

表面被覆工法の付着強さ試験の高度化と 評価の留意点

農研機構 川邊 翔平 高橋 良次 金森 拓也 森 充広
鳥取大学 緒方 英彦 加藤 諭

サンコーテクノ株式会社 八木沢康衛 金子 英敏 清水 邦宏 吉岡 直輝

1. はじめに

著者らは、現場で行われる付着強さ試験について、その手法と評価の高度化を目的に検討を行っている。本報では、農業用水路の主要な補修工法である表面被覆工法を対象として、新たな付着強さ試験方法を提案する¹⁾。特に、現場での付着強さ試験では本提案手法にて実施することで、作業者の技量等によらず試験条件を統一しやすい。

農業水利施設における付着強さ試験は、主として補修材料あるいは補修工法の性能照査、補修工事の品質管理、補修後のモニタリングに適用されている^{2), 3), 4)}。

補修材料および工法の性能照査については、工種ごとに「農業水利施設の補修・補強工事に関するマニュアル（案）（以降、「補修補強マニュアル」と記す）」にまとめられている。「補修補強マニュアル」では、材料や工法に求める要求性能とその照査方法が示されている。例えば、「補修補強マニュアル【開水路補修編】」では、開水路の補修工法の要求性能の一つに付着性が挙げられている。付着性は、「補修後に補修材が水路躯体コンクリートから剥離しない性能」として定義されており、表面被覆工法などの付着性の照査には、JSCE-K 561「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法（案）」が規定されている。また、「表面被覆工の施工に際しては、十分な下地処理を行い、付着性を確保しなければならない」との記載とともに、下地

処理後の付着強さの目安値も示されている³⁾。

「農業水利施設の長寿命化のための手引き（以降、「長寿命化の手引き」と記す）」では、工法選定のための視点や考え方、モニタリングなどの調査方法についてまとめられている。「長寿命化の手引き」では、補修等長寿命化対策後に実施するモニタリングにおける定量調査の一つとして表面被覆工法の付着強さ試験が示されており、JSCE-K 531「表面被覆材の付着強さ試験方法（案）」や現場用の引張試験器を用いる方法が解説されている⁴⁾。

以上のように、付着強さ試験は材料の性能照査から施工後の維持管理に至るまで利用される重要な試験の一つである。本報では、主に現場での表面被覆工法の付着強さ試験を想定して、円形付着子を用いた付着強さ試験^{1), 5)}を提案する。提案手法の具体的な手順を示し、現行手法と比較することで、その利点を示す。また、付着強さ試験結果の評価に対する留意点も併せて述べる。

2. 現行および提案する試験法の手順

本章では、提案手法についてその手順を説明する。対比のために現行の試験手順についても述べることにする。試験体の寸法や作製方法などについても差異があるが、ここでは載荷前後の手順のみに注目する。また、類する規格にJIS A 1171「ポリマーセメントモルタルの試験方法 7.4 接着強さ試験」やNEXCO 試験方法

422「付着性能試験方法」などがあるが、本報では「補修補強マニュアル【開水路補修編】」および「長寿命化の手引き」の本編に記されている土木学会規準のJSCE-561とJSCE-531、ならびに現場での試験として用いられている「単軸引張試験」について概説する。

各規準では用語等が異なるので、本報では下記の通り統一する。

- ①付着子：測定面に接着する、引張力を伝達させるためのジグ。
- ②付着強さ：参照する規準・規格によって、「付着強度」「接着強さ」など表記が複数あるが、本稿ではJSCE-K 531の表題にある「付着強さ」を用いる。
- ③単軸引張：「付着強さ試験」「付着強度試験」などは、試験全体をさす言葉であり、試験体に引張荷重を負荷させる段では「単軸引張」という語句を用いることにする。
- ④破断位置：単軸引張による破壊を「破断」と記す。また、破断位置の分類、判別なども各規準間で統一はなされていない。本報では、図-1のように破断位置を分類する。また、補修材を被覆する対象は母材（または母材コンクリート）と表記する。

(1) JSCE-K 561⁶⁾

補修材料・工法の品質基準などを示す「補修補強マニュアル」で示されている、JSCE-K 561 (5.8 付着強度) について、その手順はおおよそ以下のとおりである (図-2)。

- ①内径φ 50mm 以上のコンクリート用コアドリルで、打設面から母材に達するまで切込みを約 10mm 入れる。
- ②使用したコアドリルの内径と同寸法の鋼製付着ジグをエポキシ樹脂接着剤などで貼り付ける。
- ③引張力を載荷する。載荷方法は片引きの単軸引張である。
- ④主な報告事項は、付着強さ、破断箇所の面積比、などである。なお、付着強さは最大引張荷重をコア断面積で除して得る。

以上のように、内径は明確に規定されていないが、円形のコアドリルおよび付着子を用いた試験法が示されている。

(2) JSCE-K 531⁷⁾

JSCE-K 531 の手順はおおよそ以下のとおりである (図-3)。

- ①供試体を、温度 $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、相対湿度 $50 \pm 5\%$ の雰囲気下に水平に静置し、上部引張用鋼製ジグ (40 × 40mm) を接着し、質量約 1kg のおもりを載せ、24 時間静置する。
- ②おもりを取り除き、ジグの周りに母材まで約 1mm の切り込みを入れる。
- ③下部引張用鋼製ジグおよび鋼製当て板を用いて、試験体面に鉛直方向に引張力を、

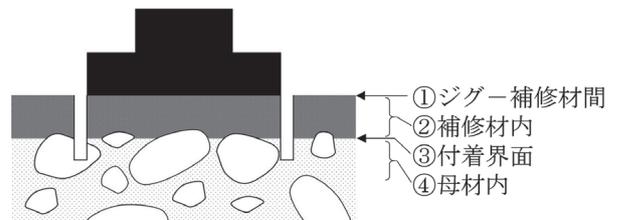


図-1 本稿で用いる破断位置の分類

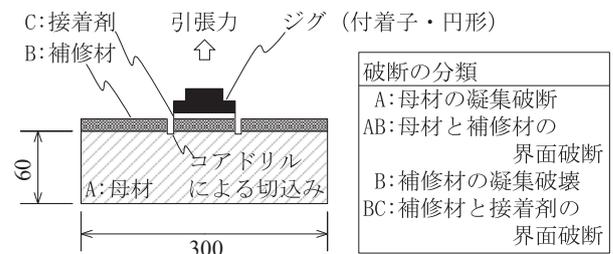


図-2 JSCE-K 561 での引張試験概要 (引用文献⁶⁾ をもとに著者作成)

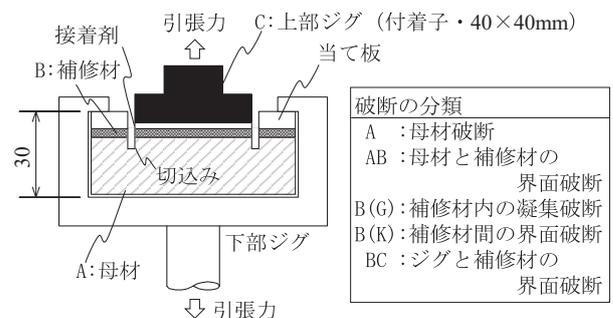


図-3 JSCE-K 531 での引張試験概要 (引用文献⁷⁾ をもとに著者作成)

1,500-2,000N/min の荷重速度で加える。載荷方法は両引きの単軸引張である。

- ④主な報告事項は、付着強さ、破断の状態（面積比），などである。なお、付着強さは最大引張荷重を $1,600\text{mm}^2$ で除して得る。

以上のように、JSCE-K 531 は現場での実施が不可能な試験方法が規定されている。

(3) 現場での単軸引張試験（現行手法）

現在現場での付着強さ試験として実施されている試験の手順を以下に示す。（図-4左側）。

- ①測定面を研磨する。
- ② 40mm 角の付着子に接着剤を塗布し、測定面に貼り付ける。
- ③接着剤が硬化した後に、付着子の周りに切込みを入れ、現場での測定に適した軽量で簡易な片引き単軸引張試験器にて載荷する。
- ④最大荷重を断面積で除して「付着強さ」とする。併せて、破断位置を記録するとともに破断面の状態を観察する。なお、付着強さを得る際の断面積として、多くの場合、定数 $1,600\text{mm}^2$ が用いられている。また、試験値だけを記録する場合や、引き抜いた試験体を写真で記録する場合などもある。

(4) 提案手法

提案手法の手順を述べる（図-4右側）。本手法では、JSCE-K 561 を改良した円形付着子を用いる。さらに、特殊なゴム製リング¹⁾を用いることで試験作業上の合理化を図っている。

- ①測定面を研磨する。現在は #40-80 程度の研磨紙を用いている。
- ②専用コアドリルで円環状の切込みを入れる。
- ③ゴム製リングを切込み（円環状の溝）に挿入する。
- ④φ 45mm の付着子に接着剤を塗布し、ゴム製リング内に挿入する。
- ⑤接着剤が硬化した後に、現行手法と同様の片引き単軸引張試験器にて載荷する。

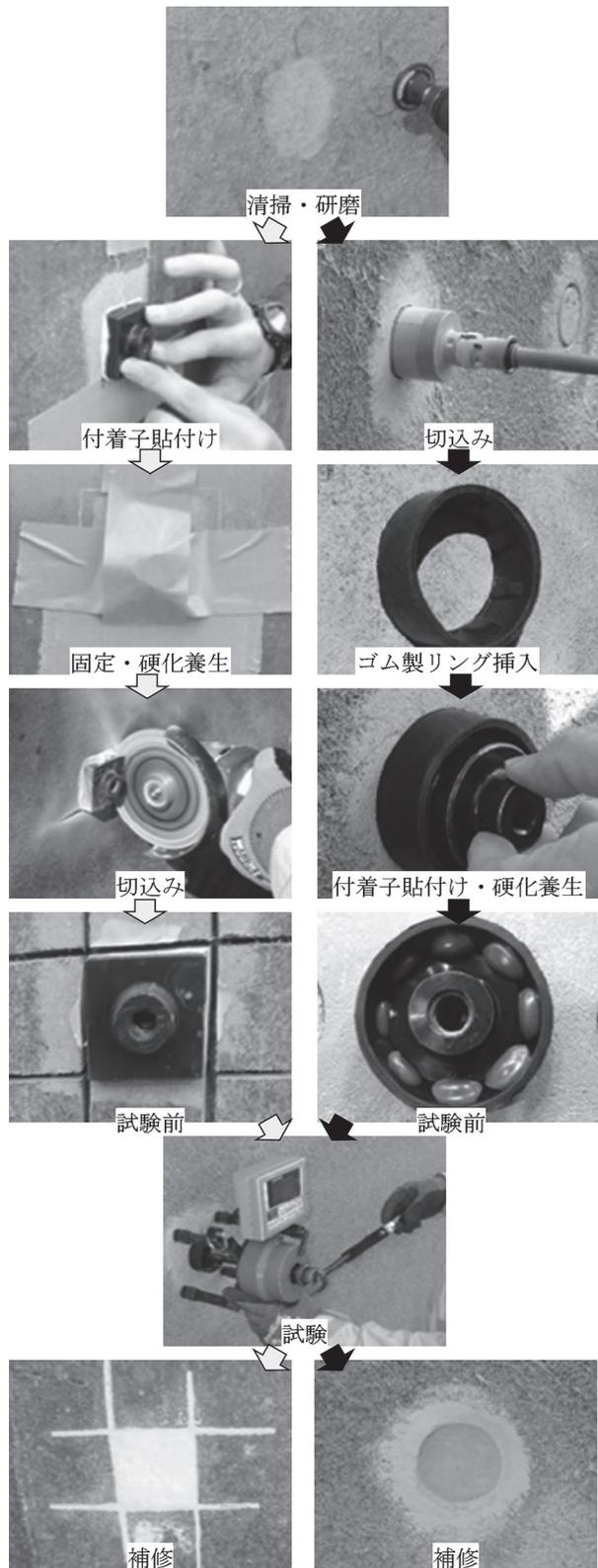


図-4 作業手順例（左：現行手法，右：提案手法）

- ⑥最大引張荷重を付着子の面積（定数 $1,590\text{mm}^2$ ）で除して付着強さとする。併せて、破断位置を記録するとともに、破断面の状態（面積比、乾湿など）を観察する。

以上のように、提案手法はおおむね現行手法と手順や測定原理が同じである。

3. 現行手法の課題と提案手法による解決

ここでは、現場での現行手法の特に試験手順に潜在する課題を整理し、提案手法による解決について解説する。

(1) 付着子の接着

現場で実施されている接着の方法として、付着子を粘着テープで固定することが多いが、接着剤硬化中に付着子が自重でずれることがある(図-5 a)。硬化中に付着子が動くとき接着剤の層厚などに関する不具合が生じ得る。付着子のずり落ちを避けるために、例えば下縁のみ接着前に切込みを入れて、テフロン板などを挿入するなどの工夫で比較的容易に固定することもできる(図-5 b)。

これに対して、提案手法では特殊なゴム製リングにより、付着子の固定が確実になる。また、付着子とゴム製リングとの間には、放射状にわずかな隙間を設けてあり、ここから余剰接着剤が表面側に出てくる。これによって、接着剤充填状況を目視確認できるとともに接着界面における接着剤の厚さを毎回同様にしやすい(図-4「試験前」)。なお、ゴム製リングによる締め付けの試験値への影響は0.05kN程度であり、十分無視できる。

水路底版の水が切れない場合、現行手法では付着子の接着自体が困難なため、モルタル等で土手を形成する場合(図-5 c)や試験自体を断念する場合もある。提案手法におけるゴム製リングを用いることによる副次的な効果として、止水性がある(図-5 d)。10mm程度の水深であれば止水モルタルを使用せずに試験が可能である。また、水没したとしてもジグと補修材の間に充填された接着剤は直接水に触れないため、従来に比べて硬化中の養生環境の影響を受けにくい(図-5 e)。

(2) 切込み

現行手法では、接着剤の硬化後にコンクリー

トカッターを用いて、付着子の周に沿った切込みを入れる。この場合、4辺の切込み深さを均一にすることが非常に困難である(図-6上図)。特に、付着子の隅までを確実に母材まで切込みを入れる必要がある(図-6下図)。また、付着子の周に切込みを入れるが、試験断面を40mm×40mmとすることは難しく、多少大きめになるとともに、断面形状を正方形とすることも困難である。

これに対して提案手法では、コアドリルを用いて円環状の切込みを入れることにより、試験断面積および断面形状だけでなく切込み深さの統一も容易である。その際、コンクリートカッターに比べてコアドリルにはある程度刃厚がある。これによって、粗骨材の目視確認が容易になるため、切込み深さの管理の一助

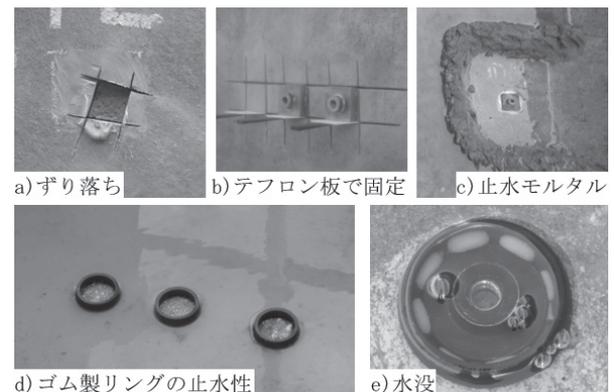


図-5 付着し接着工程における現行手法と提案手法の特徴

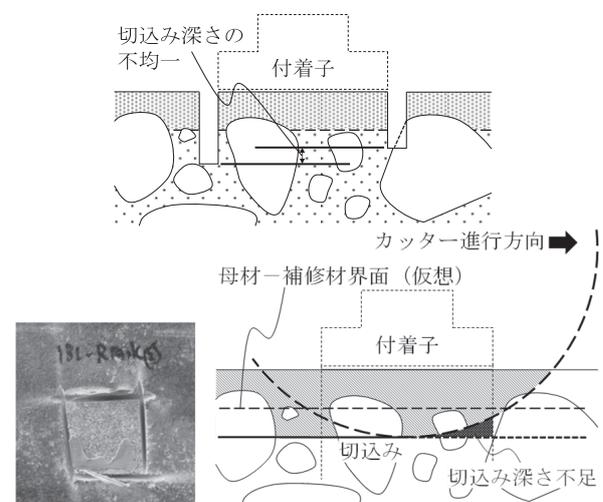
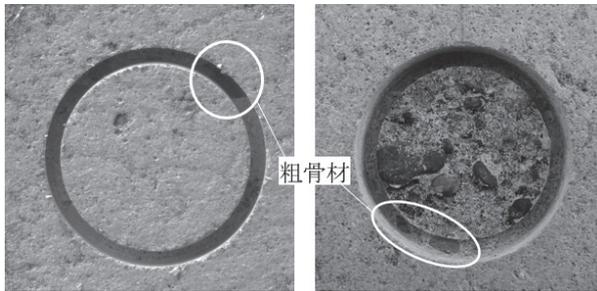


図-6 現行手法での切込みの難しさ(左写真は切込み不足の極端な例)

となる(図-7)。また、コンクリートカッターではなくコアドリルを用いることで粉塵の影響が格段に小さくなる。



切込み作業中(コアドリルによる溝幅は約4.5mm)

引張試験後

図-7 切込みの母材到達(粗骨材)の目視確認

提案手法におけるその他の利点として、試験跡の補修が挙げられる。現行手法では測定面の外へ延びた井桁状のカッター跡への補修材充填に細心の注意が必要であり、この作業が不適切な場合は、将来的に充填補修箇所からの劣化進行が懸念される。提案手法では、ドリル削孔跡への補修材の充填と付着試験箇所の補修を一体的に行うことができるため、確実な充填補修作業を行うことができる。試験値に直接影響する要素ではないが、大きな長所と考える。

以上のように、提案手法は従来法とほぼ同様の手順で実施でき、載荷試験についても同原理の片引き単軸引張試験である。そのうえで、切込み作業や接着作業時の安定化、試験後の確実な充填補修の実施などの点で現行手法に比べて優れている。

4. 提案手法の性能確認

(1) 室内試験¹⁾

提案手法と現行手法とでは付着子の形状と大きさが異なる。また、いずれの手法も、既存の規準に合致するものではないため、両者の比較は重要である。

モルタル単体で作製した供試体に対する室内試験によると、角形断面で試験をすると断面内の応力の生じ方が均一ではないのに対し、円形断面では比較的均一に応力が生じることが確認

された。したがって、破壊試験としての性質として円形断面の方が合理的であると考えられた。

断面積について、現行手法では40mm×40mmであり、粗骨材の寸法に対して十分な面積を有していない。また、断面積が変わることで偏心載荷が生じたときの影響が無視できない可能性がある。つまり、現行手法と断面積が大きく異なる場合、提案手法の試験値が異なる可能性がある。これらを踏まえて、円形付着子の断面積についても検討しており、1,600mm²に近い1,590mm²(=φ45mm)とすることで、現行手法と提案手法の付着強さの値がほぼ同等であることが確認されている。

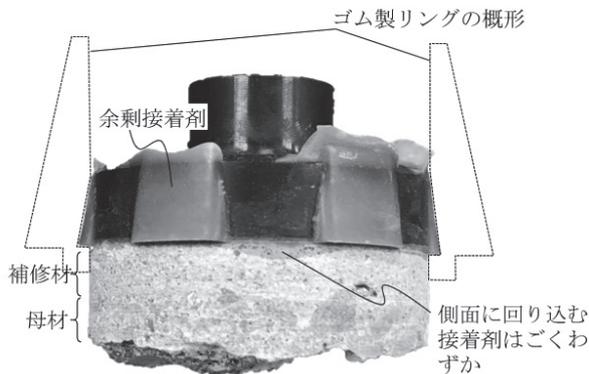
(2) 現場実証

実際に無機系表面被覆工法で補修された5箇所の水路で作業性等確認のための実証試験を行った。

測点位置によっては、切込み箇所に母材の粗骨材が比較的多くなる場合があり、母材に達した後の切込みの速度が減少し、作業に時間を要することがあった。これについてはコアドリルを改良することで解決済みであり、母材へ5mm程度の切込みであれば、切込み作業に要する時間は1測点あたり概ね1—2分程度である。また、多少の熟練を要するが、切込み作業者の感覚によって母材の粗骨材への到達が判断できる。著者らの現場実証では、母材への切込み到達を確認するための一つの判断基準として利用した。なお、図-7に示した溝の写真は現場で得た写真である。

ゴム製リングを用いることで、接着剤が試験体側面に回り込み、補修材と母材の接着界面に亘ることが懸念され、これは避けるべきである。当初、コアドリル内径の寸法誤差により、接着剤の回り込みが生じることがあった。コアドリルとゴム製リングの改良により、図-8に示す通り接着剤の回り込みはごくわずかである。また、多少手間ではあるが、ゴム製リングは試験後に取り外すことも可能であり、ゴム製リングを挿入する補修材の表面から5mmの側面を観

察することもある程度可能である（図－8）。



図－8 ゴム製リングを取り外した供試体

室内試験では、供試体の条件などを制御した精緻な試験条件を設定したうえで検証できるのに対して、現場においては、そもそも試験箇所（測点）のバラツキ、例えば粗骨材の分布、補修箇所の母材コンクリートの摩耗度合い、などの影響が大きい。その影響は、現行手法、提案手法とも同様である。

（3）接着剤について留意点

提案手法では接着剤の種類までは規定しないが、検討を進める中で得られた知見を共有したい。

これまでの現場付着試験から、底版、あるいは側壁下方であるほど付着強さは小さい傾向が得られた⁸⁾。角形付着子を用いた室内試験でも、補修材や接着剤の種類によらず、水中条件（供試体表面まで浸漬させて再現）の付着強さは、気中条件の7割程度に小さくなった⁹⁾。このことから水分状態で試験値が変わることが考えられ、供用環境のまま試験できることは提案手法の長所の一つと言える。

この室内試験⁹⁾では、接着剤の種類も変えた。水中条件、あるいは湿潤面での接着の場合、現場でよく用いられている速硬型のエポキシ接着剤では接着不良と考えられる「ジグー補修材界面破断」が頻発した。一方で、同じエポキシ系接着剤でも、主剤をビスフェノール A/F 型エポキシ樹脂、硬化剤を変性脂肪族ポリアミンとする接着剤では、湿潤面でも比較的良好に接着でき、「ジグー補修材界面破断」は相対的に少な

かった。

現場では、低温、湿潤、背面からのしみ水、水没など、接着剤が想定している使用環境にない場合が少なくない。現場条件を考慮して、使用接着剤も検討しておく必要がある。

5. 付着強さ試験の評価について

前章までに試験方法について整理し、提案手法の手順と利点について述べた。本章では、提案手法に限らず、付着強さ試験の評価と解釈について改めて整理したい。

（1）付着強さと破断位置

付着強さ試験を単純引張試験とみなした場合、切込みを入れた範囲の中で、最も弱い箇所での破断し、その箇所での強さが得られる。そう考えた場合、付着強さ（試験値）は、破断した面の引張強さを示しているため、必ずしも補修工法の付着強さを意味せず、付着性を定量評価しているとはいえない。つまり、破断位置次第で試験値の解釈が異なる。破断位置に着目して試験結果の解釈を整理する。なお、破断位置の分類については図－1の通りである。

①母材内破断の場合

破断後の試験体は、母材と被覆材が接着しているため、付着強さは「試験値以上」として評価するのが適切と考える。付着界面の付着強さは得られないものの、母材との一体性が保たれていること、かつ、母材および補修材の引張強度以上の力で付着していることは確認できる。このことから、付着性について「性能の程度を調べることは困難であるが、その機能は保持されている」と判断することができる。

②母材破断でない場合

切込み作業が適切であったかが重要である。切込み深さが母材内部に達していない場合、母材破壊は生じにくい。角形付着子の場合にはカッターによる切込みの範囲（長さ）も切込み深さに関係するので注意が必要である（図－6）。

また、母材破断でない例として、無機系補

修材料のごく表層で破断することがある。この原因として、供用環境により表層が変質（脆弱化など）した可能性がある^{8),10)}。なお、同位置にて続けて試験を行えば、表層の変質領域は除去されているので、正しく試験できる場合がある。

(2) 破断面の観察

付着の状態を判断するためには、破断面の観察が重要である。試験体中で最も弱い箇所での破断する可能性が高いからである。前述の通り、湿潤環境では試験値は低く得られる傾向があるため、破断面が乾燥していたか湿潤状態であったかにも留意する必要がある。また、破断面にて藻や変質（変色）層などが確認できる場合などもある（図-9）。したがって、試験結果および付着性を適切に評価するためには破断面の観察も併せて行う必要がある。

破断面の観察・記録の際には、母材側と付着

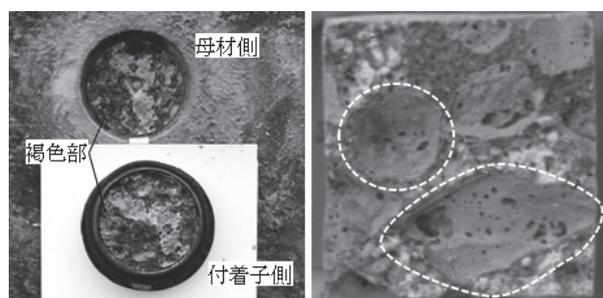
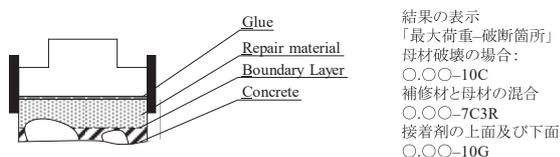


図-9 破断面の観察（左：褐色の変色，右：粗骨材近傍の不均質部）



結果の表示
「最大荷重-破断箇所」
母材破壊の場合：
○・○-10C
補修材と母材の混合
○・○-7C3R
接着剤の上面及び下面
○・○-10G

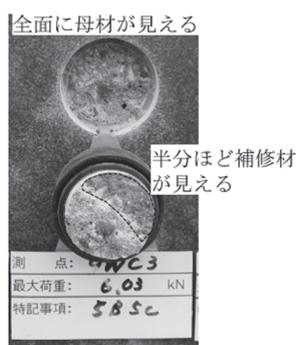


図-10 破断面の記録と破断位置の判定の例

子側の両方の破断面を記録に取ることを勧めたい。破断位置の確認のためにも有効である。筆者らでは図-10の分類と写真で記録する手法を試行している。また、母材側からは、切込み深さおよび範囲が十分であったか、などもある程度確認ができる。

(3) 付着性の評価

これまで述べたように、付着強さ試験結果を解釈するためには試験値のみではなく、破断位置や破断面の状態などを勘案し総合的に評価する必要があるといえる。以上のことは現場で付着強さ試験にかかわる者もすでに想定していると考えられ、破断面の写真を残すなど、試験値の他の情報を記録する試みもなされている。しかしながらその手法が統一されていないため、他地区の事例を参照することが困難となる場合がある。不完全であっても手法はある程度統一することが望ましいと考える。

補修補強マニュアルにおいて付着性は、補修材が水路躯体コンクリートから剥離しない性能として定義されている。これについて、管理基準としての付着強さ（定量評価）は必要であるとしつつ、定性的な評価の必要性も提案されている⁵⁾。前述の通り、破断位置や破断面の状態によって、付着強さ試験で得た試験値としての付着強さは付着性能を評価しえない場合がある。つまり、付着強さを測定する試験自体の確実性の確保と、それにより得られた試験値の評価は別個に考えなければならない。

未だ明らかではない厳密な意味での付着性の評価に対しては、付着強さ試験や打音調査などの各種試験で得られた定量的な試験値による評価だけでなく、定量評価が難しい場合には定性評価を加えることの必要性が述べられている⁵⁾。現時点で定性評価に頼らざるを得ない部分も、将来に定量的な評価手法の開発されることを期待したい。

また、母材破壊の場合に限られるが、付着試験は母材の状態を直接観察できる貴重な機会である。試験後の破断面だけでなく、試験体あるいは試験後の孔の側面を観察することも有意義

である。中性化深さの測定も可能であるし、被覆材の残存厚さも確認できる。施工厚さにはバラツキがあるため、必ずしも確かなものではないが、参考としては十分であると考えている。

7. おわりに

著者らが提案する付着試験方法は、現在現場で実際に行われている試験方法の課題を解決し、現行手法とほぼ同原理で試験を行うものである。切込み深さや試験断面などの試験条件を統一しやすいことが特徴である。また、付着試験で得られた結果については、試験値のみではなく、破断位置、破断面の状態を含めて総合的に判断する必要がある。

表面被覆工法を適用された農業水利施設では、付着強さ試験は現場モニタリングにおける数少ない破壊を伴う試験であり、母材を目視で確認できる貴重な機会でもある。

単軸引張中の荷重変位関係を取得し、これを考慮して付着性を評価する試みも検討されている¹¹⁾。付着強さ試験を単軸引張による強度試験としてとらえる場合、円柱供試体の直接引張試験を模擬したとみなせる本提案手法の方が望ましいと考える。まだ検証すべき事項は多いが、コア採取を必要としない、現地で実施できる破壊試験であるため、補修後水路の状態評価の高度化が期待できる。

なお、大まかな試験手順等は、農研機構のYouTubeチャンネル「NAROchannel」でも紹介している¹²⁾。より具体的な試験手順や使用器具についてはWebにて公開しているため参照されたい¹³⁾。

参考文献

- 1) 加藤諭, 八木沢康衛, 川邊翔平, 緒方英彦 (2020) 「円形治具を用いた無機系補修材の付着強度試験方法の開発に関する基礎的研究」, 農業農村工学論文集, 88 (2), I_193-I_201
- 2) 浅野勇 (2016) 「無機系被覆材の付着強度

- 試験に関する一考察」, 水と土, 178,56-64
- 3) 農林水産省農村振興局整備部設計課施工企画調整室 (2015) 「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)」
- 4) 農林水産省農村振興局整備部設計課(2015) 「農業水利施設の長寿命化のための手引き」
- 5) 緒方英彦 (2019) 「開水路底版における無機系被覆工法の付着性の評価・管理基準に関する提案」, 2019年度(第68回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 454-455
- 6) JSCE-K 561 (2013) 「コンクリート構造物用断面修復材の試験方法(案)」
- 7) JSCE-K 531 (2013) 「表面被覆材の付着強さ試験方法(案)」
- 8) 川邊翔平, 浅野勇, 金森拓也, 高橋良次 (2020) 「コンクリート開水路における無機系表面被覆工法の現場モニタリングの重要性」, 農業農村工学会誌, 88 (6), 471-474
- 9) 高橋良次, 川邊翔平, 金森拓也, 浅野勇 (2020) 「無機系被覆工の乾湿条件が付着強度に与える影響」, 2020年度(第69回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 543-544
- 10) 緒方英彦, 清水邦宏, 金子英敏, 八木沢康衛, 石神暁郎, 西田真弓 (2018) 「経年した無機系補修材料の付着強さ試験における表面処理の影響」, 2018年度(第67回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 542-543
- 11) 加藤諭, 八木沢康衛, 川邊翔平, 緒方英彦 (2020) 「無機系補修材の付着性評価における荷重-変位曲線の有用性」, 2020年度(第69回)農業農村工学会大会講演会講演要旨集, 347-348
- 12) 「農業水利施設の保全管理 インフラメンテナンスってどんなもの?」, YouTube (<https://www.youtube.com/watch?v=yuzL6O7p8EA&t=79s>), 2021.03.05 確認
- 13) 円形付着試験特設サイト (https://sanko-techno.co.jp/products/round_tool/), 2021.05.17 確認