

論文 コンクリートに貼付されたシート系材料の水圧作用に対する耐水圧性評価の試験方法の提案

柿澤 雅樹*1・西尾 亮人*2・藤本 匠*3・六郷 恵哲*4

要旨: 剥落防止対策として用いられるシート系材料について、欠損箇所やひび割れから水圧が作用した場合の耐水圧性を評価する試験方法を提案した。U型ふたを使用し、欠損やひび割れを模擬した開口の直径や長さなどを変化させ、耐水圧性をこの試験方法で評価した。その結果、円形状および直線状の開口とも、直径や長さが大きくなると剥離時の最大水圧が低下する傾向が分かった。全荷重と周長は線形による比例関係があることが分かった。単位周長当たりの荷重とした場合、開口の形状や周長に関わらず一定の範囲となり、シート系材料の耐水圧性を評価できる可能性があることが確認でき、この試験方法の有効性を確認できた。

キーワード: 剥落防止, 光硬化型 FRP シート, 耐水圧性

1. はじめに

コンクリート構造物の剥落防止対策として、アラミド繊維シートや炭素繊維シート、光硬化型 FRP シートなどのシート系材料により被覆されることがある^{1),2)}。対象構造物は、橋梁やトンネルなど様々あり、山岳トンネルや地下鉄トンネルなどの地中構造物や、タンクや水門などの水中構造物など水圧が作用する箇所への適用もある。シート系材料の適用に対し、構造物を維持管理する機関により、付着性能が規定されている。しかし、剥落対策の場合、コンクリートの剥落塊の重量を支える目的の付着性能が要求されており^{3),4),5),6)}、ひび割れや劣化部からの湧水の水圧作用に対する耐力評価については、特に規定を設けていない。これは、水圧作用に対する試験方法が確立されておらず、評価指標がないためである。

本研究では、剥落防止対策の既存工法のうち、透明でコンクリート表面が観察できる光硬化型 FRP シートを用い、コンクリートに貼付されたシートに水圧が作用した場合の、水圧に対する耐力評価の試験方法を提案するとともに、水圧が作用する劣化部の形状の相違が、FRP シートの耐水圧性に及ぼす影響について評価することを目的とする。

2. 耐水圧評価の必要性和既存の試験方法

2.1 耐水圧試験による評価の必要性

シート系材料による剥落防止の主な適用対象には、橋梁の柱・梁や床板、道路や鉄道、共同溝などのトンネル、タンクや水門など様々なコンクリートがある。維持管理として剥落防止対策を行う際、構造物は何らか劣化した状態にあることが多く、ひび割れや部分的な剥落がある

構造物に貼付することが一般的である。トンネルやタンク、水門などはひび割れから漏水を伴うことが多く、剥落防止のシート施工時には漏水処理されるが、再劣化に伴う漏水や、地震によってひび割れの開口に伴う水圧作用などが考えられる。シートに直接水圧が作用する場合、水圧の大きさは背面の地下水位やタンクの水深に依存する。剥落防止対策では、剥落対象となるコンクリート塊の重量により性能が決定されており、水圧による影響は考慮されていない。剥落防止のシートに対して、耐水圧性を評価する試験方法が確立されておらず、また耐水圧に対する評価指標に関する研究もほとんど無い。水圧が作用する恐れのあるコンクリート構造物では、剥落対策のシート性能として、ひび割れや劣化部からの水圧に対する耐水圧性を評価することは、構造物の長期的な耐力を確保する上で必要であると考ええる。

2.2 既存の付着性能試験と水圧作用時の荷重条件

剥落防止用のシート系材料に要求される性能の抜粋を表-1に示す^{7),8)}。剥離に関する性能は、「表面被覆材の付着強さ試験方法：JSCE-K531-2010」(以下、付着試験)、および、「コンクリート片のはく落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法(案)：JSCE 533-2010」(以下、押抜き試験)により評価され、耐水圧に関する性能につ

表-1 剥落防止の要求性能(抜粋)

要求性能	基準値	機関
付着試験 JSCE-K531-2010	1.5 N/mm ² 以上	NEXCO
	1.0 N/mm ² 以上	首都高速道路 JR 東海
押抜き試験 JSCE-K533-2010	1.5 kN 以上	NEXCO 首都高速道路 JR 東海

*1 岐阜大学 大学院工学研究科 生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)

*2 岐阜大学 大学院工学研究科 社会基盤工学科

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科

*4 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博(正会員)

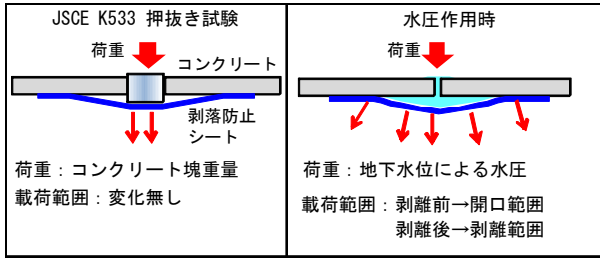


図-1 押抜き試験と水圧作用時の荷重作用概念図

いては特に規定されていない。コンクリートに貼付したシート系材料の内側から水圧が作用した場合、シートに発生する荷重や耐力は、付着試験や押抜き試験で評価できないと考えられる。押抜き試験と水圧作用時の荷重作用概念図を図-1に示す。

押抜き試験はコンクリートを押し抜いた荷重と変位量を評価するものであり、剥落時のコンクリート塊を支える耐力と伸び性能を確認する試験である。水圧が作用する場合は、地下水位に依存した水圧がひび割れの様な開口部から直接シートに剥離させる荷重が作用することや、シートとコンクリートの界面に剥離が生じた場合、その隙間にも水圧のある水が侵入し、剥離を助長させるなど、荷重の作用条件に相違がある。水圧作用における耐力は、既存の試験方法では十分な評価ができないため、新たな試験方法の提案を行った。

3. シート材料の耐水圧試験の提案

3.1 耐水圧試験方法に使用するシート及びコンクリート

今回提案する耐水圧試験に適用する剥落防止シートは、光硬化型FRPシート⁹⁾(以下、FRPシート)を使用する。ガラス繊維(チョップドストランドマット)に光硬化性のあるエポキシアクリレート樹脂を含浸させたFRPシートであり、プライマー、貼付補助剤(光硬化型パテ)を用いてコンクリートに貼付する工法である。紫外線を照射して20分程度で硬化するため、供用中のトンネルなど、補修後すぐに供用を求められる構造物に適用されることが多く、また透明であるため、貼付後もコンクリート表面が観察できる。FRPシートの基本物性を表-2に示す。

耐水圧試験に使用するコンクリートは、押抜き試験に用いるコンクリートと同様とし、JIS A 5372 付属書Eに規定する上ぶた式U型側溝(ふた)の1種呼び名300(寸法600×400×60、以下U型ふた)を用いた。これは、工場製品で入手が容易であり、取り扱いが便利なこと、試験結果を押抜き試験と比較評価できるためである。

FRPシート、U型ふたを用いて既往の付着試験および押抜き試験を行った結果を表-3に示す。試験結果より、一般的に要求される付着性能を満足している材料であることが確認された。

表-2 光硬化型FRPシートの一般的物性

繊維量	450g/m ²
厚さ	1.2mm
引張強度	80N/mm ² 以上
引張弾性係数	6.0×10 ³ N/mm ² 以上

表-3 適用した材料の既往試験結果

試験	基準値	試験結果	判定
付着試験	1.5N/mm ² 以上	2.80N/mm ²	合格
押抜き試験	荷重1.5kN以上	1.96kN	合格
	(変位10mm以上)	(12.5mm)	

表-4 試験の種類

番号	ケース名	形状	開口寸法
No. 1	a-φ2	円形	直径φ2mm
No. 2	a-φ5	円形	直径φ5mm
No. 3	a-φ10	円形	直径φ10mm
No. 4	a-φ45	円形	直径φ45mm
No. 5	a-φ108	円形	直径φ108mm
No. 6	b-5-25	直線	短辺5mm 長辺25mm
No. 7	b-5-100	直線	短辺5mm 長辺100mm
No. 8	b-5-150	直線	短辺5mm 長辺150mm
No. 9	b-10-150	直線	短辺10mm 長辺150mm
No. 10	b-25-150	直線	短辺25mm 長辺150mm

3.2 供試体の作製

U型ふたは、押抜き試験と同様に、おもて面にFRPシートを貼付し、裏面から水圧を作用させる。U型ふたのおもて面(FRPシート貼付面)に、水圧を作用させるための欠陥やひび割れを模擬した開口を加工する。今回の試験で実施した開口の形状・寸法を表-4に示す。No.1からNo.5は、開口形状が円形で欠陥を模擬しており、寸法は円形の直径を示す。No.6~No.10は、開口が直線状でひび割れを模擬しており、寸法は短辺がひび割れ幅、長辺がひび割れ長さに相当する。

U型ふたの加工概念図を図-2に示す。No.1~No.5の円形の開口は、コンクリートドリルやコンクリートコアドリルを用いて加工した。直径10mm以下は、コンクリートドリルにてコンクリート表面より約40mm削孔した。直径10mm超は、コンクリートコアドリルにより約40mm削孔し、コアドリルの中心部分をノミで削り取った。No.6~No.10のひび割れを模擬した直線状の開口は、ディスクグラインダーを用いて、所定の長さを深さ20mm程度で直線状の開口を加工した。

次に、No.1~No.10の全供試体において、裏面からφ8mmのコンクリートドリルを用い、約40mm削孔し、水圧を作用させる水の注入口を加工した。この裏面からの削孔により、U型ふたおもて面に加工した模擬欠損および模擬ひび割れと裏面の注入口は貫通した開口となる。

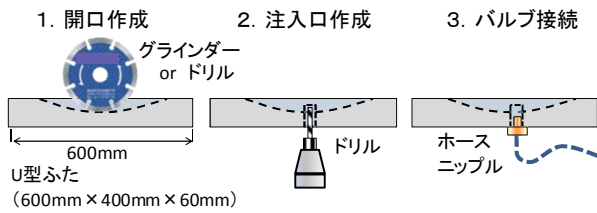


図-2 U型ふた加工概要図

裏面に設けた注入口に、配管用に用いられるホースニップル（φ8mm×PT1/4）を挿入し、試験中に水圧で外れたり水が漏れないように、2液型のエポキシ樹脂系接着剤を充填してコンクリートと接着した。

FRPシートの寸法は、押抜き試験よりも広範囲となることから、580mm×380mmのFRPシートを貼付する。U型ふた表面にプライマーを塗布し、養生期間として1日静置した。続いて貼付補助材を塗布した後、FRPシートをU型ふたおもて面に気泡を除去しながら貼付した。貼付補助材は、FRPシートに使用しているエポキシアクリレート樹脂と同種材料のパテであり、貼付するコンクリート面の気泡や凹凸を埋める効果がある。貼付補助材自身も光硬化性を有しており、FRPシートに紫外線を照射した際に、シートと同時に硬化する。

水圧を作用させるポンプは、手動式テストポンプ（最大圧力 5MPa）を用いた。U型ふたのシート貼付面を上面として置き、下面のホースニップルと手動式テストポンプを耐圧ホースにて接続することで、ポンプのジャッキ操作により、耐圧ホースを介してU型ふたの模擬欠損および模擬ひび割れ内を加圧することができる。試験装置のセット状況を写真-2に示す。

耐圧ホース先端には、エア抜き用のT字バルブを設置し、さらに模擬欠損および模擬ひび割れの内部を、試験前に予めスポイトにて水を充填し、加圧時に供試体内部に混入するエアの低減を図った。テストポンプには目盛り式の圧力計が付属しているが、これとは別にデジタル式圧力計を設置し、データロガーにて圧力を1秒間隔で記録した。変位測定は、水圧によるFRPシートの剥離位置が特定できないため、今回の試験では省略し、圧力のみを計測とした。水圧の加圧速度は、1分間に1～2MPa程度となるように全試験で統一して実施した。

試験には水道水を用いるが、透明なシートとコンクリートの隙間に透明な水道水が流入しても、目視では水の有無が判別困難であるため、地下水調査や水道などの漏水調査などに用いられる生分解性蛍光トレーサー染料にて黄緑色に着色した。

4. 実験結果と考察

前出の表-4に示す模擬欠損・模擬ひび割れの形状・寸法について、提案する耐水圧試験を行い、試験方法の

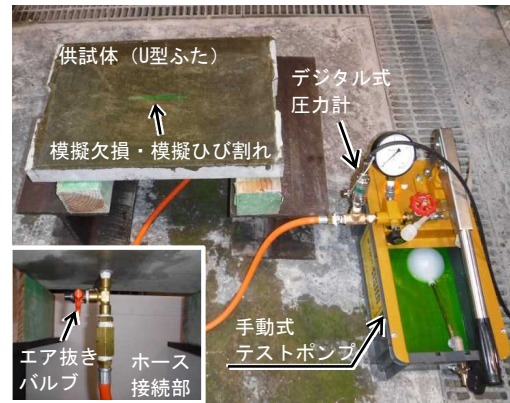


写真-2 試験全体写真

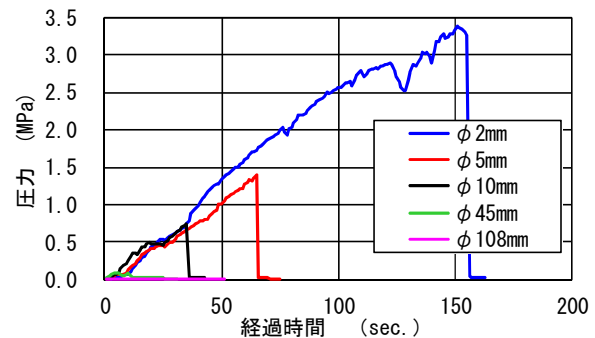


図-3 経過時間による圧力変化

適用性確認と、FRPシートの耐水圧性について検証を行った。

4.1 欠損部を模擬した水圧試験結果

水圧を作用させる開口形状を欠損を模擬した円形とし、直径をパラメータとした試験を実施した。各試験の経過時間による圧力計測結果を図-3に、欠損部の直径φ10mmとした時の試験後の状況を写真-3に示す。

図-3において、各試験とも加圧とともに水圧が上昇し、圧力が最大値を示した後、急激に圧力が低下していることが分かる。これは、写真-3に示す様に、水圧上昇時はFRPシートはコンクリートに接着されているが、欠損部からの水圧が付着力以上となった瞬間に、FRPシートとコンクリートに隙間が生じ、その隙間が水圧によりさらに拡大し、水圧が解放されたため圧力が低下した。剥離した形状は、水圧を作用させた開口部が中心となっておらず、偏心した剥離形状を示した。FRPシートが最初に剥離する際、開口の円周上の全てが同時に剥離するとは考えにくく、円周上で最も接着力が弱い箇所から剥離は開始すると考えられる。この最初に剥離した隙間に加圧された水が勢いよく流入するため、水の流れに方向性が生じ、開口位置から偏心する様な剥離となったと考えられる。なお、加圧中に圧力上昇が波打っているが、これはポンプが手動式であることと、圧力が2MPaを超えた際にホース接続部から漏水したことによるものであり、FRPシートの耐水圧性とは関係ない。



写真-3 試験後のFRPシート表面（欠損φ10mm）

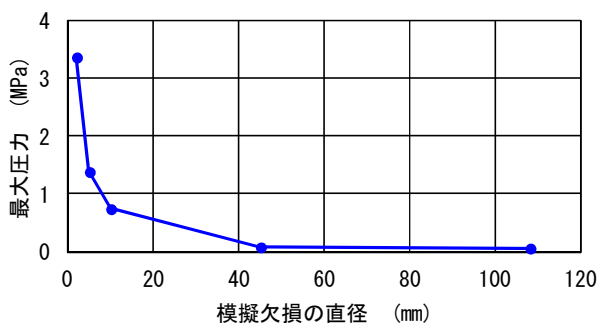


図-4 模擬欠損の直径と最大圧力の関係

剥離して水圧が低下した状態で再び水圧を加えても、圧力は殆ど上昇せずに、剥離範囲が広がり、最終的に剥離がFRPシート端部に達する結果となった。本試験方法では手動式テストポンプを使用したため、シート剥離時に水圧が低下したが、実構造物に水圧が作用した際、シートの剥離後も水圧が低下せず継続する、もしくは低下してもごくわずかであることから、試験の評価として、初期の剥離に対する耐力を水圧に対する耐水圧性として評価することとした。なお、今回はFRPシートにて実施したが、別のシート系材料や工法によっては、剥離後の耐力が初期の剥離時の耐力を上回ることも考えられる。この時は再加圧により耐水圧性を評価することが妥当と考える。

図-4に、模擬欠損の直径毎の最大圧力との関係を示す。模擬欠損の直径が大きくなるとともに、最大圧力が大きく低下する結果となった。模擬欠損の周長と全荷重の関係を図-5に示す。全荷重とは、模擬欠損に作用する圧力に、模擬欠損の面積を掛けることで、欠損部分に作用する荷重として表現したものである。

図-5から分かるように、全荷重は周長と比例関係にあり、ゼロを原点とする直線で近似されると考えられる。図-4では直径φ2mmの最大圧力は、直径φ108mmより高い圧力までFRPシートが耐えていたが、全荷重表示とした場合、直径108mmの方が高い荷重まで耐えていたことが分かる。

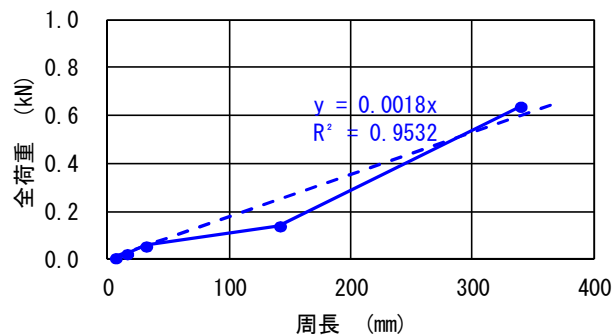


図-5 周長と全荷重の関係

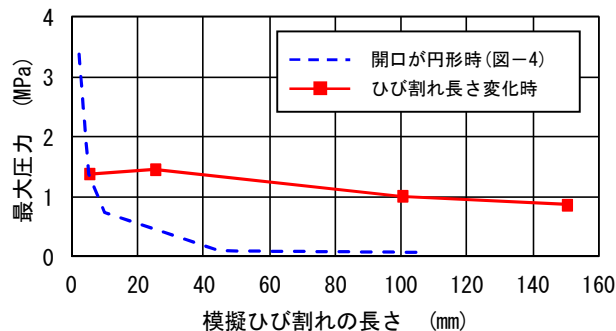


図-6 模擬ひび割れ長さと最大圧力の関係

4.2 ひび割れを模擬した水圧試験結果

FRPシートに水圧を作用させる開口形状を、ひび割れを模擬した直線状とした試験において、模擬ひび割れの幅を5mmに一定とし、長さを変化させた試験と、模擬ひび割れの長さを150mmに一定とし、幅を変化させた2タイプの試験を実施した。

4.2.1 ひび割れ長さを変化させた耐水圧試験結果

模擬ひび割れ幅を5mmで一定とし、長さを変化させた試験において、模擬ひび割れ長さと最大圧力の関係を図-6に示す。また、模擬ひび割れ長さ150mmの試験後の状況を写真-4に示す。

図-6の模擬ひび割れ長さ5mmの試験結果は、φ5mmの円形形状の結果を指し、青点線は前出の開口形状が円形とした時の結果である。模擬ひび割れ幅が一定の場合、模擬ひび割れ長さが長くなると最大圧力は僅かに低下する結果となった。この最大圧力の低下勾配は、水圧作用を円形とした場合と比較し、緩やかであることが分かる。

写真-4では、剥離箇所は模擬ひび割れの全体でなく、一部で発生していることが分かる。円形の模擬欠損時の試験結果と同様に、模擬ひび割れに水圧が作用した際、模擬ひび割れの周長部分の付着力が最も弱い箇所である隙間が生じ、そこへ加圧された水が回り込むことで、円形状にFRPシートがコンクリートから剥離している。剥離範囲の中心は、最初に剥離したと考えられる模擬ひび割れ端部に対して偏心した位置となった。この偏心した剥離は、模擬ひび割れ長さが25mm、100mmの時も発生し

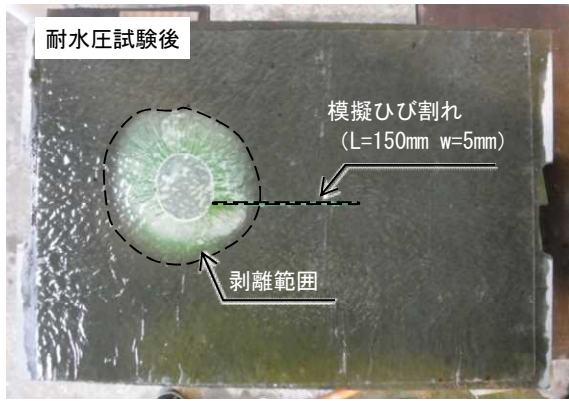


写真-4 試験後のFRPシート表面 (長さ150mm)

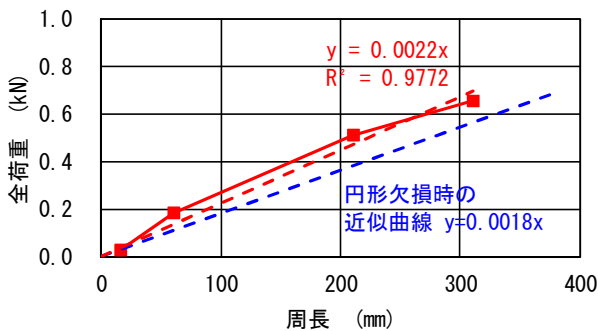


図-7 ひび割れ長さ変化時の周長と全荷重の関係

た現象であった。

図-7に、模擬ひび割れの周長と全荷重の関係を示す。ここで、実構造物の様にひび割れ長さが幅に対して十分に長い場合、周長でなくひび割れ長さ×2として考える方が普通であるが、本試験ではひび割れ長さが25mmなど短く、隅角部の長さを無視できないと考え、ひび割れ長さと隅角部長さを考慮した周長をパラメータとした。隅角部を考慮することは、実構造物での耐水圧性を安全側に評価できると考える。また、円形時の周長と厳密には異なるが、水圧に抵抗する付着箇所長さという意味から周長として比較することとした。開口形状が円形時(図-5)と同様に、周長と荷重は比例関係にあり、ゼロを原点とする直線で近似できるが、この近似線は図-5の近似線と良く類似している。

4.2.2 ひび割れ幅を変化させた耐水圧試験結果

模擬ひび割れ長さを150mmに一定とし、幅を変化させた試験において、模擬ひび割れ幅と最大圧力の関係を図-8に示す。また、模擬ひび割れ幅25mmの試験後の状況を写真-5に示す。図-8の図中の青点線は、水圧作用を円形とした欠損部を模擬した試験結果(図-4)であり、ひび割れ幅を変化させた時の試験結果はこれと類似した傾向となった。写真-5では、剥離範囲が加圧した模擬ひび割れ位置に対して偏心して発生したことが分かる。

図-9に、模擬ひび割れの周長と荷重の関係を示す。模擬ひび割れ長さを一定として、幅のみを変化させた場

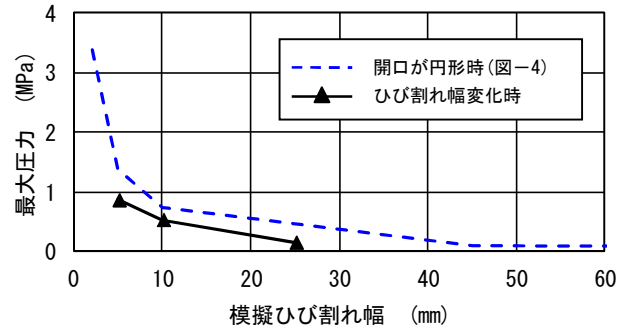


図-8 模擬ひび割れ幅と最大圧力の関係

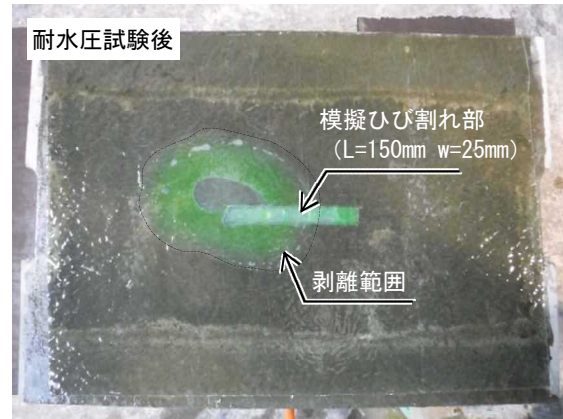


写真-5 試験後のFRPシート表面 (幅25mm)

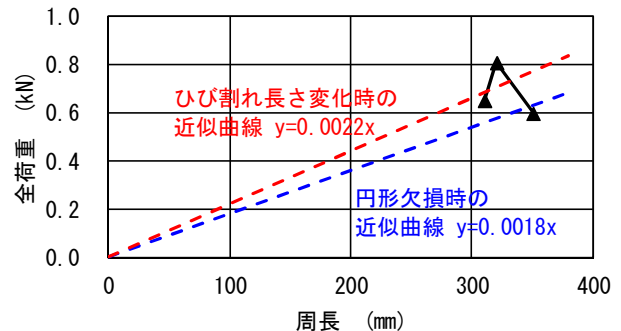


図-9 ひび割れ幅変化時の周長と全荷重の関係

合、周長自体は310mm~350mmと狭い範囲であるものの、剥離時の全荷重は0.6~0.8程度となった。これは、開口形状が円形時の近似線(図-9中の青点線)および開口形状が線状で模擬ひび割れ長さを変化させた場合の近似線(図-9中の赤点線)の近傍であった。

4.3 耐水圧試験結果の考察

水圧を作用させる形状を、円形とした場合とひび割れの様な線状とした場合の試験を行ったが、いずれの試験においても、周長と全荷重(水圧×水圧作用面積)には線形の比例関係がある結果となった。しかし、実構造物を評価する場合、耐水圧性を高めるために周長を大きくするような考え方は、ひび割れ長さを長くすることとなり、評価として実用的ではない。そこで、全荷重を周長で割り戻した単位周長当たりの荷重として表現した場合、今回実施した全ての試験結果における周長と単位周長当

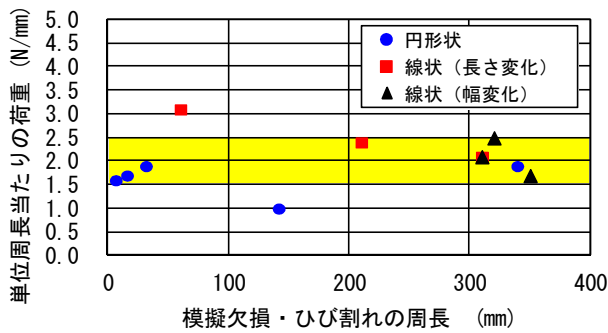


図-10 周長と単位周長当たりの荷重の関係

たりの荷重との関係を図-10に示す。

単位周長当たりの荷重として表現した場合、水圧が作用する形状が円形状・線状に関わらず、また周長の長短に関わらず、概ね1.0N/mm～3.0N/mm程度の範囲となり、特に1.5N/mm～2.5N/mmに集中する結果となった。よって、ひび割れや欠損などに水圧が作用した場合、シート系材料の耐水性については、単位周長当たり荷重により評価できる可能性があることが分かった。

例えば、水深100mでひび割れ幅1.0mmとした場合、水圧による単位周長当たりの荷重は0.5N/mmであり、今回使用したFRPシートは耐水圧の性能を有すると言えるが、ひび割れ幅4.0mmとなった場合、単位周長当たりの荷重は2.0N/mmであり、耐水圧性能が危険な状態であると言った評価ができると考えられる。

今回は模擬ひび割れ幅が最小でも5mmと一般的なひび割れ幅に対して大きい値で試験を実施した。これは、汎用のディスクグラインダーを用いた幅が5mmであったこと、より狭い幅の模擬ひび割れはシート貼付の際、プライマー、貼付補助剤でひび割れを閉塞してしまうことから、5mmを採用した。実際のひび割れは、もっと狭く、形状も直線ではなく複雑に波打っているため、試験より周長の影響が大きく、試験結果の耐水圧より高い水圧に耐えることができると考える。今回は、汎用資機材の使用を考慮しつつ、耐水圧試験方法の提案を行ったため、実際のシート系材料への適用や、現実のひび割れへの適用については、今後研究を進展させていく必要があると考える。

5. まとめ

剥落防止対策として用いられるシート系材料について、欠損箇所やひび割れから水圧が作用した場合の耐水圧性について評価するための試験方法を提案した。U型ふたを使用し、表面に欠損やひび割れを模擬した開口を設け、

シート系材料を貼付し、裏面から手動式テストポンプにて水圧を作用させた。開口の形状・寸法を円形や線状として、直径や長さなどを変化させ、耐水圧性をこの試験方法で評価した。その結果、下記の知見が得られ、この試験方法の有効性を確認できた。

- (1) コンクリートの欠損を模擬し円形状の開口とした時、直径と反比例して剥離時の最大水圧が低下するが、全荷重と周長は比例関係があることが分かった。
- (2) コンクリートのひび割れを模擬し線状の開口とした時、剥離時の最大水圧はひび割れ長さが長くなると、わずかに低下することが分かった。また全荷重と周長は比例関係があることが分かった。
- (3) 全荷重を周長で割り戻した単位周長当たりの荷重とした場合、開口の形状や周長に関わらず一定の範囲(今回の試験では1.5～2.5N/mm程度)となることが分かった。この単位周長当たりの荷重により、シート系材料の耐水圧性を評価できる可能性があることが確認できた。

参考文献

- 1) 社団法人土木学会：101 コンクリートライブラリー 連続繊維シートを用いたコンクリート構造物の補修補強指針，2000.7
- 2) 社団法人土木学会：119 コンクリートライブラリー 表面保護工法設計施工指針(案)，pp.20-37，2005.4
- 3) トンネル安全対策工法研究会：FRPによるトンネル覆工剥落対策マニュアル，海山堂，2003.5
- 4) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：設計要領第三集 トンネル編，高速道路総合技術研究所，2012.7
- 5) 東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社：構造物施工管理要領，高速道路総合技術研究所，2014.7
- 6) 日本道路公団：覆工コンクリートはく落対策工〔繊維シート接着工〕設計・施工指針(案)，日本道路公団，pp.15-49，2003.11
- 7) 土木学会；表面被覆材の付着強さ試験方法，JSCE-K531-2010
- 8) 土木学会；コンクリート片のはく落防止に適用する表面被覆材の押抜き試験方法(案)，JSCE 533-2010
- 9) 株式会社竹中土木：パーマコート工法技術資料 Ver 3.0，pp.3-9，2013.4