さ等），ハンチ形状等を整理した評価表を作成し，これを用いた評価を行うことが考えられる。第3章の「3.2 弾性理論に基づく計算値と実測値との比較」の中で推定式を導いたが，様々な壁厚や様々なハンチ形状を持つコンクリート開水路から推定式を導くには，膨大な推定式が必要になり，導いた推定式と計測データとの整合性を検討する必要がある。特に，コンクリートの弾性係数は，使用材料や埋設環境に影響されることや経年変化における数値が明確になっていないことから，設定することは難しい。また，水路壁載荷法は，弾性領域内での評価が対象となるが，弾塑性領域や塑性領域で評価する場合には，推定式も複雑になることも想定される。

以上から，領域を設定する機能診断評価表の作成には，(1)の機能診断評価図による判定と同様に，膨大な量のデータの蓄積やそのデータ採取に要する膨大な時間が必要となる。

## (3) 路線内相対評価による判定

路線内において荷重と変形量の傾きを測定し，健全部と劣化部における相対評価表を作成する。同一路線内のコンクリート開水路であれば，施工時期，使用材料，並びに施工方法は概ね一定であることが多いと考ええると，健全な状態における荷重と変形量の傾きは同程度となる。そこで，現地調査により評価対象箇所を選定し，例えば，健全部と劣化部の測定した荷重と変形量の傾きや変形量を相対的に比較することで異常箇所を特定することができる。計測後，異常箇所については，ひび割れ調査等のより詳細な診断を実施することで，コンクリート開水路の健全度を設定し，適切な対策を講じるものとする。

## (4) 荷重と変形量の切片による判定

フリームが健全な場合においては，外面載荷（初期載荷）から内面載荷（1回目）を連続して実施した時の荷重と変形量の関係を確認した時，その傾きは1.1程度の違いが生じる結果であった。一方，フリームの底版部にひび割れが発生している場合の傾きは，1.5倍程度の違いが生じることを結果であった。



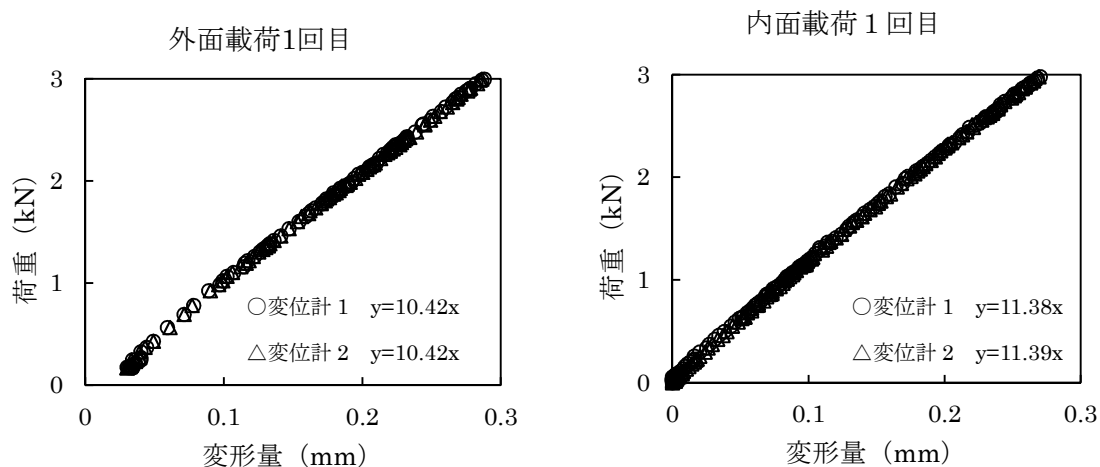


図1 実現場のフリュームにおける荷重と変形量の関係

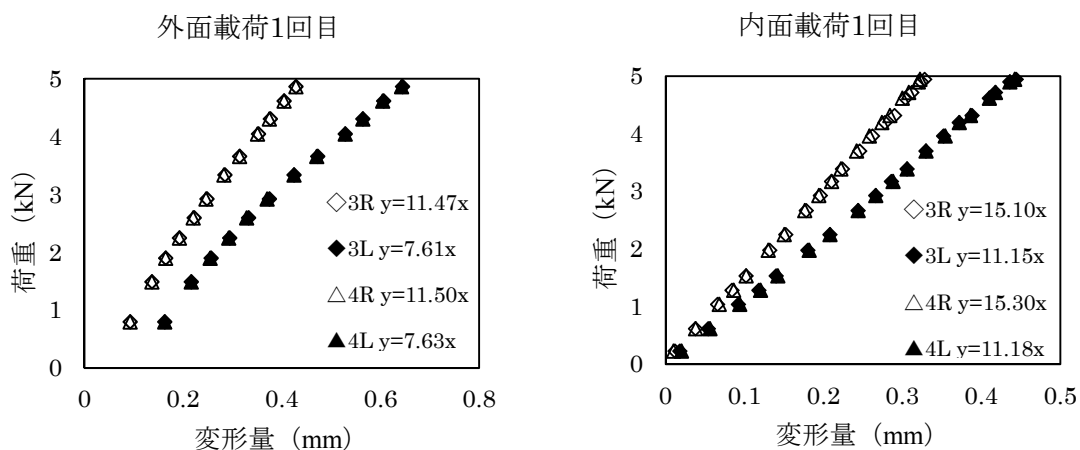


図2 鳥取大学内に敷設したフリュームにおける荷重と変形量の関係

よって、本研究では相対評価による判定方法をコンクリート開水路の力学的な安全性能の評価方法とする。この評価方法に外面載荷による初期載荷と1回目の内面載荷を連続して実施した時の荷重と変形量における傾きが1.5倍以上の違いが発生する場合を確認することで、コンクリート開水路の健全性を確認することを提案する。

#### 6.4 第6章の結論

本章では、機能診断調査の手順について整理し、水路壁載荷法により得られたデータからコンクリート開水路の健全性を評価する判定方法を提案した結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 水路壁載荷法は、内面載荷を3回、外面載荷をそれぞれ3回連続して実施した時の3回目のデータを採用する。また、2回目及び3回目の載荷は、載荷する荷重の10%程度まで除荷してから計測する。その理由は、計測回数の増加に伴い、データが安定するためである。
- ② 実現場における荷重と変形量を必要データ数が少ないことから、機能診断評価図や推定式による評価は現状では難しいと考え、暫定ではあるが路線内相対評価表による判定方法によりコンクリート開水路の力学的安全性を評価するものとした。
- ③ 外面載荷における初期載荷と1回目の内面載荷を連続して実施した時の荷重と変形量の関係において、傾きが1.5倍以上の差が生じる場合はコンクリート開水路の外面にひび割れ等の異常が発生している可能性があるため、コンクリート開水路の健全性を確認する判定方法として提案する。

## 第 6 章の参考文献

- [1] 稲森あゆみ, 吉武勇, 久部修弘, 浜田純夫: コンクリート要素の純せん断強度に与える粗骨材の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.781-786, 2005
- [2] 農林水産省: 農業水利施設の機能保全の手引き「開水路」, 2016
- [3] 兵頭正浩, 藤本光伸, 清水邦宏, 石井将幸, 緒方英彦: 水路壁載荷法による農業用鉄筋コンクリート開水路の耐力評価手法の提案, 農業農村工学会誌 86巻6号, pp.519-522, 2018

## 第 7 章 コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法のアンカーに作用する引抜荷重の評価

### 7.1 概要

水路壁載荷法により異常が確認されたコンクリート開水路は、適切な補修又は補強による予防保全対策が必要となる。対策工法には、無機系又は有機系材料による表面被覆工法、シート工法及びアンカー固定方式パネル工法等がある。この中でアンカー固定方式パネル工法は、コンクリート開水路の内面側に所定の隙間を設けた状態でパネル材をアンカーで設置した後、その隙間にグラウト材等を充填する。この時、パネル材には、グラウト材充填による圧力が作用するためアンカーには、引抜荷重が作用する。底版に固定したアンカーと側版に固定したアンカーに作用する圧力は、固定する高さに依存することから作用する圧力も異なるが、明確に整理されていない。

そこで、本章では、底版及び側壁に作用する引抜荷重の計算式について机上検討により適切な計算式を提案するとともに、パネル材に作用する変形量から実験値と計算値を比較することで、その妥当性の確認を行った。

## 7.2 背景

農業水利施設のストックマネジメントにおいて健全度評価は、機能診断調査結果から対象施設がどの健全度に該当するか対象レベルを指標化した表 7.1 に示す健全度指標を用いることで判定している。

表 7.1 健全度の指標と施設の状態 [1]

健全度指標	施設の状態
S-5	変状がほとんど認められない状態
S-4	軽微な変状が認められる状態
S-3	変状が顕著に認められる状態
S-2	施設の構造安定性に影響を及ぼす変状が認められる状態
S-1	施設の構造安定性に重大な影響を及ぼす変状が複数認められる状態

この健全度指標により補修、補強又は更新等の対策工法を選定し、農業水利施設の延命化を図っている。この健全度評価は、コンクリート開水路の内面から変状を確認し、そのデータと表7.2に示す鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表を照合することで実施している。一方、水路壁載荷法では、構造安全性を評価できることを前章までに述べてきた。

本章では、水路壁載荷法等による機能診断の結果、対策が必要となったコンクリート開水

表 7.2 鉄筋コンクリート開水路の施設状態評価表 [1]

健全度ランク		S-5	S-4	S-3	S-2
形状と幅	タイプ：初期ひび割れ 形状：目地間中央や部材解放部の垂直ひび割れ 原因：乾燥収縮・温度応力	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上～ 1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当 するものが 全体的
	タイプ：劣化要因不特定のひび割れ 原因：症状が複合的であり劣化要因を特定できないもの 形状：特徴的な形状を示さないひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上～ 1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当 するものが 全体的
	タイプ：ひび割れ先行型ひび割れ 原因：ASR や凍害などの劣化要因 形状：格子状・亀甲状などのひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上～ 1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当 するものが 全体的
	タイプ：外力によるひび割れ 原因：構造物に作用する曲げ・せん断力 形状：側壁を横切るような水平又は斜めのひび割れ	最大 ひび割れ幅 0.2mm 未満	最大 ひび割れ幅 0.2mm 以上～ 1.0mm 未満	最大 ひび割れ幅 1.0mm 以上	S-3 に該当 するものが 全体的

路における補修・補強工法の中のアンカー固定方式パネル工法について述べるものとする。

老朽化したコンクリート開水路の補修・補強工法として、アンカー固定方式パネル工法がある。アンカー固定方式パネル工法 [2, 3] は、**図 7.1** に示すとおりパネル材を金属拡張式アンカーにより既設水路に固定することで水路と一体化し、水路表面を被覆する工法である。また、開水路とパネル材の隙間に充填あるいは設置する材料には、緩衝材 [4]、ポラスコンクリート [5] 及び無収縮モルタル [6] があり、既設水路の供用環境に応じて使い分けられている。この中でも無収縮モルタルは、流動化剤等を使用するため、流動性並びに充填性に優れ、ポンプ圧送による打設が可能であることから一般によく使用されている。

本工法は、水路の劣化部を除去せずに施工することができるため、水路表面が劣化している場合においても適正なアンカーの仕様、長さ及び本数を選択することにより、施工することができる。つまり、アンカーの性能が期待できれば、水路の形状や寸法を問わずに適用することができる工法である。

農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】（以下、マニュアルという）では、アンカー固定方式パネル工法に要求する品質管理項目として、パネル材を対象とした耐候性及び耐摩耗性、アンカーを対象とした付着性が規定されている [7]。アンカー固定方式パネル工法は、アンカーを介して既設水路躯体とパネル材の一体化を図る構造である。そのため、施工時における付着性に加えて、補修完了後においてパネル工法の供用期間中は効果が期待される期間においても既設水路躯体との付着性が持続的に要求される。つまり、付着性は、アンカー固定方式パネル工法において最も重要な品質管理項目といえる。

既設水路とパネル材の付着性は、グラウト材の充填圧がアンカーに作用する場合を想定したアンカー引抜荷重により評価することになっている。しかし、現状では、アンカー引抜荷重を求める際の計算式が底版及び側壁において同じ式を使用していることから、底版に比べて側壁のアンカーの配置が過密になり、施工性や経済性に影響を及ぼすことが課題とされている。

そこで、側壁におけるアンカー引抜荷重の計算式を提案することにした。本章では、無収縮モルタルをグラウト材として充填した際に発生するパネル材のたわみ量を測定し、実測のたわみ量から側壁に作用するアンカー引抜荷重の計算式を検討した。

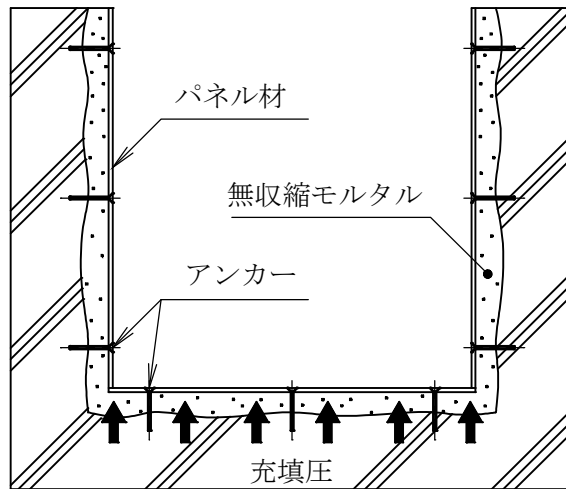


図 7.1 アンカー固定方式パネル工法の概要図

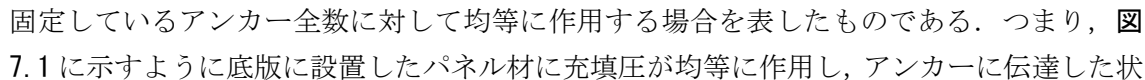
### 7.3 アンカー引抜荷重の計算式

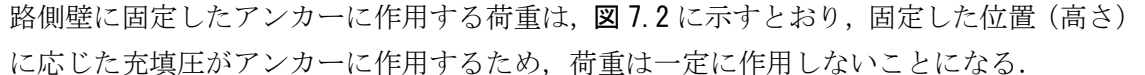
アンカー固定方式パネル工法の付着性は、アンカー引抜荷重により評価される。マニュアルでは、「既設水路躯体とパネル材の隙間にグラウト材を充填した時の充填圧を短期荷重、パネル工法による補修完了後に浸透水による浸透圧が作用した時を長期荷重とし、短期荷重では安全率 1.0、長期荷重では安全率 2.0 を乗じた値の内、いずれか大きい方をアンカー 1 本に必要な引抜荷重として採用する」[7] と記載されている。その引抜荷重の算定式は、式 (7-1) のとおりである。

$$P = S \cdot \left\{ \frac{H \cdot \gamma_m (\text{又は} \gamma_w) \cdot B \cdot L}{A} \right\} \dots\dots\dots (7-1)$$

- ここに、 $P$  : アンカー 1 本あたりに必要な引抜荷重 (kN/本)
- $\gamma_m$  : 無収縮モルタルの単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_w$  : 浸透水の単位体積重量 (10kN/m<sup>3</sup>)
- $H$  : 水路の高さ (m)
- $B$  : 板幅 (m)
- $L$  : パネル材長手方向の長さ (m)
- $A$  : パネル面積当たりのアンカー打設本数 (本)
- $S$  : 安全率

実現場において、アンカーを設置し、アンカー引抜試験機により測定した引抜荷重と式 (7-1) で算出した設計引抜荷重を比較し、測定した値が設計引抜荷重よりも大きい場合は、設計したアンカー径及び本数を使用することができる。一方、測定した値が小さい場合は、アンカー径またはアンカーの数量を増やす等の対策を講じることになる。

式 (7-1) は、既設水路躯体の高さに相当するグラウト材の充填圧がパネル材に作用し、固定しているアンカー全数に対して均等に作用する場合を表したものである。つまり、 7.1 に示すように底版に設置したパネル材に充填圧が均等に作用し、アンカーに伝達した状況を表したものである。

一方、側壁に作用する荷重は、底版の場合と同様に高さに依存してパネル材に作用すると考えられるが、全ての水路側壁に固定した全てのアンカーは同じ高さで固定されていないため、充填圧が全てのアンカーに対して充填圧が均等に作用するわけではない。つまり、水路側壁に固定したアンカーに作用する荷重は、 7.2 に示すとおり、固定した位置 (高さ) に応じた充填圧がアンカーに作用するため、荷重は一定に作用しないことになる。

よって、アンカーに作用する荷重は、式 (7-2) のような算定式で表すことができると考える。なお、アンカーに作用する水路の高さ方向における有効幅については、アンカーの固定位置によって、均等に案分するものとする。

$$P = S \cdot \left\{ (H - H_i) \cdot \gamma_m (\text{又は} \gamma_w) \cdot C_i \cdot L / A \right\} \dots\dots\dots (7-2)$$

- ここに、 $P$  : アンカー 1 本あたりに必要な引抜荷重 (kN/本)
- $\gamma_m$  : 無収縮モルタルの単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)
- $\gamma_w$  : 浸透水の単位体積重量 (10kN/m<sup>3</sup>)
- $H$  : 水路の高さ (m)
- $H_i$  : 水路底版から固定したアンカーまでの高さ (m)
- $C_i$  : 水路高さ方向の有効幅 (=  $P_x + P_y$ )
- $P_x$  : 対象とするアンカーから上部のパネル材までの寸法、または対象とするアンカーから上部のアンカーまでの寸法の 1/2 (m)
- $P_y$  : 対象とするアンカーから下部のパネル材までの寸法、または対象とするアンカーから下部のアンカーまでの寸法の 1/2 (m)
- $L$  : パネル材長手方向の長さ (m)
- $A$  : パネル材 1 枚当たりの長手方向に同じ高さで固定したアンカー打設本数 (本)
- $S$  : 安全率



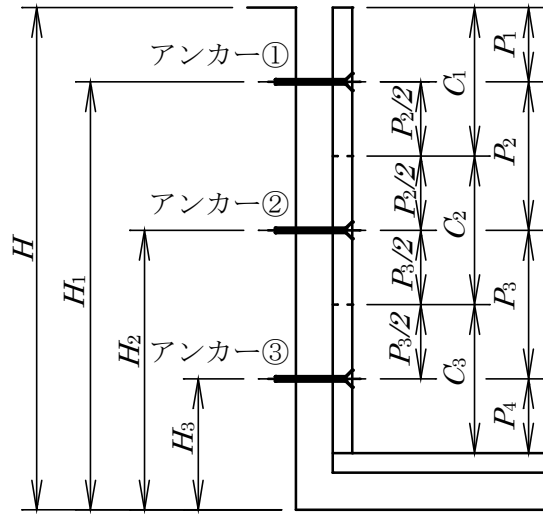


図 7.2 側壁に作用する荷重の概要図

ここで、式 (7-2) を用いて、図 7.2 に示すアンカー①にグラウト材による充填圧が作用した時のアンカー引抜荷重は、以下のように表すことができる。底版からアンカー①までの高さは  $H_1$ 、水路高さ方向に作用する有効幅  $C_1$  は、 $P_x$  がアンカー①から上部パネル材までの寸法  $P_1$ 、 $P_y$  がアンカー①から下部のアンカーであるアンカー②までの寸法  $P_2$  の半分であり、これらを加算したものであるため、式 (7-3) のように表すことができる。

$$P = S \cdot \left\{ (H - H_1) \cdot \gamma_m \cdot (P_1 + P_2 / 2) \cdot L / A \right\} \dots\dots\dots (7-3)$$

また、同様にアンカー②及びアンカー③について、グラウト材による充填圧が作用した時における引抜荷重の計算式は、式 (7-4) 及び式 (7-5) のように表すことができる。

$$P = S \cdot \left\{ (H - H_2) \cdot \gamma_m \cdot (P_2 / 2 + P_3 / 2) \cdot L / A \right\} \dots\dots\dots (7-4)$$

$$P = S \cdot \left\{ (H - H_3) \cdot \gamma_m \cdot (P_3 / 2 + P_4) \cdot L / A \right\} \dots\dots\dots (7-5)$$

側壁のアンカーに作用する荷重は、固定する高さに依存することになるため、底版と側壁に固定したアンカーに作用する荷重は、それぞれ別の式を用いて計算する必要があると考える。ここで、一つの事例として表 7.3 及び図 7.3 の条件において、側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重を計算すると結果は表 7.4 のとおりとなる。

式 (7-1) を採用した場合は、前述のとおりアンカー①～③にはグラウト材による充填圧が均等に作用するため、引抜荷重は全て同じ値となる。一方、式 (7-2) の場合は、アンカーの設置高さに応じた荷重が作用することになるため、底版に近いほどアンカーに作用する荷重は大きくなり、側壁頂部に近いほど、荷重は小さくなる。アンカーの作用する荷重は、

式 (7-1) の結果と比較して下部のアンカー③では約 80%, 上部のアンカー①では約 10%の引抜荷重が作用することになる。また, アンカー①とアンカー③に作用する引抜荷重を比較すると, アンカー③に作用する荷重は, アンカー①に作用する荷重に対して約 8 倍の荷重差が生じる結果となる。

次に, 実水路においてグラウト材充填時に発生するパネル材のたわみ量を計測し, その結果を利用して, 提案する式 (7-2) の妥当性を検証する。

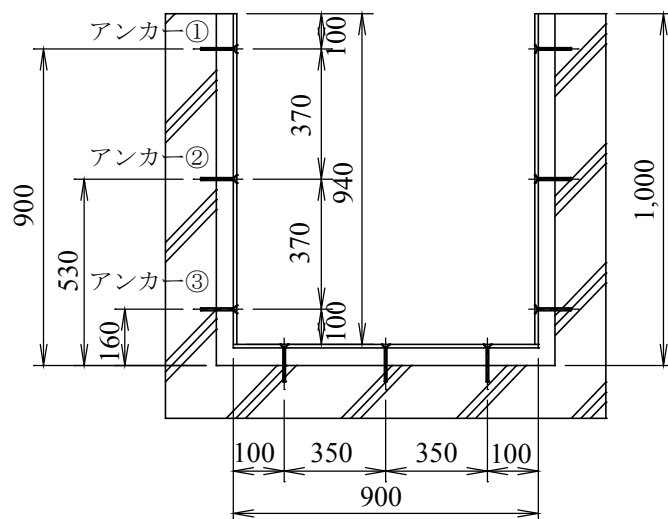


図 7.3 計算で用いる断面図 (単位 : mm)

表 7.3 計算条件

パネルの厚さ	10mm
底版のパネル	幅 900mm×長さ 1,000mm
側壁のパネル	幅 940mm×長さ 1,000mm
パネル長手方向のアンカー固定数量	3ヶ
グラウト材の単位体積重量	22kN/m <sup>3</sup>
安全率	長期 : 2.0, 短期 : 1.0

表 7.4 計算結果

条件		式 (1)	式 (2)
短期 (充填時)	アンカー①	2.2kN/本	0.21kN/本
	アンカー②		1.28kN/本
	アンカー③		1.76kN/本
長期 (浸透時)	アンカー①	2.0kN/本	0.19kN/本
	アンカー②		1.16kN/本
	アンカー③		1.60kN/本

## 7.4 たわみ計測によるアンカー引抜荷重式の検証

### 7.4.1 試験条件

グラウト材を充填した時にパネル材に発生するたわみ量の計測は、1982年に築造された現場打ち鉄筋コンクリート製開水路にて実施した。この開水路は排水路として使用されており、その寸法は、幅1,400mm、高さ1,000mm、厚さ190mmである。なお、開水路の構造図及びコンクリートの配合等は不明である。

この開水路の内面にパネル材をアンカーで固定し、既設水路躯体とパネル材の隙間に無収縮モルタルを充填した時のパネル材に発生するたわみ量を計測した。パネル材は、強化プラスチック複合板（FRPM板）である。アンカーは、本体打込み式に分類される金属拡張アンカーであるM8（材質：SUS304）を使用した。なお、アンカー埋込み長さは35mmである。

今回、使用した材料の物性値は、表7.5に示すとおりである。なお、無収縮モルタルの物性値は、材齢28日における3個の供試片の平均値である。FRPM板を固定するアンカーの間隔は、最大0.5mと設定している。この設定理由を以下に説明する。

グラウト材を充填する前において、FRPM板はグラウト材の充填が可能な隙間を設けた状態においてアンカーで固定されるため、FRPM板の上に人荷重が作用した場合（人が乗った際）には、FRPM板にはアンカーの固定間隔に応じた曲げ応力及びたわみ量が発生する。そこで、この状態を単純支持梁として考え、FRPM板のアンカーで固定した中央部に集中荷重が作用した場合を想定した発生応力 $\sigma$ は、式(7-6)から式(7-8)から変換した式(7-9)、発生たわみ量 $\delta$ は、式(7-10)及び式(7-11)から変換した式(7-12)により計算することができる。ここで、人荷重 $P$ を1kN、アンカーの支持間隔 $L$ を0.5m、FRPM板の弾性係数 $E$ を13.7GPa、FRPMの厚さ $t$ を0.001m、FRPM板の有効幅 $B$ を1mとして上記式に代入した結果、発生応力 $\sigma$ が7.5MPa、発生たわみ量 $\delta$ が2mm（支持間隔に対する発生たわみ率1/250）となる。

$$\sigma = \frac{M}{Z} \dots\dots (7-6), \quad M = \frac{P \cdot L}{4} \dots\dots (7-7), \quad Z = \frac{B \cdot t^2}{6} \dots\dots (7-8)$$

$$\sigma = \frac{3P \cdot L}{2B \cdot t^2} \dots\dots (7-9)$$

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{48E \cdot I} \dots\dots (7-10), \quad I = \frac{B \cdot t^3}{12} \dots\dots (7-11)$$

$$\delta = \frac{P \cdot L^3}{4E \cdot B \cdot t^3} \dots\dots (7-12)$$

日本下水道事業団では、下水道施設に対して効率的な設計を実施するために設計指針、設計標準、設計要領及び設計資料が整備されている。この中の標準図において、縞鋼板 [8]

やFRP蓋[9]は、設計注意事項として中央集中荷重1kNが作用した時の許容たわみ量は支持間隔の1/200以下と規定されている。今回の計算条件において、支持間隔0.5mの1/200である許容たわみ量2.5mmを満足する支持間隔Lは、式(7-12)から変換した式(7-13)により計算すると0.53mとなる。そこで、日本下水道事業団で規定されている許容たわみ量を参考とし、アンカーで固定する最大間隔は0.5mと設定している。また、側壁における最大間隔は、安全を考慮し底版における検討結果と同様の寸法設定としている。

$$L = \sqrt[3]{\frac{4\delta \cdot E \cdot B \cdot t^3}{P}} \dots\dots (7-13)$$

今回、FRPM板を固定したアンカーの間隔は、図7.4に示すとおり6箇所である。また、発生たわみ量の計測は、図7.5に示す箇所に接触式変位計(非直線性0.2%F.S.)を設置し、1分間隔で測定した。ただし、今回、底版部のグラウト材は、FRPM板を設置する前に打設した状態であったため、側壁のパネル材を対象として発生たわみ量を計測した。その計測状況を写真7.1に示す。

グラウト材は、モルタルミキサーにて現場配合した無収縮モルタルである。その配合を表7.4に示し、物性値を表7.5に示す。グラウト材を打設する前には、コンクリート標準示方書[規準編]に記載された充填モルタルの流動性試験方法(JSCE-F541-1999)[10,11]に準じて試験を行った。これは、配合した直後のグラウト材について、PCグラウトの流動化試験方法(JSCE-F531-1999)[12]で規定された漏斗を使用し、漏斗上面まで注いだグラウト材が漏斗の流出口から途切れるまでの時間を計測するものである。構造物施工管理要領では、無収縮モルタルの品質管理基準として流動性確認試験による流下時間は、8±2秒と規定されている[13]。今回、流動性確認試験を実施した結果、実測の平均値(試験数2回)は6.5秒であった。グラウト材の充填量は、側壁の片側が0.25m<sup>3</sup>であり、その充填方法は、グラウトポンプにて水路側壁の頂部から注入ホースを使用し、自然流下で行った。なお、充填状況は、目視にて確認した。充填時の到達時間は、図7.5の測点B及び測点Cが約4~5分後、測点Aが約8分後、水路側壁頂部への到達は、約10分後であった。

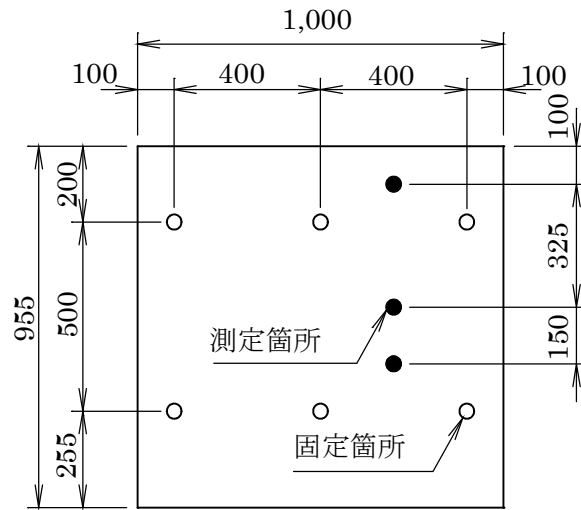


図 7.4 アンカー固定箇所及びたわみ量  
測定箇所詳細図 (単位 : mm)

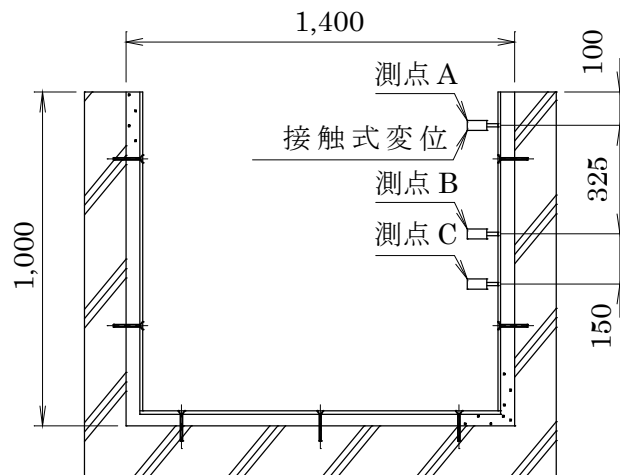


図 7.5 たわみ量測定断面図 (単位 : mm)

表 7.4 無収縮モルタルの配合

W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	W	C	S	膨張性混和材	流動化剤
37.1	320	852	882	23.5	23.5

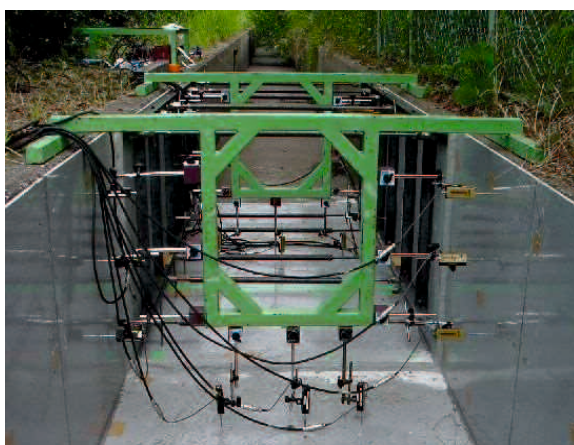


写真 7.1 測定状況

表 7.5 使用材料の物性値

種類	項目	物性値
FRPM 板	板厚 (mm)	10
	曲げ強度 (MPa)	100
	曲げ弾性係数 (GPa)	13.7
無収縮モルタル	単位体積重量 (kN/m <sup>3</sup> )	22
	圧縮強度 (MPa)	55.1
	曲げ強度 (MPa)	7.4

#### 7.4.2 試験結果

グラウト材の充填圧が作用した時の FRPM 板に発生するたわみ量は、表 7.6 に示すような結果となった。測点 C では、グラウト材が到達した 4 分後において 0.5mm を記録した。測点 C で測定したたわみ量 0.5mm が最大値であり、充填完了後においてもたわみ量が進行することはなかった。他の測点も同様にグラウト材が変位計に到達する時のたわみ量が最大値となった。また、測点 A は、水路側壁の頂部に近い計測位置であることから、パネル材に作用する充填圧が測点 B 及び C と比べて小さいことが想定されるため、たわみ量はほとんど発生することはなかった。この結果からも、側壁のアンカーに作用する荷重は、高さに依存して作用すると考えられる。なお、測点 B 及び測点 C のたわみ量は、40 分後には 0.1mm 減少している結果となっている。その原因としては、今回使用した変位計の測定幅は ±0.1mm (温度変化については考慮していない) であることや実測時における測定誤差等により発生したものと考える。

表 7.6 発生たわみ量の測定結果 (単位 : mm)

充填後の経過時間	測点		
	A	B	C
1 分後	0	0	0
2 分後	0	0	0
3 分後	0	0.2	0.3
4 分後	0	0.4	0.5
5 分後	-0.1	0.4	0.5
6 分後	-0.1	0.4	0.5
7 分後	-0.1	0.4	0.5
8 分後	-0.1	0.4	0.5
9 分後	0	0.4	0.5
10 分後	-0.1	0.4	0.5
20 分後	0	0.3	0.4
30 分後	0	0.3	0.4
40 分後	0	0.3	0.4

### 7.5 実測値と計算値との整合性

測点 B 及び測点 C の FRPM 板に発生したたわみ量を計算し、表 7.6 の計測した結果との比較を行った。測点 B 及び測点 C のたわみ量は、幅 400mm、高さ 500mm の長方形となる 4 辺がアンカーで固定されていることから、4 辺が固定された状態と同様であると見なし、グラウト材による充填圧がこの長方形部に作用した時のたわみ量を計算した。

たわみ量の計算式は、機械工学設計便覧に掲載されている長方形板のたわみ式(7-14) [14] を用いた。

$$\delta = \alpha_2 \cdot \frac{p_1 \cdot a^4}{E \cdot t^3} \dots\dots\dots (7-14)$$

- ただし、 $\delta$  : 発生たわみ量 (m)
- $\alpha_2$  : 最大たわみ係数
- $P_1$  : FRPM 板に作用する荷重 (kN/m<sup>2</sup>)
- $a$  : アンカーによる支持幅 (m)
- $E$  : FRPM 板の曲げ弾性係数 (kN/m<sup>2</sup>)
- $t$  : FRPM 板の厚さ (m)

この計算式は、4 辺が固定された平板に等分布荷重が作用するもので、最大たわみ係数は、両辺の長さの比から最大たわみ係数をグラフから読み取るものである。なお、本計算式及び

係数は、微小たわみ理論によるもので、たわみ量がパネル材の厚さよりも小さいことを前提としたものである。最大たわみ係数 $\alpha_2$ は、幅 $a=400\text{mm}$ 、高さ $b=500\text{mm}$ であることから $b/a=1.25$ となる。よって、図 7.6 から $\alpha_2$ は 0.02 と読み取ることができる。また、計算に用いる諸物性は、表 7.5 から、 $E=13.7\text{GPa}$ 、 $t=0.01\text{m}$ 、 $\gamma_m=22\text{kN/m}^3$ を代入して行った。FRPM 板に作用する単位面積当たりの荷重 $P_1$ は、式 (7-2) を用いて上部アンカーに作用する引抜荷重と下部アンカーの作用する引抜荷重を加算して、パネルの面積で除した  $11\text{kN/m}^2$  を代入した。

計算結果のたわみ量は  $0.41\text{mm}$  となり、実測した最大たわみ量と同程度の結果になることを確認した。このことから、グラウト材を充填する時にパネル材に発生するたわみ量は、平板曲げたわみの式で類似する結果が得られることを確認した。

以上の計算結果から、パネル材に作用する側壁のたわみ量は、グラウト材の充填圧に依存する。つまり、側壁に固定したアンカーに作用する荷重は、高さに依存することが明らかになった。このことから、底版に固定したアンカーに作用する式 (7-1) を側壁に固定したアンカーに適用すると過剰な引抜荷重となるため、側壁のアンカーに作用する荷重は、アンカーを固定した高さに応じて求める式 (7-2) で検討することが適切であると考えられる。

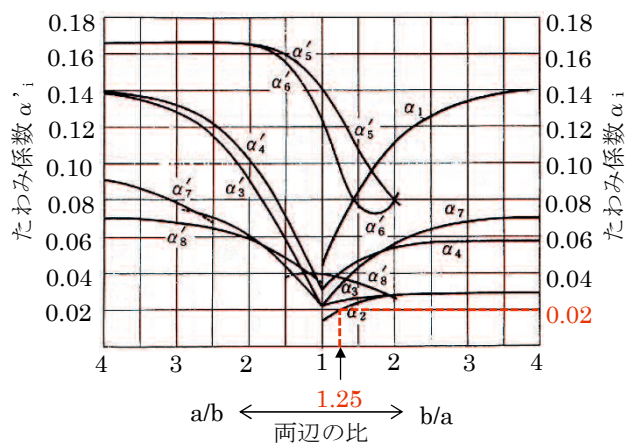


図 7.6 最大たわみ係数 [14]



## 7.6 第7章の結論

本章では、機能診断結果により補修・補強による対策工法を選定する必要がある。補修・補強工法の一つであるアンカー固定方式パネル工法は、品質管理項目の一つに、既設開水路との付着性が要求されている。今回、グラウト材を充填した時に発生するパネル材のたわみ量から、側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重の計算式を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① アンカー1本あたりに必要な引抜荷重の計算は、底版及び側壁に関係なくグラウト材の打設高さに依存する。しかし、側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重は、固定位置（高さ）に依存することを考慮した上で検討することが適切である。
- ② 側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重は、底版で用いる式（7-1）では過剰な結果となるため、式（7-2）で計算することを新たに提案する。
- ③ グラウト材充填時に発生するパネル材のたわみ量は、平板曲げたわみの式で近似する結果が得られる。

## 第7章の参考文献

- [1] 農林水産省農村振興局整備部設計課：農業水利施設の機能保全手引き「開水路」，2016
- [2] 緒方英彦，石神暁郎，田場一矢：将来的なモニタリングが可能な開水路対策工法，農業農村工学会誌，第83巻，第10号，pp.19-22，2015
- [3] 藤本光伸，兵頭正浩，石井将幸，緒方英彦：開水路の更生工法であるパネル工法のFRPM板および中込材が補強効果に及ぼす影響，農業農村工学大会講演要旨集，pp.717-718，2016
- [4] 佐藤智，石神暁郎，金田俊和：FRPM板と緩衝材を用いた表面被覆工法の寒冷地での耐久性およびコンクリート開水路に対する凍結融解作用抑制効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.1675-1680，2013
- [5] 石神暁郎，緒方英彦，藤本光伸，青山裕俊：寒冷地における開水路更生工法，農業農村工学会誌，第83巻，第9号，pp.37-40，2015
- [6] 裕昌也：FRPM板ライニング工法の紹介，ARIC情報，第64号，pp.84-88，2001
- [7] 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室：農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル【開水路補修編】(案)，p.80，2015
- [8] 財団法人下水道業務管理センター：下水道施設標準図(詳細)土木・建築・建築設備(機械)編，pp.5-6，2003
- [9] 下水道事業団普及委員会：2次製品及び同製品の標準図(案)，図面番号4，1991
- [10] 土木学会：コンクリート標準示方書[基準編]，充填モルタルの流動性試験方法(JSCE-F541-1999)，p.217，2007
- [11] 日本道路公団：日本道路公団試験方法，無収縮モルタル品質管理試験方法(JHS 312-1992)，pp.3-173，1992
- [12] 土木学会：コンクリート標準示方書[基準編]，PCグラウトの流動性確認試験方法(JSCE-F531-1999)，pp.210-211，2007
- [13] 東日本，中日本及び西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，pp.2-223，2015
- [14] 日本機械学会：機械工学便覧α基礎編，pp.α3-54-55，2007

## 第8章 結論

耐用年数を超過した農業用水利施設は、今後増加傾向にあるため、突発事故も増加することは想定される。また、周辺環境の変化や設置条件により、改築できない箇所も存在すると考えられる。そのため、現状の耐久性を向上させる補修だけでは対応できない事例も増加し、コンクリート開水路の構造的耐力を回復又は向上させると補強のニーズも増加することが想定される。補修と補強を選定する上でも、コンクリート開水路の現有耐力を適切に診断することが求められるが、現状では、判別できる診断方法が存在しない。

以上のことを踏まえ、本研究では、まず、現状の機能診断手法を整理し、水路壁載荷法が適用できるコンクリート開水路の種類や劣化要因を選定した。次に、品質が安定しているコンクリート二次製品であるフリームについて、健全な状態とひび割れを発生させた状態におけるフリームの荷重と変形量の関係を確認した。さらに、埋設環境下におかれたフリームや滞留水の影響について検証した後、背面にひび割れを発生させたフリームについて荷重と変形量の関係を確認した。

以下に本研究の各章で得られた結論を示し、再度これらの結論を要約するとともに、今後の課題と期待を述べて本論文の結論とする。

第2章では、本研究を進めるに当たり、対象とするコンクリート開水路及び変状について整理した。また、水路壁載荷装置の構造について整理した。

- ① 対象とするコンクリート開水路は、底版と側版が一体化している擁壁型水路の鉄筋コンクリート開水路とし、フリーム、プレキャストコンクリートフリーム、排水フリーム及び大型フリームとする。
- ② コンクリート開水路の変状は、外力が作用したことにより既に変形が生じているものや寒冷地に起因する凍害の影響を受けているものは、水路壁載荷装置の設置や荷重を負荷することは難しいと判断し、対象からは除外した。
- ③ 水路壁載荷装置における荷重の載荷は、負荷する荷重の微調整や負荷した荷重の保持状況を考慮し、ねじ締め式を採用した。
- ④ 変位計は、荷重を保持した時に発生する装置の歪みを計測し、一定した変形量の計測ができないことから、装置に組み込む構造ではなく、装置と分離する構造とした。
- ⑤ 装置の構造は、開水路の内面方向から荷重を負荷する内面載荷と開水路の外側から荷重を負荷する外面載荷の二方向から耐力を評価することができるものとした。
- ⑥ 装置の取り回しが容易に行えるように、人力で持ち運べる重量の約30kgとした。水路壁載荷法の特徴は、計測した直後に結果を確認することができるものであり、また、非破壊診断であることから、試験後の修復等は必要としないものとした。

第3章では、試作した水路壁載荷装置にて、プレキャスト製コンクリートフリームによる外圧試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認した。また、理論式による計算結果と試験による実測値との比較を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 健全なコンクリートフリームにおける左右の側壁は、内面及び外面載荷に伴って、弾性域内においては均等に変形している。
- ② 健全なコンクリートフリームの弾性域内における荷重と変形量の傾きは、載荷方向に関係なく、一定である。
- ③ 載荷速度が、0.113kN/秒（ハンドル1回転あたり12秒程度）から0.026kN/秒（ハンドル1回転あたり120秒程度）の範囲内では、荷重と変形量の傾きは、ほぼ同等である。
- ④ 試験体最上部に設置した変位計A及びBに発生する変形量について理論式を導いた時の計算結果と試験における実測値は、一致したため、変形量は理論式により推定できる可能性がある。

第4章では、ひび割れを発生させたプレキャスト製コンクリートフリームによる外圧試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① フリームの外面底版部にひび割れを発生させ試験体における荷重と変形量の関係は、弾性領域内においては線形であることを確認した。また、フリームの側壁部に貫通ひび割れを発生させた試験体においても同様であった。
- ② フリームの外面底版部にひび割れを発生させ試験体における荷重と変形量の傾きは、健全品よりも内面載荷で約1.2倍、外面載荷で約1.5倍の差が生じることを確認した。内面載荷では、荷重の増加とともにフリームの外面に発生させたひび割れが、開こうとする方向に作用するため、ひび割れが閉じ、さらに圧縮される内面載荷よりも同一荷重による変形が大きくなった。
- ③ 水路内面から目視確認できないひび割れが発生したフリームにおいて、水路壁載荷法により異常を検知することができる。
- ④ フリームの側壁部に貫通ひび割れを発生させた試験体の荷重と変形量の傾きは、鉄筋が健全な状態であれば、健全品とほぼ同等である。
- ⑤ 貫通ひび割れが発生したフリームについては、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係に差が生じなければ、鉄筋は健全であると考えられるため、本手法は鉄筋の健全性を検知できる可能性がある。

第5章では、埋設環境下におけるプレキャスト製コンクリートフリームについて水路壁載荷法による試験を実施し、フリームの側壁部に発生する荷重と変形量の関係を確認

した。また、本状況下においてひび割れを発生させた時の荷重と変形量の関係を確認した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① 埋設環境下におけるコンクリートフリームの荷重と変形量の傾きは、弾性領域内においては線形である。
- ② 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリームの荷重と変形量の傾きは、載荷方向に関係なく、一定である。
- ③ 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリーム内に水がある場合とない場合における荷重と変形量の傾き及び変形量は、差が生じない。
- ④ 埋戻し土が均一に締固められていないコンクリートフリームについて、同一区間における複数箇所の荷重と変形量の傾き及び変形量を確認した結果、同等であることを確認した。よって、実現場においても水路壁載荷法により健全性を確認することができる。
- ⑤ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリームについて、埋設 1 日後の荷重と変形量の傾きは、埋設前と比較して載荷方向に関係なく、約 6 割程度変形し難くなる。これは、埋戻し土の締固めによる反力が作用したためである。
- ⑥ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリームは、埋設 4 ヶ月後における荷重と変形量の傾きは、埋設 1 日後よりも、内面載荷で約 2 割程度変形し難くなり、外面載荷では約 1 割程度変形しやすい。これは、経年変化により埋戻し土の締固めが進行し、埋戻し土が自立した状態となったため、フリームの内面から載荷する内面載荷では変形し難くなり、フリームの内側に引き込む外面載荷では、変形しやすくなったためである。
- ⑦ 埋戻し土が均一に締固められたコンクリートフリーム底版の外面にひび割れを発生させた場合は、埋設 4 ヶ月後の荷重と変形量の傾きと比較して、内面載荷では R 側で約 1.3 倍、L 側で約 2 倍、外面載荷では R 側で約 1.1 倍、L 側で約 2 倍の差が生じる結果となった。よって、フリームの内面から目視確認できない外面底版部にひび割れが発生している場合は、水路壁載荷法により異常を特定することができる。

第 6 章では、機能診断調査の手順について整理し、水路壁載荷法により得られたデータからコンクリート開水路の健全性を評価する判定方法を提案した。

- ① 水路壁載荷法は、内面載荷を 3 回、外面載荷をそれぞれ 3 回連続して実施した時の 3 回目のデータを採用する。また、2 回目及び 3 回目の載荷は、載荷する荷重の 10% 程度まで除荷してから計測する。その理由は、計測回数増加に伴い、データが安定するためである。
- ② 実現場における荷重と変形量を必要データ数が少ないことから、機能診断評価図や推定式による評価は現状では難しいと考え、暫定ではあるが路線内相対評価表による判定方法によりコンクリート開水路の力学的安全性を評価するものとした。

- ③ 外面載荷における初期載荷と 1 回目の内面載荷を連続して実施した時の荷重と変形量の関係において、傾きが 1.5 倍以上の差が生じる場合はコンクリート開水路の外面にひび割れ等の異常が発生している可能性があるため、コンクリート開水路の健全性を確認する判定方法として提案する。

第 7 章では、水路壁載荷法により異常が確認されたコンクリート開水路は、補修又は補強による対策工法を選定する必要がある。補修又は補強工法の一つであるアンカー固定方式パネル工法は、品質管理項目の一つに、既設開水路との付着性が要求されている。今回、グラウト材を充填した時に発生するパネル材のたわみ量から、側版に固定したアンカーに作用する引抜荷重の計算式を検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- ① アンカー 1 本当たりに必要な引抜荷重の計算は、底版及び側壁に関係なくグラウト材の打設高さに依存する。しかし、側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重は、固定位置（高さ）に依存することを考慮した上で検討することが適切である。
- ② 側壁に固定したアンカーに作用する引抜荷重は、底版で用いる式（7-1）では過剰な結果となるため、式（7-2）で計算することを新たに提案する。
- ③ グラウト材充填時に発生するパネル材のたわみ量は、平板曲げたわみの式で近似する結果が得られる。

以上の各章で得られた結論を取りまとめて再整理すると次のようになる。

- 水路壁載荷装置を用いた水路壁載荷法は、コンクリート開水路の構造安全性評価に適用できる非破壊診断手法である。
- 水路壁載荷法により健全なフリームに発生する変形量は、載荷方向、載荷速度に関係なく弾性領域内では直線性を示す。また、この変形量は、理論式によりある程度推定することができる。
- フリームにおいて、内面からは確認できない背面側ひび割れが発生している場合は、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係から異常箇所を特定することができる。
- 現場打ちコンクリートによく発生する温度収縮等による初期ひび割れを想定したフリームを試作し、水路壁載荷法により荷重と変形量の関係を確認した結果、ひび割れの有無による影響は小さい。また、変形量の差異が生じないということは、ひび割れに関係なく一体変形しているため、鉄筋も健全であることが想定される。よって、水路壁載荷法は、鉄筋の健全性を確認できる可能性がある。
- フリーム内に滞留した水の有無における影響について確認した結果、荷重と変形量の関係には、大きな影響が発生しない。
- 同じ施工時期に設置されたコンクリート開水路は、材料や品質に大きな差が生じないと考えられるため、相対評価により異常箇所を特定することができる。
- コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法において、グラウト材を充填する

場合にアンカーに作用する荷重は、底版と側版とでは異なるため、計算式を使い分けることで適切なアンカーの数量等を選定できる。

以上の本研究で得られた結論を踏まえ、今後の課題と期待を以下に述べる。

#### 今後の課題と期待

本研究を通して基本的な成果は得られたと考えているが、実現場の埋設環境下におけるコンクリート開水路の計測は、鳥取市内に限られたものであるため、データ数が少ないのも事実である。コンクリート開水路はコンクリート二次製品を対象として開発を進めてきたが、既存ストック量としては二次製品よりも多い現場打ちコンクリート開水路におけるデータ収集も必要であると考えられる。また、コンクリート開水路の背面における埋戻し土の支持力特性がどのように影響するのか等の詳細な検討も課題として残っている。

既存の農業水利施設の長寿命化を図る上でも、施設の劣化状況を把握し、その劣化の進行が致命的になる前に予防的な工事を行うなど、適切な時期に対策を施すことによって施設の寿命を延ばす必要がある。効率的な対策を講じるためにも、適切な機能診断による維持管理が求められている。現在、コンクリート開水路の場合は、内面から目視調査による機能診断により健全性を評価し、対策を講じている。しかし、標準耐用年数を超過する農業用コンクリート開水路が年々増加傾向にあり、補修だけではなく補強による対策が必要とされることが増加することを考慮すると、現状の診断手法では、まだまだ十分な状態ではないと考えられる。

本研究の成果が、ストックマネジメントにおける既存の農業水利施設を有効利用する上で、水路壁載荷法が、コンクリート開水路の構造安全性を評価できる診断手法として活用されることを期待する。

## 謝辞

本研究では多くの御指導とご協力を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

本論文をまとめるにあたり、終始暖かい激励とご指導、ご鞭撻を賜りました鳥取大学農学部教授の緒方英彦先生、准教授の兵頭正浩先生、並びに島根大学学術研究院環境システム科学系准教授の石井将幸先生に心より感謝申し上げます。皆様には、本研究を始めるきっかけを与えていただき、論文の執筆に対しても誠に親身な御指導をいただきました。また、本研究を遂行するにあたって研究の重要な位置を占める実埋設環境下におかれたフリュームの試験において、緒方先生及び兵頭先生には、地元土地改良区の方々とのパイプ役になっていただき、鳥取大学内の敷地内へのフリューム埋設試験においても関係部署との調整や環境の整備等をおこなっていただきました。学位論文の審査にあつては、鳥取大学農学部教授の猪迫耕二先生と島根大学学術研究院環境システム科学系教授の喜多威知郎先生に快く審査を引き受けていただき、また貴重なご指導とご助言をいただきました。衷心より感謝申し上げます。

本研究は、農業用水利施設におけるコンクリート開水路の構造安全性評価手法を対象としたものであり、既存の農業水利施設の長寿命化を図る上でも、適切な機能診断手法によりコンクリート開水路の健全性を確認することは非常に重要であると考えます。本研究の目標は、現状の機能診断手法では検知することができない機能診断手法を新たに提案することであり、適切にコンクリート開水路の健全性を評価し、効果的な対策工法につなげることにあります。本研究を通じて、基本となる成果は得られたと考えておりますが、目標に到達するためには更なるデータの蓄積と検証が必要であり、今後も継続して研究に取り組んでいく所存です。

本論文は、鳥取大学農学部、島根大学学術研究院環境システム科学系、サンコーテクノ株式会社及び株式会社栗本鐵工所化成品事業部との共同研究の成果あり、到底、私一人では成しえたものではなく、多くの方々からご指導、ご助言をいただきました。研究の遂行にあたっては、株式会社栗本鐵工所化成品事業部技術開発部並びに品質保証部の皆様には、様々な場面でご支援、ご協力をいただきました。また、サンコーテクノ株式会社の八木沢康衛氏、金子英敏氏、清水邦宏氏他には、水路壁載荷装置の開発からコンクリート開水路の健全性を確認する試験の遂行まで、大変ご協力をいただきました。深く感謝いたします。

最後に、終始温かい目で見守ってくれた家族に感謝の意を表する次第です。



## 摘要

農業用排水路は、幹線で約 4.9 万 km、支線を含めると約 40 万 km にも及び、水路の機能低下による水路網の断線は確実に避けなければならない。また、水路の主要な建設材料はコンクリートであり、時間の経過とともに徐々に劣化が進行することで機能低下を引き起こすことが顕在化している。そのために、適切な機能保全を図ることができる体制の整備が求められている。従来の全面的な改築から、機能の監視・診断等によるリスク管理を行いつつ劣化の状況に応じた補修・補強等を計画的に行うことにより、施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理の推進が必要とされている。

現在、開水路における機能保全対策は、表面被覆工法のような補修工法に関する技術開発が進められている。様々な機能保全対策の中から適切な対策を選択、並びに実施するためには、開水路の構造的な現有耐力を正確に評価し、現状を把握することが重要である。しかし、多様な埋設条件等に対応できる耐力を評価できる手法は、確立されていない。また、今後、老朽化した開水路に対して補強による対策が必要な場合には、開水路自体の構造安全性を評価する必要があるが、研究についても着手されていない状況にある。そこで、本研究では、適時適切な機能保全を実施するためにも、「コンクリート開水路の構造安全性を評価する診断手法」を確立するために、まず、対象とする開水路や劣化要因について整理し、開水路の構造安全性を評価するために求められる要求事項を整理した。次に、品質が安定しているコンクリート二次製品である鉄筋コンクリートフリームを対象とし、健全な状態におけるフリームについて、弾性領域内における荷重と変形量の関係を確認した。また、室内において、実埋設環境下におけるコンクリート開水路で見られるひび割れ状況を再現したフリームを作製し、この時の荷重と変形量の関係を確認した。さらに、埋設環境下におかれたコンクリート開水路について、健全な状態とひび割れを発生させたフリームを作製し、荷重と変形量の関係を確認した。これらの試験結果から、コンクリート開水路の構造安全性を評価することができる照査方法を整理した。最後に、構造安全性の評価結果から対策を必要とする場合を想定し、パネル工法を選定した時に裏込め材を充填する時の注意事項について整理した。

本研究によって得られた知見を以下に概括する。

- 水路壁載荷装置を用いた水路壁載荷法は、コンクリート開水路の構造安全性評価に適用できる非破壊診断手法である。
- 水路壁載荷法により健全なコンクリート開水路に発生する変形量は、載荷方向、載荷速度に関係なく弾性領域内では直線性を示す。また、この変形量は、理論式によりある程度推定することができる。
- コンクリート開水路において、内面からは確認できない背面側ひび割れが発生している場合は、水路壁載荷法による荷重と変形量の関係から異常箇所を特定すること

ができる。

- 現場打ちコンクリートによく発生する温度収縮等による初期ひび割れを想定したフリームを試作し、水路壁載荷法により荷重と変形量の関係を確認した結果、ひび割れの有無による影響は小さい。また、変形量の差異が生じないということは、ひび割れに関係なく一体変形しているため、鉄筋も健全であることが想定される。よって、水路壁載荷法は、鉄筋の健全性を確認できる可能性がある。
- コンクリート開水路内に滞留した水の有無における影響について確認した結果、荷重と変形量の関係には、大きな影響が発生しない。
- 同じ施工時期に設置されたコンクリート開水路は、材料や品質に大きな差が生じないと考えられるため、相対評価により異常箇所を特定することができる。
- コンクリート開水路の更生工法であるパネル工法において、グラウト材を充填する場合にアンカーに作用する荷重は、底版と側版とでは異なるため、計算式を使い分けることで適切なアンカーの数量等を選定することができる。

## Abstract

The total length of agricultural canals in Japan is estimated to be approximately 49,000 km if only main canals are considered and approximately 400,000 km if branch canals are included. The interruption of any part of this network due to reduced canal function must be avoided at all costs. Canal function is now beginning to be negatively affected by the deterioration of materials (mainly concrete material) used in canal construction. A scheme to adequately maintain canal performance is therefore urgently needed. In addition to traditional approaches, which include total replacement and risk management conducted by monitoring and evaluating canal function, it will be necessary to implement strategic maintenance schemes to increase the lifespan and reduce the lifecycle costs of existing facilities by performing systematic repairs and reinforcement procedures based on the degree of deterioration.

Presently, technologies such as surface coating and other repair methods are being developed to preserve the function of open canals. To be able to choose and implement the most suitable method for preserving canal function from among available methods, it is necessary to accurately assess current canal conditions by evaluating the structural strength of open canals. However, no method for evaluating the structural strength of canals under various states of burial has been established. Furthermore, if reinforcement is deemed necessary for a deteriorated canal, the structural safety of the canal itself must be evaluated. However, no research has been conducted in this area.

Therefore, to develop a method for evaluating the structural safety of concrete open canals with the ultimate goal of implementing timely and suitable measures to preserve canal function, the types of canals to be targeted, the main causes of deterioration, and parameters to be measured are examined and determined. Next, the load-deflection relationship (within the elastic region) of structurally intact open canals is investigated using factory-made reinforced concrete flumes of consistent quality. In the laboratory, flumes that were designed to simulate cracked concrete open canals in the field are prepared. In addition, the load-deflection relationship of structurally intact and cracked flumes under buried conditions are investigated and its load-deflection relationship is also measured. Based on the results of these trials, verification method for evaluating the structural safety of concrete open canals is developed. Finally, for reference, a case in which a panel method was chosen for the repair of an open canal is examined based on the developed verification method and, precautions regarding the grouting back-filling material are proposed

The main findings of this study are as follows:

- It was demonstrated that the canal wall load method using a loading device is a non-destructive diagnostic method that can be used to evaluate the structural safety of concrete open canals.
- In the case of structurally intact flumes, the deflection induced by the canal wall load method

exhibited a linear relationship to load within the elastic region regardless of load direction and speed. It was also demonstrated that this deflection can be, estimated based on the theory of elasticity.

- It was demonstrated that when cracking in concrete, which is difficult to be checked visually, exist on the back (buried) surface, the location of these abnormalities can be identified based on the load-deflection relationship using the canal wall load method.
- The investigation of flumes to simulate the vertical cracking , that frequently occur in cast-in-place concrete due to temperature-related contraction, revealed that the presence of this kind of cracks has little effect on the load-deflection relationship. It suggests that the entire concrete body is deflected and, therefore, that the horizontal reinforcing bar remains intact. It is supposed that the canal wall load method could be used to evaluate the condition of the reinforcing bar.
- It was found that the presence of water in a concrete open canal does not substantially affect the load-deflection relationship.
- Since a system of concrete open canals is supposed to consist of canals whose material, quality and aging status do not differ greatly, relative assessment can be performed to detect abnormalities.
- In designing of the panel method to repair concrete open canals, the appropriate number and specifications of anchors used with back-filling material should be calculated by using different mathematical formulae for the bottom and side wall, because of the different load on anchors caused by the pressure of back-filling material.

## 学位論文の基礎となる学会誌公表論文リスト

### －学術論文－

- [1] 藤本光伸, 兵頭正浩, 石井将幸, 清水邦宏, 緒方英彦: 水路壁載荷法によるコンクリート開水路の構造安全性評価手法の開発—コンクリート二次製品のフリュームを用いた水路壁載荷法の基礎的研究—, 農業農村工学会論文集, 受理, 2019.04 【本論文; 第3章】
- [2] 藤本光伸, 兵頭正浩, 緒方英彦: アンカー固定方式パネル工法におけるグラウト材充填時のアンカー引抜荷重に関する考察, 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, 第17巻, pp.581-586, 2017.10 【本論文; 第7章】