

# コンクリート構造物の補修用樹脂材料の性能評価

Performance evaluation of polymeric materials  
for repairing concrete structures

平成 28 年 8 月

岐阜大学  
工学研究科博士後期課程  
生産開発システム工学専攻

柿澤 雅樹



# コンクリート構造物の補修用樹脂材料の性能評価

Performance evaluation of polymeric materials  
for repairing concrete structures

平成 28 年 8 月

岐阜大学  
工学研究科博士後期課程  
生産開発システム工学専攻

柿澤 雅樹





# 目 次

## 第 1 章 序論

1.1	研究の背景	1
1.2	コンクリート構造物のひび割れ発生の原因	2
1.3	補修工法における樹脂材料	6
1.3.1	光硬化型 FRP シートの性能評価について	7
1.3.2	ひび割れ注入における樹脂の性能評価について	11
1.4	研究の目的	13
1.4.1	光硬化型 FRP シートにおける閉口ひび割れ追従性試験の提案	13
1.4.2	光硬化型 FRP シートにおける異方性を考慮した耐震補強への適用について	13
1.4.3	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	13
1.4.4	エポキシ樹脂注入におけるひび割れに充填された樹脂の 付着性能評価試験の提案	14
1.4.5	模擬膨張骨材およびエポキシ樹脂を用いた ASR ひび割れ再現方法の提案	14
1.5	論文の構成	15

## 第 2 章 コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案

2.1	はじめに	18
2.2	光硬化型 FRP シートによる剥落防止の基本性能	18
2.2.1	光硬化型 FRP シートの性質	18
2.2.2	シート材料のひび割れ追従性能	18
2.2.3	閉口縮方向のひび割れ追従性能の評価の必要性	19
2.3	閉口ひび割れ追従性試験の提案	20
2.3.1	閉口ひび割れ追従性試験の方法	20
2.3.2	供試体の作製	21
2.3.3	載荷装置および荷重計測	22
2.3.4	変位計測	23
(1)	閉口ひび割れの変位計測	23
(2)	FRP シートのバックリングの計測	23
2.4	実験結果と考察	24
2.4.1	試験条件	24
2.4.2	代表的な条件でのバックリング現象	24
2.4.3	ひび割れ幅が異なる場合のバックリング現象	27
2.4.4	FRP シート厚さが異なる場合のバックリング現象	28

2.4.5	FRP シートの付着状況が異なる場合のバックリング現象	30
2.4.6	ひび割れ充填された場合のひび割れ追従性試験	32
2.4.7	全供試体の試験結果	33
2.4.8	実現象との対応	35
2.4	まとめ	35

### 第3章 光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究

3.1	はじめに	37
3.2	光硬化型 FRP シートによる梁のせん断試験	37
3.2.1	光硬化型 FRP シートの性質	37
3.2.2	光硬化型 FRP シートのせん断補強効果について	38
3.3	光硬化型 FRP シートを用いた RC 梁モデルの室内試験	40
3.3.1	RC 梁モデルの試験概要	40
3.3.2	等方性を有した貼付によるせん断耐力	43
3.3.3	異方性を有した貼付（100%貼付）によるせん断耐力	46
3.3.4	異方性を有した貼付（50%貼付）によるせん断耐力	49
3.3.5	ひび割れ発生位置の比較	52
3.4	まとめ	54

### 第4章 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

4.1	はじめに	56
4.2	既存の付着性能試験と水圧作用時の荷重作用	56
4.3	シート材料の耐水圧試験の提案	57
4.3.1	耐水圧試験方法に使用するシート及びコンクリート	57
4.3.2	供試体の作製	59
4.4	実験結果と考察	62
4.4.1	欠損部を模擬した水圧試験結果	62
4.4.2	ひび割れを模擬した水圧試験結果	66
	(1) ひび割れ長さを変化させた耐水圧試験結果	66
	(2) ひび割れ幅を変化させた耐水圧試験結果	68
4.4.3	耐水圧試験結果の考察	71
4.5	まとめ	72

### 第5章 コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価

5.1	はじめに	74
5.2	実験概要	75
5.2.1	実験全体の流れ	75

5.2.2	コンクリートブロック供試体の作製	76
(1)	RC ブロックの作製	76
(2)	無筋ブロックの作製	78
5.2.3	ひび割れへの樹脂注入	79
5.2.4	コア供試体の採取とダンベル型供試体への加工	80
5.2.5	樹脂の充填状況	82
5.3	試験結果と考察	82
5.3.1	引張試験	82
(1)	引張試験概要	82
(2)	引張試験結果	83
5.3.2	曲げ試験	85
(1)	曲げ試験概要	85
(2)	曲げ試験結果	86
5.3.3	引張試験と曲げ試験による樹脂付着性能の評価	87
5.4	まとめ	88

## 第 6 章 模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と 樹脂注入性評価への利用

6.1	はじめに	90
6.2	模擬膨張骨材	90
6.2.1	模擬膨張骨材の概要	90
6.2.2	模擬膨張骨材の作製	91
6.2.3	円柱供試体による模擬膨張骨材の膨張確認	93
6.3	版状供試体によるひび割れ確認	97
6.3.1	試験概要	97
6.3.2	版状供試体の作成	98
6.3.3	樹脂注入および切断	100
6.3.4	画像処理による注入評価	102
(1)	静的破砕剤を使用した供試体（試験 No.1）	102
(2)	模擬膨張骨材を用いた供試体（試験 No.2）	104
(3)	実 ASR 反応性骨材を用いた供試体（試験 No.3）	106
6.4	版供試体の充填状況の比較	108
6.5	まとめ	109

## 第 7 章 結 論

7.1	各章の結論	111
7.1.1	コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートに おけるバックリング現象の評価試験方法の提案	111
7.1.2	光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁の せん断耐力の実験的研究	111
7.1.3	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	112

7.1.4	コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに 充填された樹脂の付着性能の評価	112
7.1.5	模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と 樹脂注入性評価への利用	113
7.2	樹脂材料の総評	113
7.2.1	光硬化型 FRP シートに関する総評	113
7.2.2	樹脂注入に関する総評	114
7.3	今後の課題	114
7.3.1	光硬化型 FRP シートに関する今後の課題	114
7.3.2	樹脂注入に関する今後の課題	115
発表論文		117
謝辞		119

## 第1章 序 論

### 1.1 研究の背景

近年、昭和 30～40 年代の高度経済成長期に構築されたインフラ設備が、今後建設後 50 年以上を経過する、いわゆる老朽化が加速することが問題となっている<sup>1),2),3)</sup>。特に東京オリンピック開催に向けて構築された首都高速道路、東海道新幹線などのインフラ設備や建築物は既に 50 年を経過し、今後東名高速道路や中央自動車道なども数年以内に 50 年を経過する。表－1.1 に道路、河川等の分野毎における建設後 50 年を経過する施設の割合を示す。道路橋は全国に約 70 万橋あり、10 年以内（2013 年集計時より、以下同様）に 40%が 50 年を経過、道路トンネルでも約 1 万本のうち、10 年以内に 32%が 50 年を経過する。鉄道に関しては、鉄道橋約 10 万橋、鉄道トンネル約 4700 本のうち、既に 50 年経過した施設は 50%を超過し、10 年以内には 70%を超過する。

表－1.1 各分野の建設後 50 年を経過する施設の割合性と施設数

分野	施設	建設後50年以上経過する施設の割合 <sup>*1</sup>			管理者 <sup>*2</sup>	施設数
		2013年3月現在	10年後	20年後		
道路	橋梁（橋長2m以上）	16%	40%	65%	国	27,222橋
					高速道路会社	16,438橋
					都道府県	129,916橋
	トンネル	18%	32%	48%	政令市	47,593橋
					市区町村	478,068橋
					国	1,299本
河川・ダム	河川管理施設 <sup>*3</sup>	6%	20%	47%	高速道路会社	1,583本
					都道府県	4,790本
					政令市	335本
	砂防堰堤、床固工 <sup>*5</sup>	3%	5%	21%	市区町村	2,369本
					国 <sup>*4</sup>	10,508施設
					都道府県・政令市	19,223施設
海岸	海岸堤防等 <sup>*6</sup>	10%	31%	53%	都道府県	95,675基
					都道府県・市町村	7,989km
					都道府県	6,997km
	管渠	2%	8%	22%	政令市	98,875km
					市町村等	322,006km
					都道府県	185箇所
下水道	処理場	— <sup>*7</sup>	— <sup>*7</sup>	— <sup>*7</sup>	政令市	150箇所
					市町村等	1,829箇所
					国	4,025施設
	港湾施設 <sup>*8</sup>	11%	27%	51%	都道府県 <sup>*9</sup>	31,883施設
					政令市	2,126施設
					市町村等 <sup>*10</sup>	5,586施設
空港	空港	19%	48%	63%	国	28空港
					地方公共団体	65空港
					民間企業	4空港
	橋梁	51%	70%	83%	鉄道事業者等	102,293橋
					鉄道事業者等	4,737本
					民間企業	67橋
鉄道	トンネル	60%	81%	91%	地方道路公社	25橋
					民間企業	8本
					地方道路公社	1本
	橋	34%	87%	87%	国	5,380基
					都道府県	17施設
					政令市	516施設
自動車道	トンネル	67%	100%	100%	政令市	23,634施設
					市区町村	76,944施設
					都道府県	931,689戸
	航路標識 <sup>*11</sup>	12%	25%	38%	政令市	390,602戸
					市区町村	848,358戸
					国	48,466千 m <sup>2</sup>
航路標識	都市公園等	4%	11%	38%	都道府県	516施設
					政令市	23,634施設
					市区町村	76,944施設
	公営住宅	3%	30%	60%	都道府県	931,689戸
					政令市	390,602戸
					市区町村	848,358戸
公園	官庁施設 <sup>*12</sup>	8%	22%	36%	国	48,466千 m <sup>2</sup>
					都道府県	516施設
					政令市	23,634施設
	官庁施設	8%	22%	36%	市区町村	76,944施設
					都道府県	931,689戸
					政令市	390,602戸

- ※1 建設後50年以上経過する施設の割合については建設年度不明の施設数を除いて算出した。  
 ※2 港湾は、管理者ではなく所有者。  
 ※3 堰、床止め、開門、水門、揚水機場、排水機場、樋門・樋管、陸間、管理橋、浄化施設、その他（立坑、遊水池）、ダム。  
 ※4 独立行政法人水資源機構法に規定する特定施設を含む。  
 ※5 国が施工管理者として管理する施設を含む。  
 ※6 堤防、護岸、胸壁（いずれも他省庁所管分を含む。国が権限代行で整備した施設は都道府県・市町村を含む。東日本大震災の被災3県（岩手、宮城、福島）は含まず。）  
 ※7 処理場は、供用開始後、段階的な増設を行っており、供用開始年度のみをもって、一概に当該施設の経過年数とは言えない。  
 ※8 水域施設、外郭施設、係留施設、臨港交通施設。  
 ※9 一部事務組合を含む。  
 ※10 港務局を含む。  
 ※11 灯台、灯標、灯浮標、船舶通航信号所等。  
 ※12 庁舎（合同庁舎、法務局、税務署、公共職業安定所、検察庁、労働基準監督署等）、庁舎以外（自衛隊、刑務所、宿舎等）。

一般社団法人日本建設業連合会：2015 建設業ハンドブックより引用

鉄道施設のトンネルや橋梁は、鉄道営業の性質上、列車荷重の走向回数や重量が管理された状態であるとともに、列車走向の無い夜間に計画的にメンテナンスが行いやすいと言える。一方で道路施設のトンネルや橋梁は、当初計画以上の交通量となったり、過度な渋滞や過積載車両があり、また 24 時間で車両の通行があるため、メンテナンスを行にくい性質にある中で高齢化が進んでいる。

このように、高齢化が進む構造物において、老朽化が起因した事故も少なくない。近年では、国道 23 号木曽川大橋（鋼トラス橋）における斜材の切断（2007 年 6 月）は、事故に至らなかったが、重大な損傷が確認されている。過去には、経年 20 年余りで落橋する事故もあり、維持管理の重要性を示唆している。そんな中、平成 24 年 12 月の中央自動車道笹子トンネル上り線での天井板落下事故が発生し、社会全体として維持管理に対する組織・体制を見直すきっかけとなった。平成 25 年を社会資本メンテナンス元年として、インフラの老朽化に対して総合的な取り組みを推進することとなった。

コンクリート自体の劣化が話題となった事故として、新幹線トンネルの覆工コンクリートはく落事故がある。平成 11 年 6 月 27 日に、山陽新幹線の博多駅～小倉駅間にある福岡トンネルにおいて、トンネル覆工コンクリートの一部がはく落（コンクリート塊寸法  $2\text{m} \times 0.5\text{m} \times 0.5\text{m}$ ）し、走行中の新幹線車両を損傷させる事故が発生した<sup>10),11)</sup>。この事故を受けて、維持管理を行っている JR 西日本が全トンネルの点検を実施し、同年 8 月 4 日に安全宣言を発信した。ところが、この 2 ヶ月後の 10 月 9 日に北九州トンネルにおいて再びコンクリートのはく落事故が発生した。福岡トンネルにおけるはく落発生の原因は、覆工コンクリートの肩部の側壁とアーチ部の境界部分にコールドジョイントがあり、施工当初から不連続面が存在したこと、コールドジョイントに覆工コンクリート背面の地下水が長期に渡って浸透し続け、不連続面が経年劣化したこと、列車振動がコンクリートをはく落させる引き金となったこと、などが挙げられており、最終的にはく落に至ったとされている。北九州トンネルについては、覆工コンクリートのアーチ部を先行して打設し、後から側壁部を施工する逆巻き工法であった。側壁部に設けられた打込み口が完成後も存置され、打込み口の突起部にひび割れが生じたこと、側壁部とアーチ部の打継ぎ目からの地下水が浸透し、突起部のひび割れにも浸透し劣化が進行したこと、がはく落の原因とされ、ひび割れ範囲が徐々に拡大し、突起部の自重を支えられなくなり、約 225kg のコンクリート塊がはく落した。かつてはメンテナンスフリーと考えられていたコンクリートも、適切に計画的に維持管理する必要性を認識させられた事故であり、構造物の維持管理のための調査技術や延命化のための補修技術などの開発は、この頃から盛んに行われるようになった。

## 1.2 コンクリート構造物のひび割れ発生原因

先に述べたコンクリートのはく落は、ひび割れが主たる発生要因となっていると言える。コンクリート構造物は、材料や施工方法、供用中の環境や荷重条件などにより、ひび割れを伴って劣化する。表 1.2 にひび割れ発生原因の分類について示すが、構造物に発生するひび割れは、殆どがこの A1 から D7 までの項目に当てはまるとされている。A 材料は、不適切な材料選定に起因して発生するひび割れ、B 施工は、不適切な施工方法などによって発生するひび割れが大部分を

占めており、比較的早い段階から発生するひび割れと言える。構造物に早い時期から発生したひび割れは、構造物の劣化をさらに早めていくと考えられる。一方で、C 使用環境、D 構造・外力は、材料選定や施工などが適切であっても、構造物の置かれた環境や荷重作用状況などにより徐々にひび割れが発生し、劣化が進行していく項目が多い。このようなひび割れは、構造物自体の耐久性低下をさらに加速させていくこととなる。

表-1.2 ひび割れ発生原因の分類

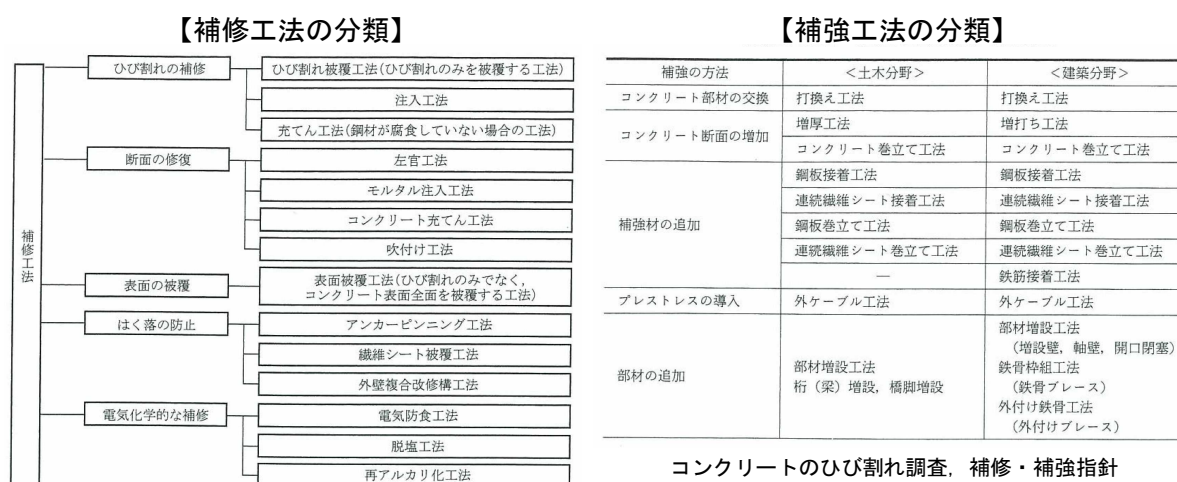
大分類	中分類	小分類	番号	原因
A材料	使用材料	セメント  材料	A1	セメントの異常凝結
			A2	セメントの水和熱
			A3	セメントの異常膨張
			A4	骨材に含まれている泥分
			A5	低品質な骨材
			A6	反応性骨材(アルカリ骨材反応)
	コンクリート		A7	コンクリート中の塩化物
			A8	コンクリートの沈下・ブリーディング
			A9	コンクリートの乾燥収縮
			A10	コンクリートの自己収縮
B施工	コンクリート	練混ぜ	B1	混和材料の不均一な分散
			B2	長時間の練混ぜ
		運搬 打込み	B3	ポンプ圧送時の配合の不適當な変更
			B4	不適當な打込み順序
		締固め 養生	B5	急速な打込み
			B6	不適當な締固め
			B7	硬化前の振動や載荷
			B8	初期養生中の急激な乾燥
			B9	初期凍害
		打継ぎ	B10	不適當な打継ぎ処理
	鋼材	鋼材配置	B11	鋼材の乱れ
			B12	かぶり(厚さ)の不足
	型枠	型枠	B13	型枠のはらみ
			B14	型枠からの漏水
			B15	型枠の早期除去
		支保工	B16	支保工の沈下
	その他	コールドジョイント PCグラウト	B17	不適當な打重ね
			B18	グラウト充填不良
C使用環境	熱・水分作用	温度・湿度	C1	環境温度、湿度の変化
			C2	部材両面の温度・湿度の差
			C3	凍結融解の繰り返し
			C4	火災
	化学作用		C5	表面加熱
			C6	酸・塩類の化学作用
			C7	中性化による内部鋼材のさび
			C8	塩化物の浸透による内部鋼材のさび
D構造・外力	荷重	長期的な荷重	D1	設計荷重以内の長期的な荷重
			D2	設計荷重を超える長期的な荷重
		短期的な荷重	D3	設計荷重以内の短期的な荷重
			D4	設計荷重を超える短期的な荷重
	構造設計		D5	断面・鋼材量不足
		支保条件	D6	構造物の不等沈下
			D7	凍上
Eその他			その他	

コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013- より引用

ひび割れの発生に対して、ひび割れの進行度や構造物の重要度に応じて適切な対応を行うことで、経済的にコンクリート構造物を維持管理していく必要がある。コンクリート構造物の場合、経年劣化の進行は徐々に進行していくことが殆どであり、劣化過程として、潜伏期、進展期、加速期、劣化期の過程で表現される。劣化過程が潜伏期でひび割れも軽微なものは、点検により状況変化を観察し、必要に応じてひび割れ注入などの対策工により、劣化の進行を抑制するなど、適切な維持管理が必要となる。劣化の進行が加速期を過ぎた状態など損傷の程度が重傷となった場合、構造物そのものを取り替える必要性も検討しなければならず、膨大な費用と時間を要するため、平常時の維持管理が構造物の延命化にとって重要と言える。

コンクリート構造物の延命化としての手段は、主に補修工法と補強工法に分類される<sup>4),5),6)</sup>。補修工法とは、構造物の劣化進行を抑制し、耐久性や防水性を回復・向上させること、および第三者への被害を防止することが目的であり、構造物自身の耐荷重の向上を目的としていない。一般的な工法として、ひび割れ注入やはく落防止、電気防食工法などが挙げられる。一方で、補強工法はコンクリート構造物の力学特性を回復・向上させることも目的としている。床版の増厚工法や、橋脚の鋼板巻立て工法、PC 上部工の外ケーブル工法などが補強対策として挙げられる。補修工法、補強工法の主な分類を表-1.3 に示す。

表-1.3 補修工法・補強工法の主な分類



コンクリート構造物に発生するひび割れの補修には、「ひび割れ被覆工法」、「注入工法」、「充填工法」が適用されることが多い。これらの適用は、後述の図-1.3 に示すようにひび割れ幅により工法が選定されるが、ひび割れ幅が 0.2mm 以上で適用可能な注入工法が広く採用されている。注入工法は、コンクリート構造物に発生したひび割れに、エポキシ樹脂などの注入材を注入することで、コンクリートの一体性を回復する目的で適用される。注入材料には、コンクリートの一体性を確保するため、コンクリートとの付着力や、ひび割れ内へ注入する際の充填性として粘性度や可使時間、硬化時の収縮量などの品質が重要となる。ここで、建設省総合技術開発プロジェクトのコンクリートの耐久性向上技術の開発において記載されている注入材の品質規格を表-1.4 に示す。今日においても、補修材料の技術開発には、この品質規格が適用されている。



表-1.4 注入材の要求性能

解説表-6.3.1 建設省総合技術開発プロジェクト 注入材と充てん材の品質規格<sup>4)</sup>

項目	材料の種類 土木補修用エポキシ 樹脂注入材 1 種	土木補修用エポキシ 樹脂注入材 2 種	土木補修用エポキシ 樹脂注入材 3 種	土木補修用充てん材 ポリマーセメント系	土木補修用充てん材 シーラント系
ひび割れ進行区分 <sup>*1</sup>	B		A	B	A, B
ひび割れ幅 (mm)	0.2~5.0			5.0<	
粘 度 (mPa・s)	1 000 以下	4±1 <sup>*2</sup>	1 000 以下	10 000 以下	ゲルを認めず
可使時間 (分)	30 以上	30 以上	30 以上	30 以上	240 以上
硬化時間 (時間)	16 以内	16 以内	24 以内	16 以内	24 以内
硬化収縮 (%)	0.1 以下	0.1 以下	0.1 以下	0.1 以下	—
伸び率 (%)	—	50 以上	100 以上	—	800 以上
モルタル付着強さ (乾燥面) (N/mm <sup>2</sup> )	6 以上	6 以上	6 以上	6 以上	たわみ量 10 mm 以上で破壊すること
付着力耐久性保持率 (%) <sup>*3</sup>	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上	60 以上

\*1: A=ひび割れが進行している, B=ひび割れの進行が止まった

\*2: チキソトロピック係数 2 rpm/20 rpm の粘度で表す。

\*3: 規格に対する百分率

コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013- より引用

トンネルの覆工コンクリートや道路橋の床版コンクリートの場合、微細な幅のひび割れが単一で存在した場合は、ひび割れ幅などから軽微と判断され問題とならない場合でも、複数のひび割れが交差するようなひび割れ形状であった場合には、個々のひび割れ自体が軽微であっても、はく落についての検討が必要となる。表-1.4 に示すように、複数のひび割れが同じ原因で発生してブロック状になる場合<sup>12)</sup>や、異なった原因のひび割れが交差する場合などがある。当初はコールドジョイントが単体で存在していた場所に、別の劣化原因により発生したひび割れが、コールドジョイントを交差するような形状となった場合などが該当する。ひび割れが結合しブロック化した場合、囲まれたコンクリート塊が落下することで、先に述べた新幹線のはく落事故のようなコンクリート塊のはく落の原因となる。特に異なるひび割れが時間差をおいてブロック化するような場合は、定期的な点検においてひび割れ状況を把握しておかなければ、気が付いたときにはひび割れ同士が結合し、ブロック化した箇所のはく落することも十分に想定される。

はく落対策には、シート系材料によりコンクリート表面を被覆することで、はく落を防止する対応が必要となる。はく落防止のシートには、その意味合いから、はく落対象となるコンクリート塊をはく落しないように保持するはく落防止性能が要求される。具体的には、一般にコンクリートとの付着力や押抜きせん断試験によりシート材料の付着を評価する。さらに、はく落を防止しつつも、点検によりはく落を目視確認できるように、シート材料に適度な伸び性能も要求される<sup>1718)</sup>。その他、コンクリート構造物を長期にはく落防止できるように、強アルカリであるコンクリートとの接着に対する耐久性や、置かれた環境の温度変化の繰り返しに耐えうる耐久性、自然光による紫外線劣化に対する耐久性なども併せて要求される。ここで、はく落防止工法は、ひび割れを直接補修する工法でないため、劣化箇所に応じてひび割れ注入や断面修復などと併用して適用されることが多い。

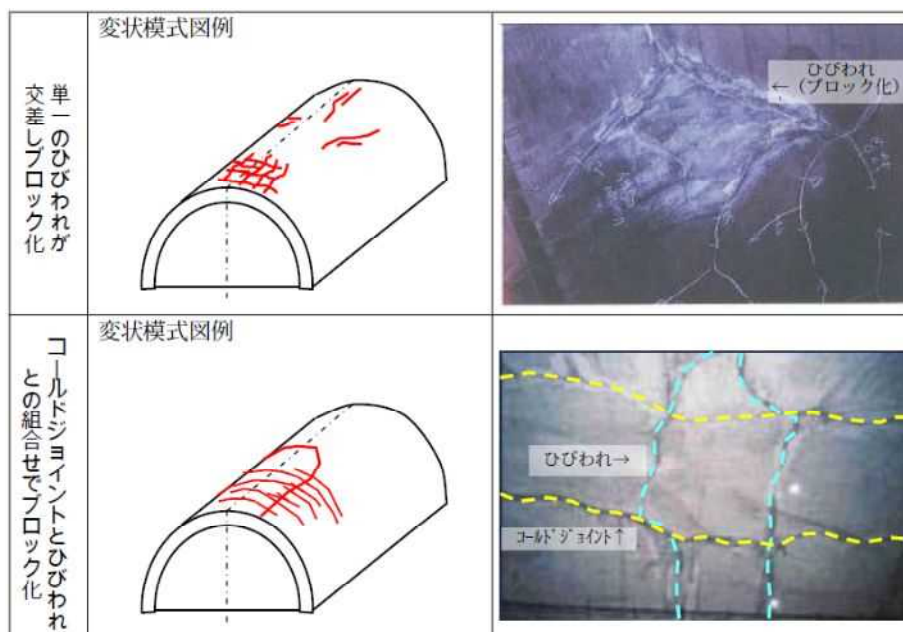


図-1.1 ひび割れによる覆工コンクリートはく落概念図

(北九州市トンネル長寿命化修繕計画(北九州市 建設局 道路維持課)より引用)

### 1.3 補修工法における樹脂材料

補修工法や補強工法において、エポキシ樹脂に代表される樹脂材料は比較的古くから使用されており、現在も継続的に技術開発がされている。主な用途は、コンクリート構造物のひび割れ補修としての注入材、橋梁の柱や梁、床版などの補強工法としてシート系材料の接着剤や FRP シート材料、樹脂モルタルのバインダー、軽微なひび割れなどの表面被覆材、床版等の防水などに適用される<sup>4)</sup>。樹脂材料の弱点としては、接着性能がコンクリート面の湿潤状況に影響されること、気温が 5℃を下回ると硬化不良となりやすいこと、60℃を上回ると軟化すること、注入材の場合は狭小なひび割れ幅には注入できないことなどがある。しかしながら、プライマーなどは湿潤面に適用できる材料や低気温でも硬化不良を起こしにくい材料が開発され、また、ひび割れ注入で 0.2mm 未満の微細なひび割れ幅に対しても注入を可能とする技術開発が進められている。また、光硬化型 FRP シートのように新たな性質を付加した樹脂材料のコンクリートへの適用などが進められている。この注入材料や光硬化型 FRP シートに代表される樹脂材料をコンクリート補修へ適用する場合、様々な基準類<sup>13),14)</sup>が整備されている。基本的にこれらの基準類に準拠する材料であれば、コンクリートへの適用が可能と考えられるが、新材料の中には既存の基準では評価が困難な材料もあると考える。

次に、紫外線により硬化する性能を有する樹脂材料をはく落防止として適用する光硬化型 FRP シートと、ひび割れ注入として広く使用される樹脂注入材料について述べる。

### 1.3.1 光硬化型 FRP シートの性能評価について

近年開発された樹脂系材料として、コンクリートのはく落対策に使用される光硬化型 FRP シートが挙げられる。光硬化型 FRP シートとは、ガラスチョップドストランドマットを光硬化の性質を有する樹脂を含浸させた FRP シートである。ガラスチョップドストランドマットは、E ガラスのストランドを長さ 50mm に切断し、ランダム配向で均一な厚みに積み重ねてマット状に成形したものであり、「JIS R 3411-2014 ガラスチョップドストランドマット (Textile glass chopped strand mats)」により規定された材料である。含浸させる樹脂は、紫外線で硬化する性質を有するエポキシアクリレート樹脂を用いており、太陽光の下では約 20 分程度で硬化する材料である。

この光硬化型 FRP シートは、コンクリート片のはく落防止を目的とし、コンクリート構造物の補修工法として従来の連続繊維シートにかわる工法として使用される。

はく落防止や耐震補強として従来より使用される炭素繊維シート<sup>15),4)</sup>、アラミド繊維シート<sup>15),4)</sup>と、短繊維を使用した光硬化型 FRP シート<sup>16)</sup>の材料の相違を表-1.5 に示す。表から分かるように、炭素繊維シート、アラミド繊維シートは長繊維からなるシートに対し、光硬化型 FRP シートは短繊維からなるシートであるため、繊維の方向性の有無が異なっている。また、引張強度や厚さは炭素繊維シート、アラミド繊維シートではほぼ同様であるが、光硬化型 FRP シートは引張強度が 20～30 分の 1、厚さは 3～10 倍程度と、材料の物理的性質が大きく異なる。さらに構造物への接着は、炭素繊維シート、アラミド繊維シートともにエポキシ樹脂等の接着樹脂をシートに含浸させながら構造物に接着することに対し、光硬化型 FRP シートは、工場出荷時にガラス繊維に光硬化樹脂が含浸された状態であり、現場ではシートを貼付した後、紫外線照射機により樹脂を硬化させることで接着する。

表-1.5 各シートの基本物性の比較

項目		炭素繊維シート CFRP	アラミド繊維シート AFRP	光硬化型FRPシート GFRP
繊維材料		炭素繊維	アラミド繊維	ガラス繊維
繊維長さ		長繊維	長繊維	50mmの短繊維
繊維の方向性		1方向, 2方向, 3方向	1方向, 2方向, 3方向	方向性無し
弾性係数	N/mm <sup>2</sup>	1.9×10 <sup>5</sup>	1.18×10 <sup>5</sup>	6.0×10 <sup>3</sup>
引張強度	N/mm <sup>2</sup>	2400以上	2060以上	80以上
繊維目付量	g/m <sup>2</sup>	200～600	280～830	450～600
設計厚さ	(mm)	0.111～0.333	0.193～0.572	1.0～1.6
構造物への接着		プライマー 接着樹脂 (2液混合ほか)	プライマー 接着樹脂 (2液混合ほか)	プライマー 光硬化樹脂 (光硬化)

本研究で使用する光硬化型 FRP シートの基本仕様を表-1.6 に示す。繊維目付量や厚さは、各章で異なる種類の材料を使用しているため、詳細は各章に記載する。ガラスチョップドストランドマットと樹脂含浸後の FRP シートを写真-1.3 に示す。

表-1.6 光硬化型 FRP シートの基本物性

項目	仕様	備考
繊維目付量	300～940 g/m <sup>2</sup>	Eガラス
厚さ	1.0～2.0 mm	樹脂含む
引張強度	80 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS K 7054 ガラス繊維強化プラスチックの引張試験方法
引張弾性係数	6.0×10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上	

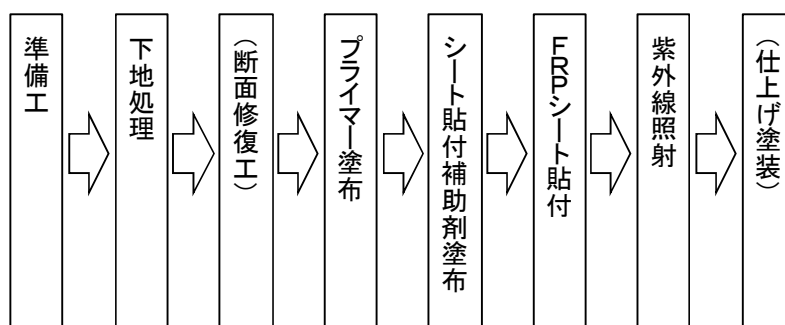


写真-1.1 チョップドストランドマット（左） 光硬化型 FRP シート（右）

写真-1.3 の左は、ガラス繊維が積層された状態であり、繊維 1 本 1 本が白く見えるため、全体として背景が透けてみえることが無いが、写真-1.3 の右のように樹脂を含浸させることで、光の屈折角の関係によりガラス繊維が透明に見えるため、シート背面が透けて見える。このため、コンクリートに貼付した際、FRP シートが硬化してもコンクリート表面が透けて見えることに特徴がある。

シート製作工場ですべて樹脂を含浸させた状態で出荷するため、FRP シートの両面に保護フィルムがある状態で、シート状もしくはロール上にて出荷される。現場では保護フィルムを剥がして構造物に接着する。

光硬化型 FRP シートのコンクリートへの貼付手順を図-1.2 に示す<sup>16)</sup>。



図－1.2 光硬化型 FRP シートのコンクリートへの貼付手順

プライマーおよび貼付補助剤の基本物性値を表－1.7、表－1.8 に示す<sup>16)</sup>。

表－1.7 プライマーの物性値

種類	標準プライマー	試験方法
一般名	アクリル樹脂	-
硬化方法	3液混合(熱硬化型)	-
外観	褐色液体	-
粘度(25℃)	100mPa・s	JIS K 6833接着剤の一般試験方法
標準塗布量	0.2kg/m <sup>2</sup>	-
硬化(乾燥)時間	-	-
付着強度	1.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909建築用仕上塗材

表－1.8 貼付補助剤の物性値

種類	貼付補助材	試験方法
一般名	光硬化性樹脂コンパウンド	-
硬化方法	紫外線/可視光硬化	-
標準塗布量	0.5kg/m <sup>2</sup> ※	-
付着強度	1.5 N/mm <sup>2</sup> 以上	JIS A 6909建築用仕上塗材

光硬化型 FRP シートはく落防止として適用する場合，対象構造物を管理する機関により要求性能が異なる。各機関におけるはく落防止シートへの主な要求性能を表－1.9 に示す<sup>17),19),16)</sup>。

表-1.9 はく落防止シートの要求性能

要求性能	基準値	機関
付着試験 JSCE-K531-2010	1.5N/mm <sup>2</sup> 以上	NEXCO
	1.0N/mm <sup>2</sup> 以上	首都高速道路公団 東海旅客鉄道
押し抜き試験 JSCE-K533-2010	1.5kN/m以上	NEXCO 首都高速道路公団 東海旅客鉄道, 他
ひび割れ追従性試験 JSCE-K532-2010	0.4mm以上	NEXCO
	0.6mm以上	東海旅客鉄道
促進中性化試験	30日1mm以下	NEXCO 首都高速道路公団
	70日1mm以下	東海旅客鉄道

光硬化型 FRP シートをはく落防止対策として使用する場合、ひび割れ幅の変動に追従できるように、ひび割れ追従性試験による評価を行う。しかしながら、当該シートのようにシート厚さが厚い場合、ひび割れ幅が閉じる方向に挙動した場合、ひび割れ箇所では FRP シートが座屈することが懸念される。シート厚さが薄い場合は、ひび割れ箇所のごく周辺部のみでシートが曲がる程度であり、ひび割れ周辺部のシートの付着が剥がれるようなことは無いと考えられるが、FRP シートのように厚みがあるシートの場合、シートが収縮する際にひび割れ周辺の比較的広い範囲でバックリング（座屈）現象が発生し、ひび割れ周辺の FRP シートの付着をはく離させ、接着力が強いとコンクリートの母材破壊が発生する。この FRP シートなどのシート系材料に対するバックリング現象を適正に評価するような試験方法は無く、適正な評価が行われていない。

連続繊維シートを用いた指針として、文献<sup>20)</sup>「コンクリートライブラリー101号～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～：土木学会」が挙げられる。この文献は、炭素繊維シートやアラミド繊維シートなどの連続繊維シートによりコンクリート構造物を補修・補強する際の設計施工指針であり、コンクリートのはく落防止や、耐震補強技術として連続繊維シートを使用する際に適用されている。この指針は連続繊維シートを対象としたものであり、例えば短繊維を使用したシート系材料は、基本的には準拠できる考えられるものの、指針の適用範囲外となる。コンクリートのはく落防止に使用される光硬化型 FRP シートは、ガラス繊維を樹脂で固めた材料であるが、ガラス繊維が短繊維を使用しているため、この指針の対象外となっている。

この光硬化型 FRP シートを耐震補強などの補強工法として適用する場合、短繊維であり連続繊維のように方向性がないことなどの相違点がある。このため、単純に FRP シートの耐力評価のみならず、光硬化型 FRP シートの等方性などの特性を適切に評価し、構造物に適用することが必要と考える。

さらに、はく落防止対策として光硬化型 FRP シートなどのシート系材料を施工する場合、対象構造物にはトンネル、山岳トンネルや地下鉄トンネル、タンクや水門など、構造物背面に水圧が作用していることがある。ひび割れなどの欠陥が躯体おもて面と背面で貫通している場合、ひび割れの開口を通じて背面の水圧が光硬化型 FRP シートの貼付面に直接作用させることが懸念される。しかしながら、シート系材料の接着力は、コンクリートのはく落防止としてコンクリート塊

の重量を支える耐力により決定しており、水圧の作用は考慮していない。このため、水圧が作用するような構造物へシート系材料を適用する場合、水圧作用に対する耐力を適切に評価することが必要と考える。

### 1.3.2 ひび割れ注入における樹脂の性能評価について

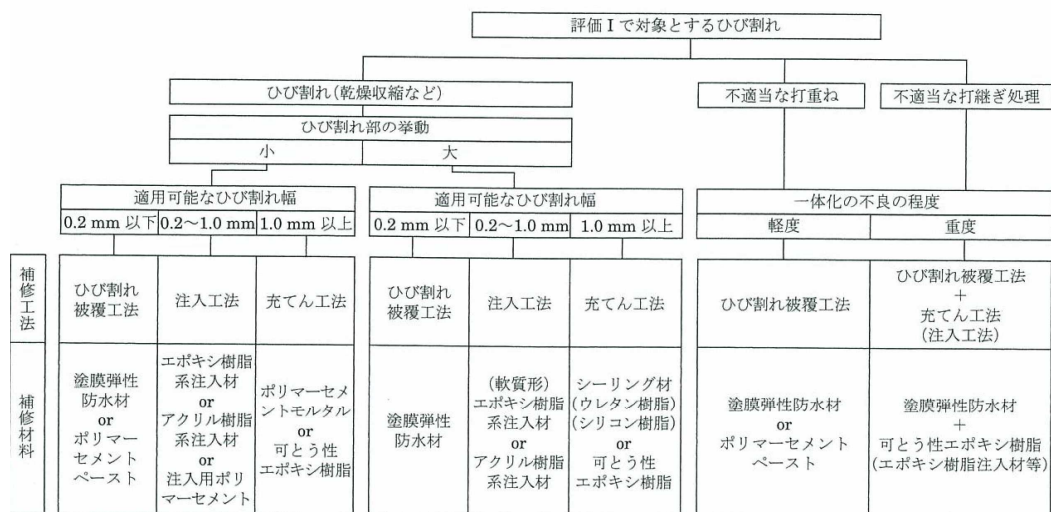
補修・補強に使用される樹脂は、コンクリートのひび割れへの注入材料に使用されることが多い。ひび割れ補修は、ひび割れの発生原因、ひび割れの変動、ひび割れ幅、鋼材の腐食状況から適切な補修工法を選定する。図-1.3 にひび割れ補修工法の選定表の例を示す。一般的には、表中にあるように、ひび割れ被覆工法、ひび割れ注入工法、充填工法が選定されることが多く、中でも注入工法が多く適用されている<sup>21),22)</sup>。

近年では、注入工法の技術開発が進み、今まで 0.2mm 以上のひび割れへ適用していた注入工法が、0.1mm 以下のひび割れまで注入可能な工法が増えている<sup>23)</sup>。文献<sup>22)</sup>によると、北海道におけるひび割れ補修材料の集計およびひび割れ幅毎の使用材料の構成比をまとめた事例があり、図-1.4 に示す。この表から、注入材料はエポキシ系、セメント系（ポリマーセメント系および超微粒子セメント系）で全体の約 8 割を占めており、中でもエポキシ系が多く使用されていることが分かる。またひび割れ幅からも、1mm 未満の材料ではエポキシ樹脂が多く使用されている。

エポキシ系の注入材料を使用した注入工法は、コンクリートとの接着性能の良さから古くから使用されている。一方で、気温 5℃以下では硬化不良を起こすなど、接着力を阻害することがある。一般に注入工法の品質管理として、温度や注入材の可使時間、超音波測定器などを用いた注入深さ確認などが行われている<sup>4)</sup>。しかしながら、これは注入材が確実にコンクリートを接着していることが前提であり、接着性能を確認する品質管理は行われていない。

ひび割れには、コンクリート構造物の新設時に発生するひび割れから、経年劣化とともに発生するひび割れなど様々なひび割れがある。発生する原因として、構造物に荷重が作用して発生する曲げひび割れせん断ひび割れ、荷重が作用していない状態でも、温度ひび割れや乾燥収縮ひび割れ、鉄筋腐食に伴うひび割れなど様々な発生原因がある。このため、注入工法を適用した際に、コンクリートのひび割れ内部の状況も多様であり、水の有無や析出物の有無、水平や鉛直などのひび割れの方向性、貫通ひび割れや閉じたひび割れ、ひび割れ面のすり減りなどが考えられる。これらのひび割れに対して、適切に注入材料が接着しているかを確認する必要があると考える。また、アルカリシリカ反応（以下、ASR）のように内部から亀甲状に発生するひび割れについては、注入工法によりひび割れ内部まで適切に注入されるか明確に評価されていない。特に ASR ひび割れについては、樹脂注入の性能を評価するための供試体を制作することも困難で有り、実際の ASR 反応性骨材を用いて室内で供試体を作製した場合、供試体作製のために膨大な時間を費やすこととなる。このため、樹脂注入を評価できるような供試体を簡易に製作することも必要となる。





※「評価Ⅰで対象とするひび割れ」とは乾燥収縮や水和熱によるひび割れなど、竣工から数年内には収束すると考えられるひび割れをさす。

【コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針-2013-】より引用

図-1.3 ひび割れ注入工法の選定

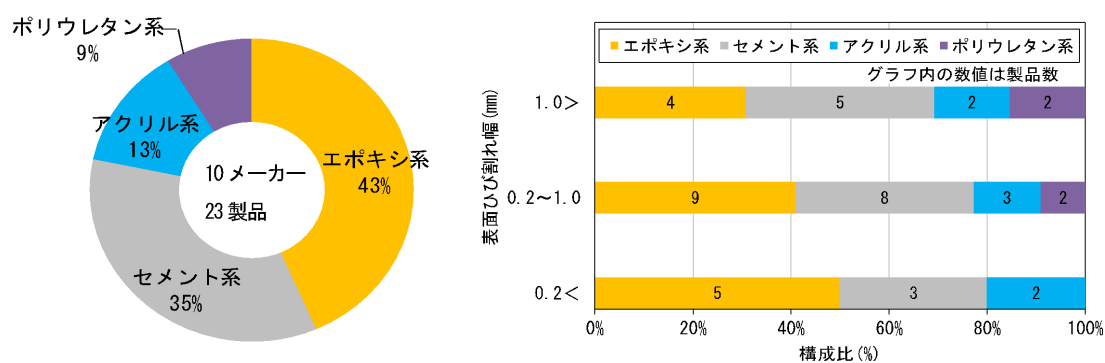


図-1.4 ひび割れ注入工法の施工件数例



## 1.4 研究の目的

本研究は、以下に示す 2 項目に関する研究である。

□ 光硬化型 FRP シート

□ エポキシ樹脂注入

1.4.1～1.4.3 は、光硬化型 FRP シートに関する研究、1.4.4～1.4.5 は、エポキシ樹脂に関する研究であり、各々の目的を以下に述べる。

### 1.4.1 光硬化型 FRP シートにおける閉口ひび割れ追従性試験の提案

はく落防止対策の主な対象構造物は、橋梁の梁やスラブ背面、高欄、トンネル覆工コンクリートの内面などがある。はく落防止を行う際、構造物の新設時に実施する場合は、貼付面は清浄なコンクリート面であるが、維持管理としてはく落防止対策を行う際は、構造物自体が何らかの劣化し、ひび割れがある状態であることが一般的である。すべてのひび割れが注入工法などで補修されていることが好ましいが、ひび割れの大小により注入工法の要否が判断され、また、ひび割れの伸縮挙動等による注入材の劣化など様々な理由で、開口したひび割れ上にシートが貼付されていることが考えられる。閉口する可能性があるひび割れに対しては、ひび割れの拡張方向のみならず、閉口方向に対しても、シートのひび割れ追従性が要求される。閉口するひび割れへの FRP シートの追従性試験については、既往のひび割れ追従性試験では評価できないため、新たに試験方法を提案する。

### 1.4.2 光硬化型 FRP シートにおける異方性を考慮した耐震補強への適用について

炭素繊維シートに代表される連続繊維シートは、耐震補強工法として設計施工指針なども整備され、実用化されている。一方で、光硬化型 FRP シートのような短繊維シートは、先に述べたように、連続繊維シートのように、ある特定の方向に強度が卓越する、いわゆる異方性材料と異なり、どの方向にも同じ引張強度を発揮する疑似等方性材料である。そのため、シートを貼付する方向についても、荷重の作用方向と無関係に自由な方向を選定することができる。しかし、この短繊維ガラスによる光硬化型 FRP シートを用いたせん断補強について、異方性のある連続繊維との性質の違いや強度評価式の適用性について、ほとんど研究が行われていない。本研究では、短繊維ガラスによる光硬化型 FRP シートに着目し、RC 梁に貼付された際、等方性材料としてのせん断耐力が、連続繊維シートのせん断耐力と同様に取り扱えるか検証する。さらに、等方性材料を異方性を持たせて貼付したとき、せん断補強効果への影響を検討する。

### 1.4.3 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

光硬化型 FRP シートの施工対象として、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。はく落対策として貼付

する場合、コンクリートの剥落塊の重量を支えるための付着性能が要求されており、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、光硬化型 FRP シートを用い、コンクリートに貼付された FRP 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。

#### 1.4.4 エポキシ樹脂注入におけるひび割れに充填された樹脂の付着性能評価試験の提案

鉄筋コンクリート構造物のひび割れ補修には、エポキシ樹脂材料がコンクリート組織の一体性を回復する目的で広く使用されている。エポキシ樹脂を用いた場合、コンクリートとエポキシ樹脂との付着強度はコンクリートの引張強度より大きい。

ひび割れに充填されたエポキシ樹脂（以下、樹脂）とコンクリートとの付着性能は、樹脂の性質、ひび割れの向きや幅、ひび割れ面の湿潤状態や汚れ・析出物などひび割れ内部の状況、注入時の温度、施工後の材齢など様々な要因の影響を受ける可能性がある。しかし、注入時の品質管理において、ひび割れ内部の状況を判定することは困難であり、さらにコア採取により充填深さを確認することはあっても、付着強度などの付着性能を直接評価する品質管理は一般に行われていない。これは、注入後の樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための評価試験方法が確立していないことも一因であると考えられる。樹脂とコンクリートとの付着性能が得られにくい条件の下での性能の評価と施工方法の改善を行うためにも、評価試験方法の標準化が望まれる。

本研究においては、供試体作製方法も含め、ひび割れに注入した樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法を提案することを目的とし、充填された樹脂の付着性能を評価する試験方法として適用できるかを確認するとともに、樹脂とコンクリートとの付着性能を評価する。

#### 1.4.5 模擬膨張骨材およびエポキシ樹脂を用いた ASR ひび割れ再現方法の提案

コンクリート構造物の劣化現象の一つである ASR の進行は、構造物に深刻な問題を及ぼすことが知られており、劣化メカニズムの解明や補修工法に関する研究が進められている。その中で、亜硝酸リチウムなどを用いた膨張抑制技術が比較的多く研究<sup>1),2)</sup>されているものの、膨張進行が収束した後の機能回復に関する研究は少なく、ひび割れへの樹脂注入性能に関して解明されていないのが現状である。ASR はひび割れが生じるまでに数ヵ月から数年かかるため、研究が長期に及ぶこととなる。ASR によるひび割れを早期に模擬できれば、今後の ASR に対する補修技術開発の飛躍が期待できる。

本研究では、ASR によるひび割れを室内において早期に再現するため、模擬膨張骨材を用いたコンクリートについて提案するとともに、模擬膨張骨材を用いた供試体を作製し、再現した ASR ひび割れに樹脂注入を実施し、補修工法として樹脂注入の適用性について評価を行った。

## 1.5 論文の構成

本論文の構成を、図-1.5 に示す。

第1章では、光硬化型 FRP シートやひび割れ注入用エポキシ樹脂の概要と問題点を述べている。この研究背景を踏まえ、研究の目的とその位置づけについて述べている。

第2章「コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートのバックリング現象を評価するための試験方法の提案」では、従来のひび割れ追従性試験では評価できないひび割れの閉口方向への FRP シートの追従性を評価するための試験方法を提案した。ひび割れ幅、FRP シート厚さ、FRP シートの無付着域の大きさをパラメータとして、光硬化型 FRP シートの閉口方向のひび割れ追従性を、この試験方法により評価した。その結果、FRP シートの厚さが 1.5 mm の場合には、ひび割れ幅の違いによらず、今回の試験条件では約 0.2mm のひび割れ閉口変位で FRP シートにバックリング現象が発生することを確認した。FRP シートが厚い場合やひび割れ周辺部の無付着域が大きい場合には、バックリング開始時のひび割れ閉口変位が大きくなり、閉口ひび割れに対する FRP シートの追従性が向上することを確認した。

第3章「光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究」では、等方性材料である短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートについて、異方性を有する連続繊維補強によるせん断耐力の既往の算出式への適用性について載荷試験で検証した。また、カッティングにより異方性を持たせて貼付した際のせん断耐力を確認した。その結果、光硬化型 FRP シートのせん断耐力は、既往の算出式におけるシートが部材軸となす角度を $\theta=45^\circ$  度として算出するせん断耐力以上となることを確認した。また、異方性を持たせた貼付では、貼付面積 100%時は、既往の算出式以上であることを確認した。貼付面積を半分にした際は、異方性の角度によっては FRP シートの引張強度が有効に発揮できず、計算値を下回ることがあることが分かった。

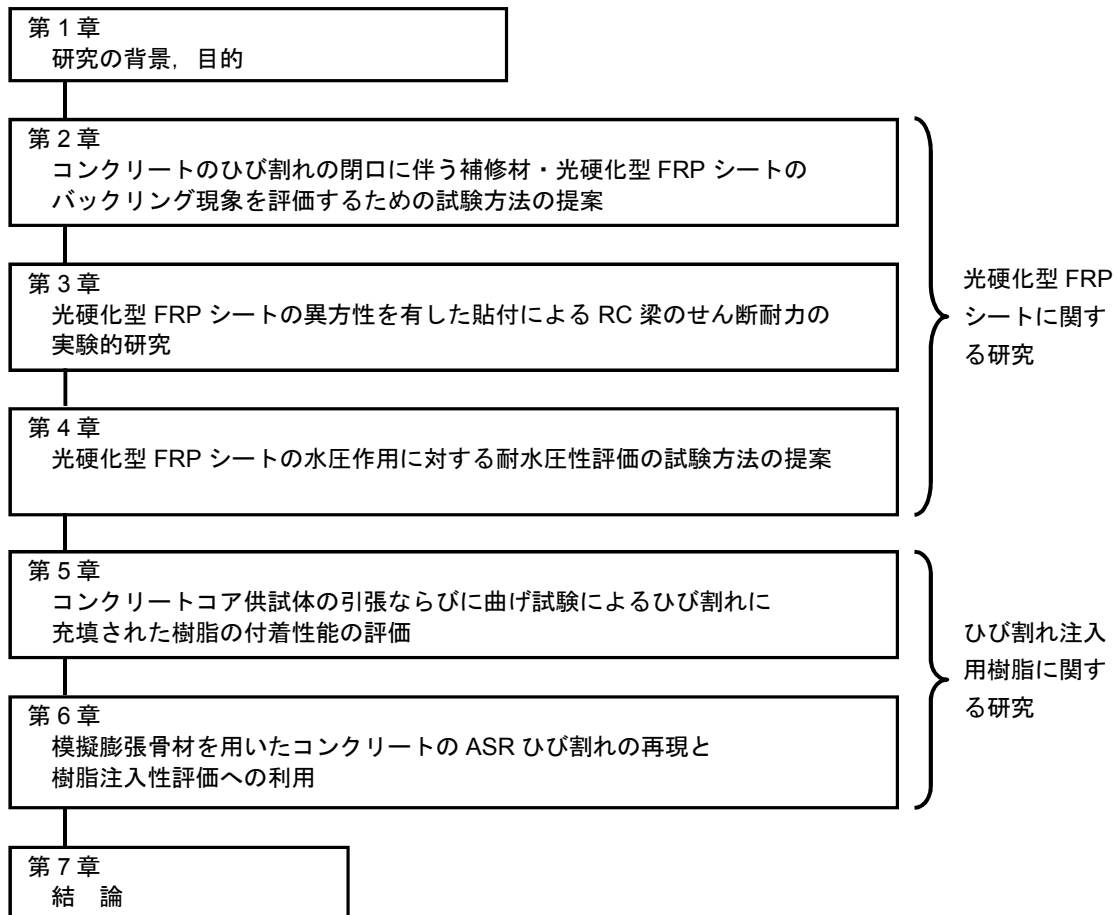
第4章「光硬化型 FRP シートの水圧作用に対する耐水圧性評価の試験方法の提案」では、剥落防止対策として用いられる光硬化型 FRP シートについて、欠損箇所やひび割れから水圧が作用した場合の耐水圧性を評価する試験方法を提案した。プレキャスト製の U 型側溝ふたを使用し、欠損やひび割れを模擬した開口の直径や長さなどを変化させ、耐水圧性をこの試験方法で評価した。その結果、円形状および直線状の開口とも、直径や長さが大きくなると剥離時の最大水圧が低下する傾向が分かった。全荷重と周長は線形による比例関係があることが分かった。単位周長当たりの荷重とした場合、開口の形状や周長に関わらずシートの剥離したときの荷重が一定の範囲となり、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。

第5章「コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価」では、コンクリート構造物のひび割れに充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂が充填されたひび割れ部を含むコア供試体を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。直径 25mm のコア供試体をダンベル型に成形し、一軸引張試験を行った。また、支点部に鞍状の合板製治具を用いて、直径 50mm のコア供試体の曲げ試験を行った。一軸引張試験ならびに曲げ試験により、コンクリートのひび割れに充填された樹脂の付着性能を評価することができた。

第6章「模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と樹脂注入性評価への利

用」では、ASR ひび割れを室内で再現するため、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（High Performance Fiber Reinforced Cement Composite、以下 HPFRCC）に静的破砕剤を混入した模擬膨張骨材を提案した。模擬膨張骨材を用いて供試体を作成したところ、ASR ひび割れのような亀甲状ひび割れが再現できた。再現したひび割れへ補修用の樹脂注入を行ったところ、注入孔の近傍は樹脂が充填されたが、深部ではほとんど樹脂が充填されず、実際の ASR ひび割れと同様な充填状況となった。

第 7 章では、第 2 章から第 6 章までの研究成果をまとめ、結論を述べた。



図－1.5 論文の構成

## 【参考文献】

- 1) 一般社団法人日本建設業連合会：2015 建設業ハンドブック，<http://www.nikkenren.com/publication/handbook.html>，2015
- 2) 国土交通省：2015 国土交通白書，<http://www.mlit.go.jp/hakusyo/mlit/h26/index.html>，2015.7
- 3) 国土交通省：インフラメンテナンス情報ポータルサイト <http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/index.html>，
- 4) コンクリート補修・補強マニュアル編集委員会：コンクリート補修・補強マニュアル，産業調査会事典出版センター，pp.243-248，2003.5
- 5) 公益社団法人コンクリート工学会：コンクリート診断技術'15 [基礎編]，2012.2
- 6) 公益社団法人日本コンクリート工学会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2009，2013.5
- 7) 公益社団法人土木学会：コンクリートライブラリー127 号，複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料 (HFRCC) 設計・施工指針 (案)，2007.3
- 8) 新家一秀：コンクリート構造物の補修材としての HFRCC の性能評価，2014.9
- 9) 濱田 秀徳：複数微細ひび割れ型繊維補強モルタルを使用した水路ライニング工法について，近畿地方整備局研究発表会，調査・設計部門 II-No.14，2006
- 10) 衆議院会議録第 146 回国会運輸委員会第 3 号（平成 11 年 11 月 17 日（水曜日）），  
[http://www.shugiin.go.jp/internet/itdb\\_kaigiroku.nsf/html/kaigiroku/001114619991117003.htm](http://www.shugiin.go.jp/internet/itdb_kaigiroku.nsf/html/kaigiroku/001114619991117003.htm)
- 11) 会計検査院：平成 11 年度決算検査報告第 4 章第 2 節第 11，山陽新幹線におけるトンネル、高架橋等のコンクリート構造物について，<http://report.jbaudit.go.jp/org/h11/1999-h11-0642-0.htm>
- 12) 北九州市建設局道路維持課：九州市トンネル長寿命化修繕計画，2013.2
- 13) 公益社団法人土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書 [維持管理編]，2013.10
- 14) 公益社団法人土木学会：2013 年制定 コンクリート標準示方書 規準編 「土木学会規準および関連規準」 + 「JIS 規格集」，2013.11
- 15) 前田工織株式会社：カーボン繊維シートカタログ
- 16) 株式会社竹中土木：パーマコート工法技術資料 Vol.3
- 17) NEXCO：設計要領第二集橋梁保全編，pp.6.44-6.51，2011.7.
- 18) 東日本高速道路株式会社ほか：構造物施工管理要領，pp.3-43-3-54，2014.7
- 19) 東日本高速道路株式会社ほか：設計要領第二集，橋梁保全編第 4 章床版，pp.25-29，2006.4.
- 20) 公益社団法人土木学会：コンクリートライブラリー101 号，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
- 21) 瀬野康弘，魚本健人：ひび割れ注入補修における注入性状に影響を及ぼす要因に関する実験的検討，コンクリート工学論文集，第 19 巻第 1 号，pp.11-20，2008.1
- 22) 村中智幸ほか：実構造物におけるひび割れ注入後の品質管理に関する検討，平成 24 年度技術研究発表会，2013.2
- 23) 公益社団法人土木学会：技術推進ライブラリーNo.9 鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法 (IPH システム) の設計施工法に関する技術評価，2011.9

## 第 2 章 コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案

### 2.1 はじめに

コンクリートのはく落防止対策においてシート材料を用いた補修工法を適用する場合、構造物を所有する機関により規定されている付着性能試験やひび割れ追従性試験により評価される性能を満足する必要がある<sup>1),2),3),4),5)</sup>。ひび割れ追従性試験とは、一般にひび割れの開口方向（目開き方向）へのシートの追従性を試験するものである<sup>6)</sup>。光硬化型 FRP シートなどの硬質な材料の場合、ひび割れの閉口方向（閉じる方向）への追従性についても別途評価する必要があると考える。

本研究では、光硬化型 FRP シートに着目し、ひび割れの閉口方向への追従性を評価するための試験方法を提案するとともに、シートのバックリング現象について評価することを目的とする。

### 2.2 光硬化型 FRP シートによる剥落防止の基本性能

#### 2.2.1 光硬化型 FRP シートの性質

本試験で使用した光硬化型 FRP シートは、厚さが異なる 3 種類のシートを使用した。各 FRP シートの基本物性を表-2.1 に示す<sup>7)</sup>。

表-2.1 光硬化型 FRP シートの一般的物性

繊維種類	TYPE1	TYPE2	TYPE3
繊維量	300g/m <sup>2</sup>	600g/m <sup>2</sup>	940g/m <sup>2</sup>
厚さ	1.0mm	1.5mm	2.0mm
引張強度	80N/mm <sup>2</sup> 以上		
引張弾性係数	$6.0 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ 以上		

#### 2.2.2 シート材料のひび割れ追従性能

はく落防止としてシート材料を使用する場合、対象構造物を管理する機関によりひび割れ追従性試験が要求されることが多い。光硬化型 FRP シートを用いたはく落防止対策も、この要求性能を満足した材料にて施工を行うこととなる。ひび割れ追従性については、土木学会基準である「表面被覆材のひび割れ追従性試験方法：JSCE-K532」に準拠した試験により評価することとなる<sup>6)</sup>。40mm×120mm×10mm の板状供試体の 1 面にシートを貼付し、その背面に切り欠き(5mm)を設け、両端から引張る試験である。試験状況を写真-2.1 に示す。この試験は、ひび割れの拡張方向の性能評価を行う試験であり、閉口方向の追従性を評価するものではない。

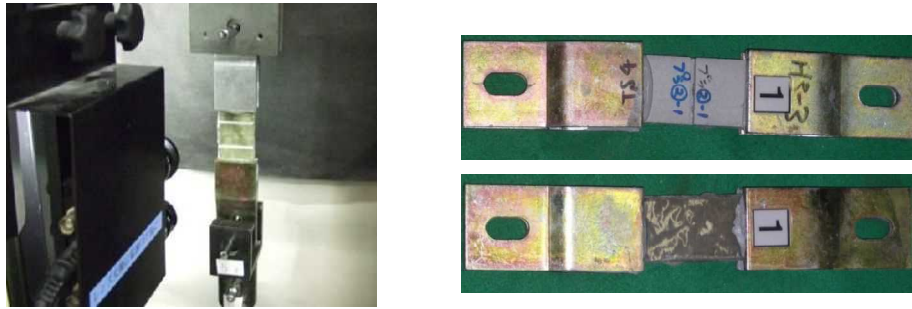
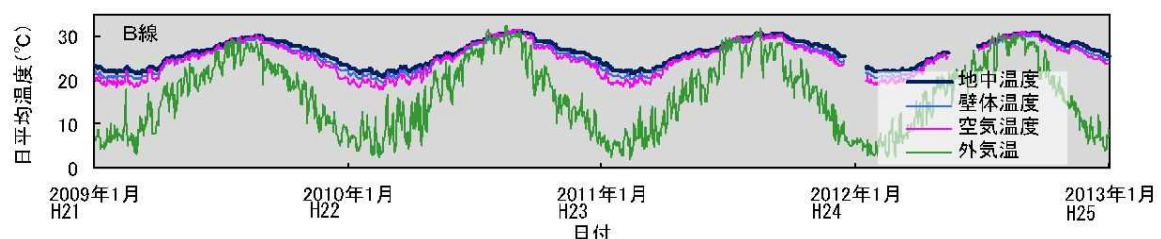


写真-2.1 ひび割れ追従性試験状況 (JSCE-K532 による)

### 2.2.3 閉口方向のひび割れ追従性能の評価の必要性

はく落防止対策用のシート材料の主な適用対象には、橋梁の梁やスラブ背面、高欄、トンネル覆工コンクリートの内面などがある。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ている状態であり、ひび割れがある構造物に貼付することが一般的である。すべてのひび割れが充填補修されてシートが貼付されることが好ましいが、ひび割れの大小により充填の要否が判断され、また、ひび割れの伸縮挙動等による充填材の劣化など様々な理由で、充填されていないひび割れ上にシートが貼付されていることが考えられる。閉口する可能性があるひび割れに対しては、ひび割れの拡張方向のみならず、閉口方向に対しても、シートのひび割れ追従性が要求される。

実際の供用中の鉄道トンネルにおいて、トンネル内の気温変化を計測した報告<sup>8)</sup>によると、鉄道トンネルでは夏季と冬季では図-2.1に示すように、夏季で約30℃、冬季で約20℃と、年間で約10℃程度の温度変化を示す計測事例がある。コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6} (1/^\circ\text{C})$ とし、コンクリート温度が周辺の気温と同じと仮定すると、例えば5m程度の間隔でひび割れがあるトンネル覆工コンクリートでは、夏に閉じる方向、冬に開く方向の動きが0.5mm程度、気温変化により発生する可能性がある。実際には、覆工コンクリートの厚さ方向に温度が分布する影響や、背面の地山拘束による影響があるため、線膨張係数による算出値(0.5mm)より小さい変位量と考えられるが、このように、温度によりひび割れが伸縮する場合、ひび割れに貼付された硬質なシート材料のひび割れ拡張方向の評価とともに、ひび割れの閉口方向の挙動を適正に評価する必要がある。



「地下鉄トンネル内温度の予測と検証、第266回鉄道総研月例発表会」より引用

図-2.1 試験状況の写真

## 2.3 閉口ひび割れ追従性試験の提案

### 2.3.1 閉口ひび割れ追従性試験の方法

閉口するひび割れへの FRP シートの追従性試験については、既往のひび割れ追従性試験では評価できないため、新たに試験方法を提案し、その試験により閉口ひび割れへの FRP シートの追従性やバックリング現象についての評価を実施した。ここで、バックリング現象とは貼付したシート材料が座屈する現象のことであり、FRP シートが収縮する方向に荷重を受けた際に、収縮する方向と垂直方向に FRP シートが変位することを言う。今回実施した試験方法の概要図および写真を図-2.2、写真-2.2 に示す。また、評価のために実施した試験の種類は、表-2.4 に示す。

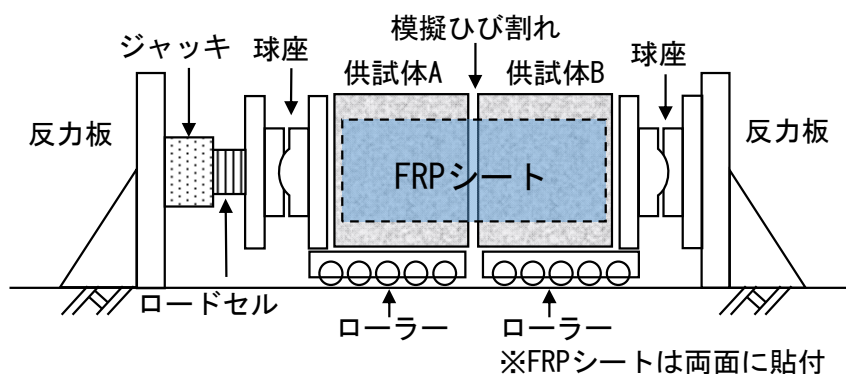


図-2.2 試験方法の概要図

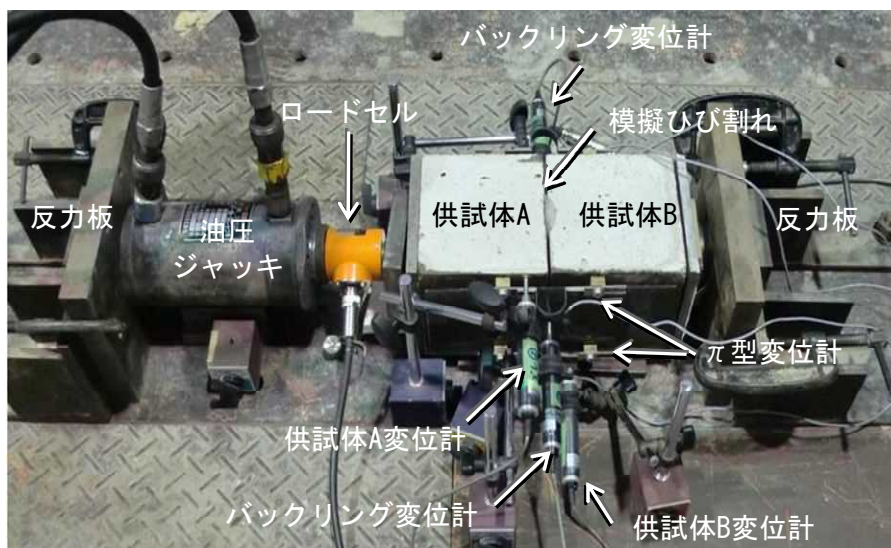


写真-2.2 試験状況の写真



### 2.3.2 供試体の作製

作製概要図を図-2.3 に、切断面を写真-2.3 に示す。内径 50mm の中空塩化ビニル管を設置したコンクリート供試体（150×150×300mm）を作製した。供試体の載荷面が平坦となるよう、端面（打設面）をコンクリートカッターにて薄層で切り取った。そのため、実際に使用した供試体の寸法は、150mm×150mm×280mm となった。さらに中央を切断し、2つのコンクリート供試体（150×150×約 140mm、供試体 A、B）を加工した。中央の切断面を所定の間隔で突き合わせて模擬ひび割れとした。供試体に使用したコンクリートの配合を表-2.2 に示す。また、試験時のコンクリート強度は実測値で 34.8N/mm<sup>2</sup> であった。

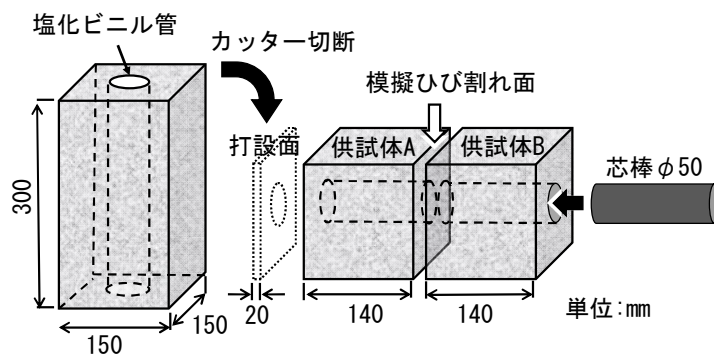


図-2.3 供試体作製概要図

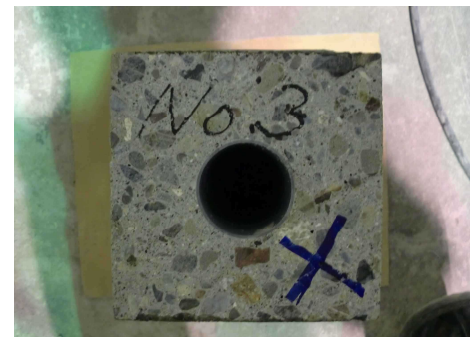


写真-2.3 供試体断面

表-2.2 供試体の配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 Air (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 A
55.0	48.0	4.5	175	318	843	921	0.994

光硬化型 FRP シートを、図-2.2 に示すように供試体 A,B の平行する 2つの側面に貼付し、供試体に軸力を加え、FRP シートに圧縮力を作用させた。供試体 A および B は、ひび割れ部を跨ぐ 2枚の FRP シートで繋がっているのみである。載荷時にコンクリート供試体が載荷軸方向からずれて FRP シートにはく離が生じないように、図-2.3 に示すように、供試体の中心部の塩化ビニル管（内径 50mm）に、外径 50mm 弱の芯材（鋼製またはモルタル製）を挿入した。

貼付する光硬化型 FRP シートの寸法は、計測機器の設置を考慮し、供試体側面寸法より幅が小さい 100mm×280mm とした。供試体の貼付面にプライマーを塗布（養生期間 1 日以上確保）し、続いて貼付補助材を塗布した後、光硬化型 FRP シートを模擬ひび割れを跨ぐように貼付した。貼付補助材は、光硬化型 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の材料のパテ

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。

今回は太陽光により光硬化型 FRP シートに紫外線を与え、紫外線量計測機（UV チェッカー）により、各シートの紫外線積算光量が  $1500\text{mJ}/\text{cm}^2$  以上であることを確認し、硬化完了とした。

今回作製した供試体において、FRP シートの付着試験を実施した結果を表-2.3 に示す。NEXCO 等の発注機関毎に付着試験の規格値が規定されているが、一般的に  $1.5\text{kN}$  以上とされており、今回の試験結果は、この規格値に対して満足する付着強度であった。

表-2.3 付着試験結果

供試体	付着試験結果 (kN)					規格値	判定
	測点1	測点2	測点3	測点4	平均		
No.1	3.5	4.41	3.22	3.1	3.56	1.5kN以上	合格
No.2	3.65	2.94	2.52	3.51	3.16	1.5kN以上	合格
No.3	2.38	4.51	-	3.79	3.56	1.5kN以上	合格

### 2.3.3 載荷装置および荷重計測

載荷方向は、供試体の自重が FRP シートに作用しないように、水平横向き方向とした。荷重は、手動式の油圧ジャッキにより与え、油圧ジャッキと供試体の間にロードセル（容量  $100\text{kN}$ ）を設置し、載荷荷重の計測をおこなった。床にボルト固定した反力板により、ジャッキによる水平方向の荷重を支えた。床と供試体 A および供試体 B の間にそれぞれ独立したローラーを置き、載荷側と反力側の両方に球座を置いた。供試体設置前の試験装置を写真-2.4 に示す。

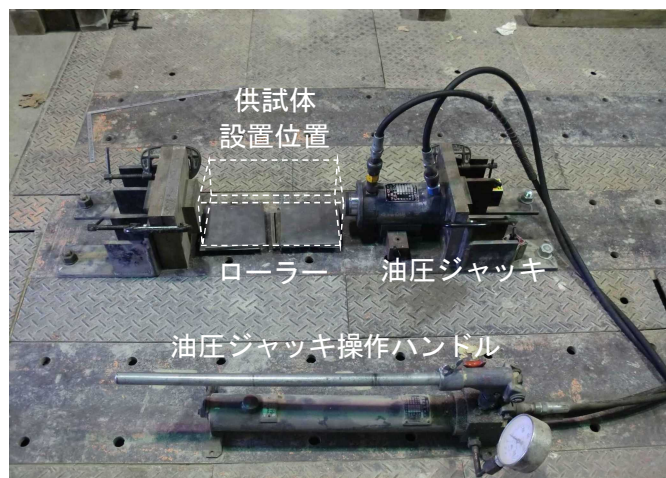


写真-2.4 供試体設置前の試験装置

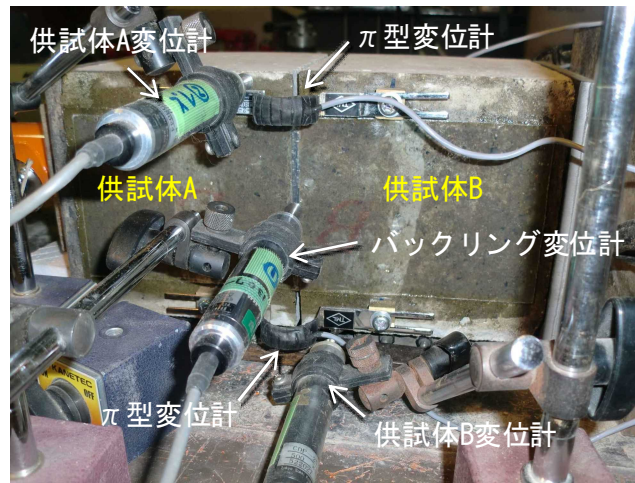
### 2.3.4 変位計測

#### (1) 閉口ひび割れの変位計測

載荷に伴う模擬ひび割れの閉口変位を、 $\pi$ 型変位計（容量 $\pm 5\text{mm}$ ）にて計測した。写真－2.5に示すように、FRP シートの上方および下方の 2 箇所では模擬ひび割れを跨ぐように変位計を設置し、2 箇所の平均値をひび割れ閉口変位とした。FRP シートは供試体の 2 面にあるため、 $\pi$ 型変位計を合計 4 箇所設置した。

#### (2) FRP シートのバックリングの計測

載荷時の FRP シートのバックリング状況を計測するため、写真－2.5 に示すように、模擬ひび割れ上の 2 つの面の FRP シート中央部に、高感度変位計（容量  $25\text{mm}$ ）を各 1 個ずつ設置し、シートの膨れの程度を計測した。載荷時の供試体自身の横方向の変位を計測し、バックリング変位の計測値から除いた。計測位置は、供試体のねじれ変位もキャンセルできるように、バックリング計測位置を中心に、片側は供試体 A 側のシート上方、もう片側は供試体 B 側のシート下方とした。なお、この供試体変位の計測は、供試体の片面のみで行い、符号を反転させることで、両面の FRP シートのバックリング変位結果へ反映させた。



バックリング変位計、 $\pi$ 型変位計は裏面のFRPシートにも配置

写真－2.5 変位計設置状況

## 2.4 実験結果と考察

### 2.4.1 試験条件

表－2.4 に示すような条件下で貼付した FRP シートについて，提案する閉口ひび割れ追従性試験を行い，バックリング現象について検証を行った。

表－2.4 試験の種類

試験番号	FRPシート 厚さ	ひび割れ幅	備考
No. 1	1.5mm	1mm	代表パターン
No. 2	1.5mm	5mm	
No. 3	1.5mm	3mm	
No. 4	1.5mm	0.6mm	
No. 5	1.0mm	1mm	
No. 6	2.0mm	1mm	
No. 7	4.5mm	1mm	1.5mm×3枚
No. 8	1.5mm	1mm	非接触部10mm
No. 9	1.5mm	1mm	非接触部80mm
No. 10	1.5mm	1mm	ひび割れ充填

### 2.4.2 代表的な条件でのバックリング現象

今回実施した試験の代表例として，表－2.4 の試験番号 No.1 に示す，光硬化型 FRP シートの厚さ 1.5mm，ひび割れ幅 1mm の結果を取り上げる。試験後のシートを写真－2.6 に示す。写真からも明らかなように，ひび割れの閉口時には，FRP シートがコンクリートからはく離し，ひび割れ箇所を中心に凸型に浮いており，バックリング現象が確認された。このとき，ひび割れ周辺の 50mm 程度までは，供試体のコンクリート母材が引張破壊しており，コンクリートがはく離した FRP シート側に付着していた。さらにその外側 30mm 程度までは，FRP シートとコンクリートの界面ではく離が生じていた。

閉口ひび割れ追従性試験における，計測ステップと荷重および変位計の計測結果を図－2.4 に，ひび割れ閉口変位と荷重の関係を図－2.5 に示す。荷重の初期段階（時間ステップが 0～90 程度）では，荷重増加に対し FRP シートの付着力によりひび割れ閉口変位（図中の赤線）が小さい値で推移しているが，荷重が 10.6kN（ひび割れ閉口変位が 0.18mm）に達した瞬間にバックリング現象が発生し，ひび割れ閉口変位やバックリング変位が大きく増加し，荷重が低下した。模擬ひび割れ幅は 1.0mm で設定したが，供試体作製精度や模擬ひび割れ面の凹凸の噛み合わせのため，バックリング時のひび割れ閉口変位は実際には 1.8mm まで計測された。FRP シートのバックリング時のシートの膨れは 7mm 程度であった。バックリング後，荷重は 4kN 前後で留まっており，時間ステップ 105 程度で除荷すると，荷重はゼロになり，ひび割れ閉口変位もゼロ付近まで戻った。除荷後のひび割れ閉口変位の戻りは，FRP シートが凸型に曲がった状態から平坦に戻ったためである。



写真-2.6 FRP シートのバックリング

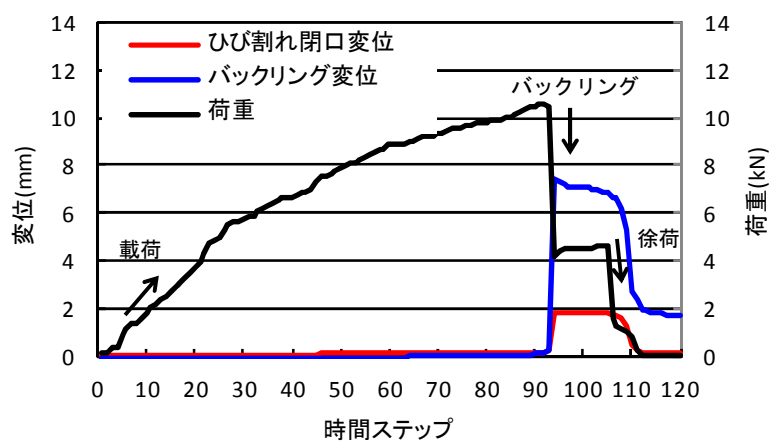


図-2.4 時間ステップによる変位，荷重

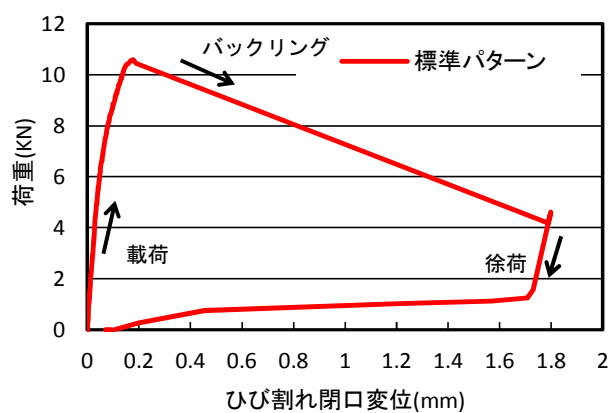


図-2.5 ひび割れ閉口変位と荷重の関係



この結果から、ひび割れを跨いで貼付された FRP シートに、ひび割れの閉口変位によりバックリング現象が生じることを確認できた。バックリング後の供試体写真と、FRP シート、コンクリートそれぞれの状況写真を写真-2.7 に示す。バックリング後の FRP シートは、ひび割れ周辺部ではコンクリート母材で破壊し、その外側はシートとコンクリートとの界面で破壊し、さらにその外側で付着している状態であった。このバックリング現象は、ひび割れ近傍のコンクリート母材の破壊を伴うため、FRP シートの付着力を高めることによるバックリング現象の抑制は困難であることがわかる。

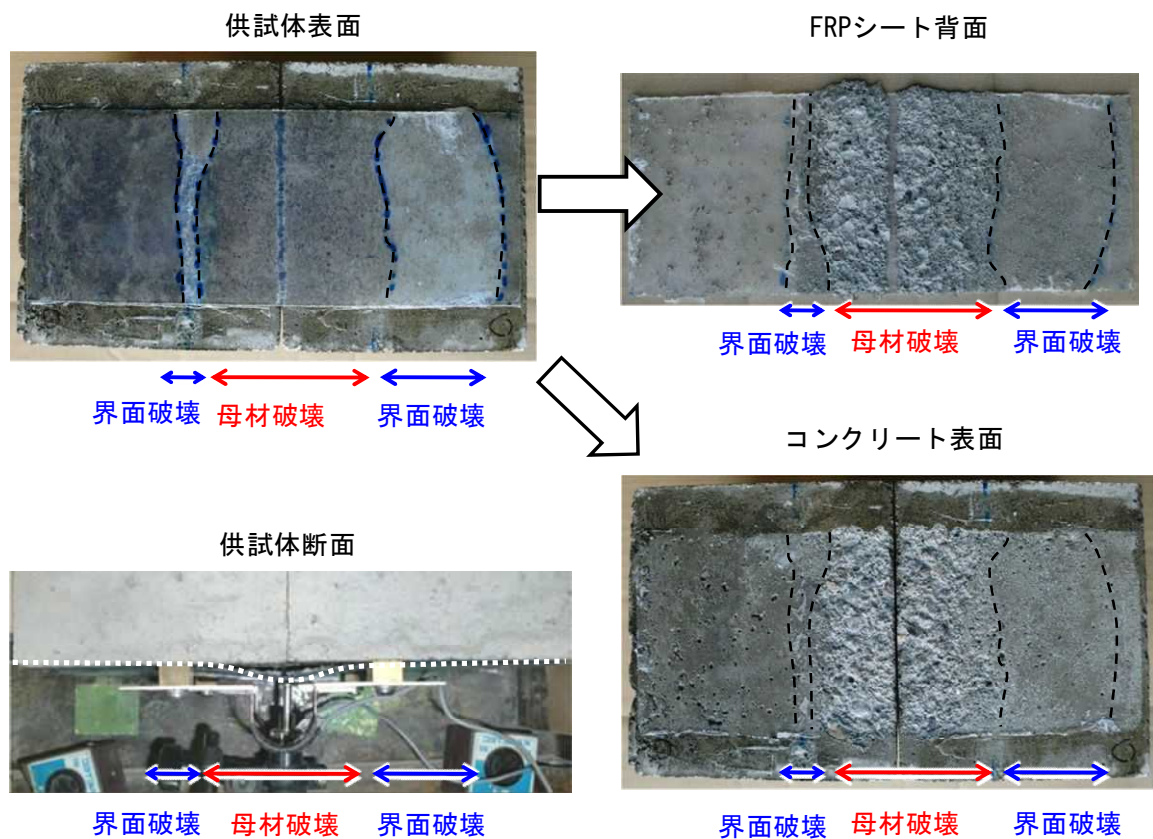
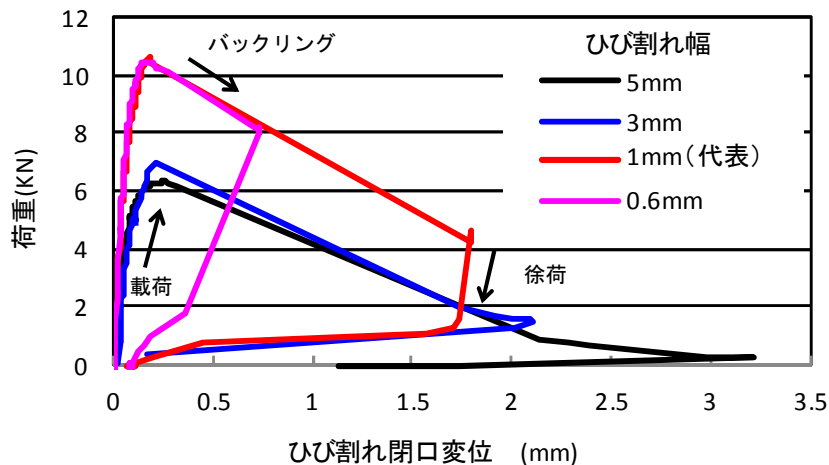


写真-2.7 母材破壊の状況

### 2.4.3 ひび割れ幅が異なる場合のバックリング現象

FRP シートの厚さを 1.5mm, ひび割れ幅を 0.6mm～5mm までの 4 種類として閉口ひび割れ追従性試験を実施した（表－2.4 中の試験番号 No.1～No.4）。試験結果を図－2.6 に示す。バックリング現象が開始した時のひび割れ閉口変位を表－2.5 に示す。いずれのひび割れ幅においても、ひび割れ閉口変位が 0.2mm 程度でバックリング現象が発生した。



図－2.6 ひび割れ幅によるひび割れ閉口変位と荷重の関係

表－2.5 バックリング開始時のひび割れ閉口変位と荷重の関係

ひび割れ幅(mm)	0.6	1.0	3.0	5.0
バックリング 開始変位(mm)	0.17	0.18	0.22	0.25

バックリング開始時の最大荷重は、ひび割れ幅が 3mm または 5mm の場合に比べ、ひび割れ幅が 0.6mm または 1mm の場合の方が高くなった。この荷重の大小には、ひび割れ周辺での FRP シートの付着力（プライマーや貼付補助材の塗布状況）が影響することもあると考えられる。

この試験を活用すると、閉口ひび割れ追従性試験から確認できるバックリング開始時のひび割れ閉口変位に対し、実構造物で計測されるひび割れの伸縮変位が小さい場合には、バックリング現象が発生しないと考えられ、補修時のひび割れ充填の要否の判断や、FRP シートの貼付時期の選定にも適用できると考えている。今回の試験によると、バックリング現象が発生するひび割れ閉口変位は約 0.2mm であったが、後述のように、FRP シートの特性や付着により変動する。さらには、対象構造物の形状やひび割れ形状、劣化状況により異なった数値となると考える。

#### 2.4.4 FRP シート厚さが異なる場合のバックリング現象

ひび割れ幅を 1mm, FRP シートの厚さを 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 4.5mm の 4 種類として閉口ひび割れ追従性試験を実施した(表-2.4 中の試験番号 No.1, No.5~No.7)。結果を図-2.7 に示す。FRP シート厚さが  $t=4.5\text{mm}$  の場合には, バックリング直後に  $\pi$  型変位計が外れたため, ひび割れ閉口変位の計測はバックリング時までである。4.5mm の FRP シートは, 1.5mm の FRP シートを 3 枚重ねて作製した。光硬化の関係上, 1 枚ごとに貼付・硬化を 3 回繰り返して作製した。グラフ中の線上の○印および数値は, 各データでのバックリング開始時のひび割れ閉口変位を示す。この結果から, 同一ひび割れ幅(1mm)の場合, FRP シートが厚くなると, バックリング開始時のひび割れ閉口変位が大きくなり, 閉口ひび割れに対する追従性が向上していることがわかる。FRP シートが厚くなると, バックリング開始時の荷重も大きくなっているが, 実構造物での現象を考えた場合, 温度変化などによりひび割れ幅が変動するため, 荷重の大小よりも, バックリング開始時のひび割れ閉口変位の大小の方が有用である。

閉口ひび割れ追従性試験後の供試体の写真を写真-2.8 に示す。FRP シート厚さは写真上から  $t=1.0\text{mm}$ ,  $t=1.5\text{mm}$ ,  $t=2.0\text{mm}$ ,  $t=4.5\text{mm}$  の順であり, 各写真の左下に厚さを示している。供試体中央部に模擬ひび割れがあり, バックリング現象に伴う母材破壊範囲(写真中黄色矢印), FRP シート界面破壊範囲(写真中緑色矢印)を示す。FRP シートが厚くなるほど, 母材破壊範囲が大きくなった。

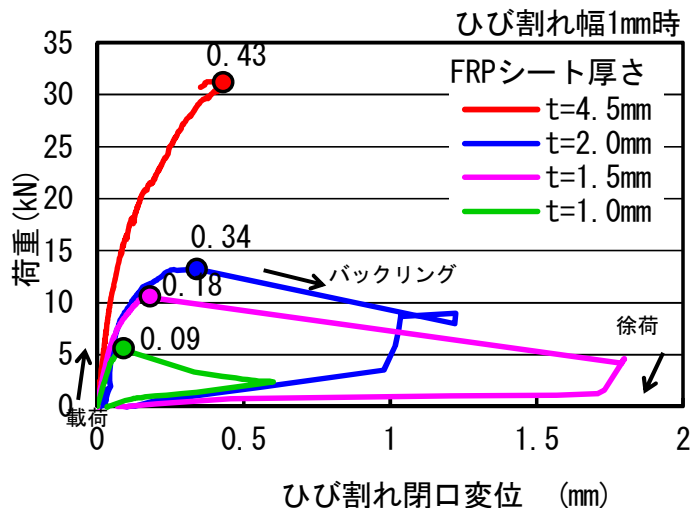


図-2.7 FRP シート厚さによるひび割れ閉口変位  
と荷重の関係変位と荷重の関係



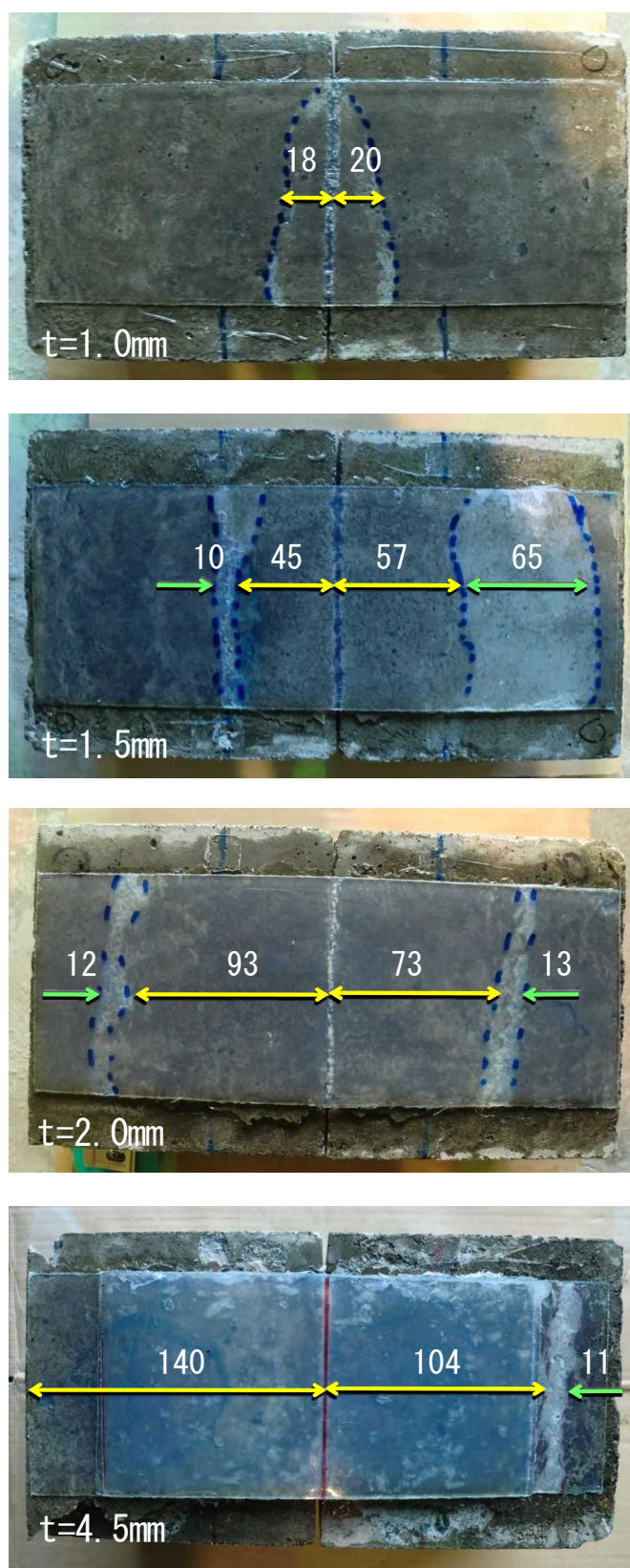


写真-2.8 バックリング後の供試体状況荷重の関係

## 2.4.5 FRP シートの付着状況が異なる場合のバックリング現象

バックリング現象は、ひび割れ周辺のコンクリートの母材破壊を伴って発生する現象であり、ひび割れ周辺の FRP シートとコンクリートの付着力が影響していると考えられる。このひび割れ周辺部の FRP シートの付着状況が異なった場合、バックリング現象も異なった発生状況となることが想像できる。そこで、ひび割れ幅を 1.0mm, FRP シート厚さ 1.5mm として、付着の無い範囲をパラメータとする試験を行った。FRP シートをコンクリートに貼付する際、フィルムを 1 枚挟むことで、その箇所が無付着域となる。この無付着域を、ひび割れ両側に 10mm, 80mm の 2 種類として試験を行った（表-2.4 中の試験番号 No.1, No.8～No.9）。無付着域が無く、ひび割れ部まで付着を確保した試験結果は、代表的な条件（試験番号 No.1）での結果であり、この No.1 の試験結果のバックリング時に発生したコンクリートの母材破壊範囲以上を無付着域としたものが No.9 に相当する。試験結果を図-2.8 に、試験後の供試体を写真-2.9 に示す。

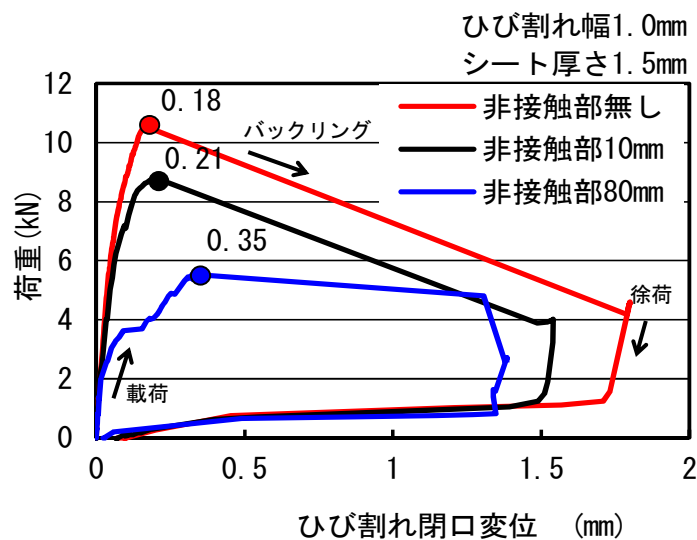


図-2.8 無付着域が異なる場合のバックリング現象

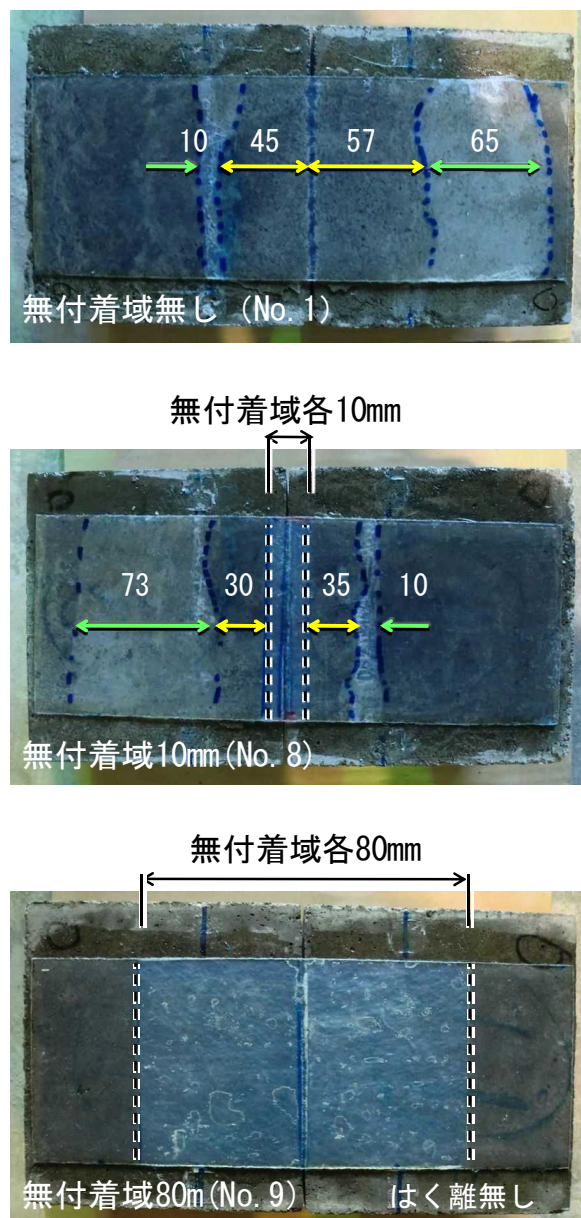


写真-2.9 バックリング後の供試体状況

ひび割れ周辺の付着力が無いパターンにおいてもバックリング現象が発生した。しかし、無付着域が大きいほど、荷重の低い段階でバックリング現象が発生するものの、バックリング開始時のひび割れ閉口変位が大きく、閉口ひび割れへの追従性は向上する傾向にあった。無付着域 10mm の供試体では、写真でも確認できるように、バックリングにより、FRP シートの無付着域の外側の付着箇所において、コンクリート母材破壊およびはく離が確認されたが、無付着域を 80mm とした供試体では、バックリング現象は無付着域のみで発生し、付着箇所の母材破壊やはく離は確認できなかった。無付着域無し（全て付着している No.1）では、母材破壊範囲が 60mm 程度であったため、この範囲以上に無付着域がある場合、母材破壊が発生しないバックリング現象となると考えられる。ただし、FRP シートで付着している箇所と付着が無い箇所の境界部は、はく離に対して弱部となるため、実用化には弱部とならないような対策を併せて実施する必要があると考える。

#### 2.4.6 ひび割れ充填された場合のひび割れ追従性試験

ひび割れ幅を 1.0mm, FRP シートの厚さを 1.5mm として, ひび割れに予めエポキシ樹脂を充填した供試体について閉口ひび割れ追従性試験を実施した。ひび割れ幅, FRP シート厚さが同一でひび割れへの充填をしていない供試体 (No.1) の試験結果と併せて図-2.9 に示す。また, 試験後の供試体写真を写真-2.10 に示す。供試体への载荷により, 荷重が上昇するが供試体 No.1 ではバックリング現象が 10kN 程度で発生したが, ひび割れを充填した供試体では, 50kN を超えてもバックリング現象が確認できなかったため, 試験を中止し除荷した。ひび割れ閉口変位については, No.1 供試体はひび割れ閉口変位が 0.18mm にてバックリング現象が発生したが, ひび割れが充填されている場合は, 荷重の増加に対して小さい変位に抑制されている。

この結果から, ひび割れ充填された場合は, 被覆している FRP シートのバックリング現象の発生するような変位とならないため, バックリング現象の発生自体が抑制できると考えられる。よって, バックリング現象の抑制として, ひび割れ充填が重要であることがわかる。

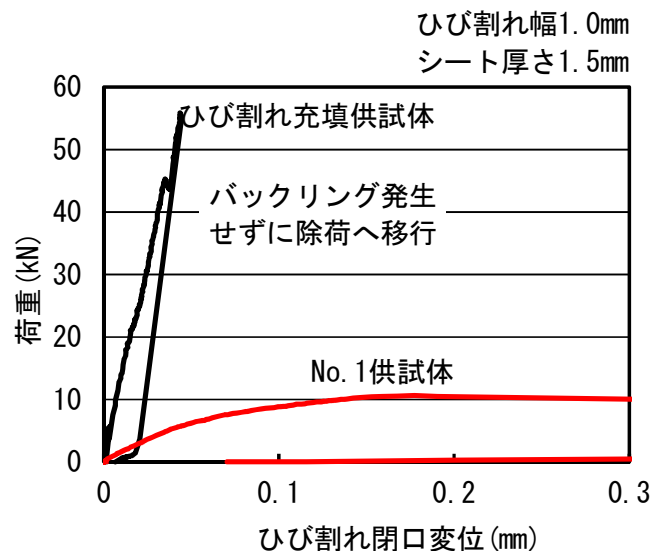


図-2.9 バックリング後の供試体状況



写真-2.10 試験後の供試体



## 2.4.7 全供試体の試験結果

全供試体のバックリング現象について、FRP シートのはく離範囲における母材破壊、界面破壊の距離を表-2.6 に示す。また、各供試体の試験後の FRP シートを写真-2.11 に示す。同じひび割れ幅 1.0mm で比較すると、シート厚さが 1.0mm, 1.5mm, 2.0mm, 4.5mm (それぞれ No.5, No.1, No.6, No.7) と厚くなるほど、バックリング現象により母材破壊する範囲が大きくなる傾向が確認できる。

表-2.6 全供試体のバックリング現象による FRP シートはく離状況

番号	シート厚さ	ひび割れ幅	供試体条件	剥離範囲				備考
				左側		右側		
				界面破壊	母材破壊	母材破壊	界面破壊	
No.1	1.5mm	1.0mm	—	10	45	57	65	
No.2	1.5mm	5.0mm	—	29	35	35	95	端部まで <u>界面</u> はく離
No.3	1.5mm	3.0mm	—	28	45	50	15	
No.4	1.5mm	0.6mm	—	15	40	52	18	
No.5	1.0mm	1.0mm	—	0	18	20	0	
No.6	2.0mm	1.0mm	—	12	93	73	13	
No.7	4.5mm	1.0mm	1.6mm×3枚=4.5mm	15	104	140	—	端部まで <u>母材</u> はく離
No.8	1.5mm	1.0mm	非接触左右各10mm	73	30	35	10	
No.9	1.5mm	1.0mm	非接触左右各80mm	0	80	80	0	はく離無し
No.10	1.5mm	1.0mm	ひび割れ充填	—	—	—	—	バックリング無し

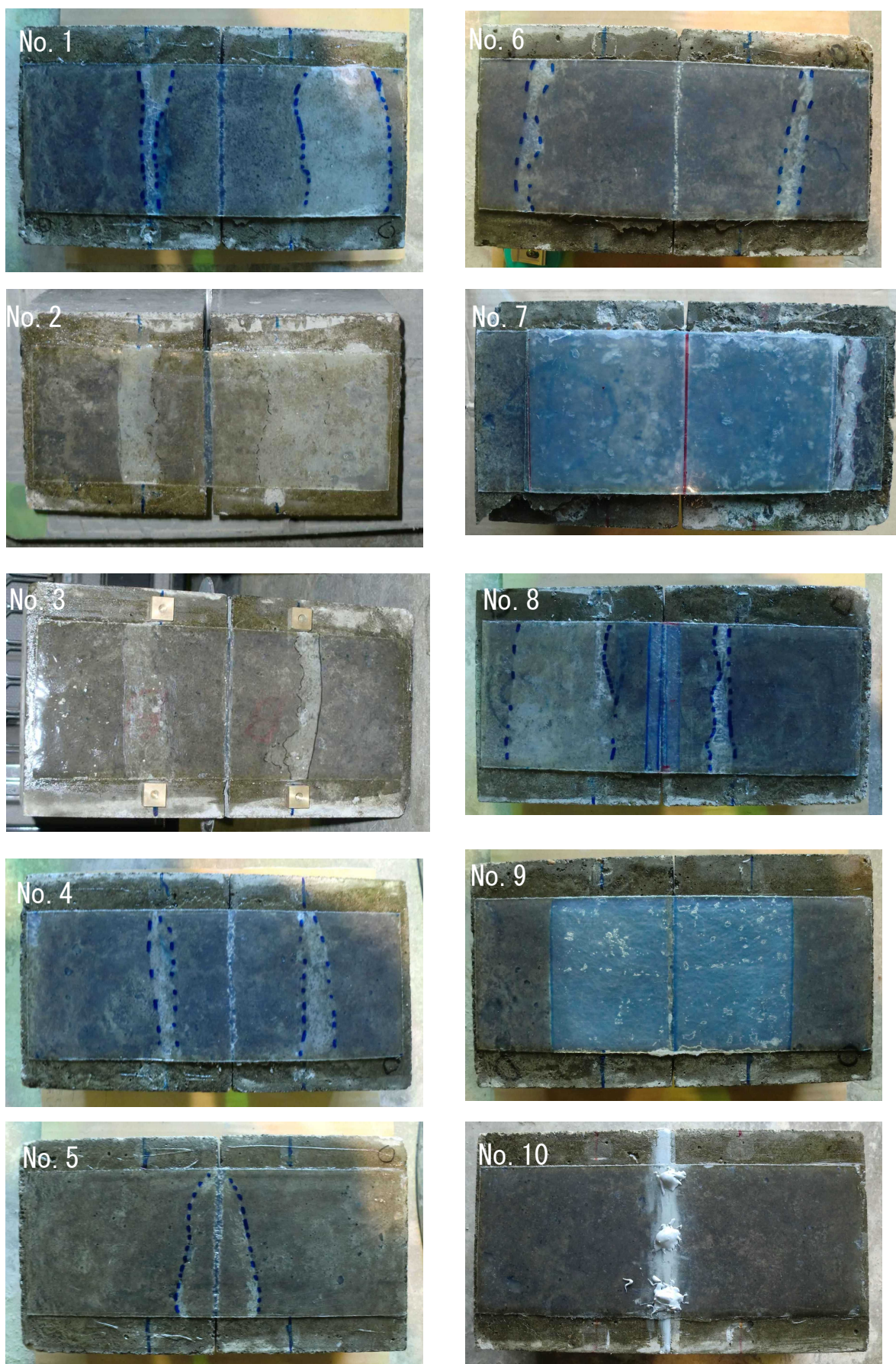


写真-2.11 全供試体の試験後のシートはく離状況

#### 2.4.8 実現象との対応

今回提案する試験方法により、ひび割れ幅が異なる場合や、FRP シート厚さが異なる場合、ひび割れ周辺の付着が無い場合について、ひび割れ閉口変位によりバックリング現象が発生することを表現できた。実構造物においては、ひび割れの形状が直線ではなく、ひび割れ幅も同一ひび割れ内で大小様々に変化していることから、今回の試験による数値そのものを適用することはできないが、バックリング現象の発生の可能性の評価について、本研究で提案する試験方法は有効であると考えている。

#### 2.5 まとめ

閉口するひび割れへの FRP シートの追従性やバックリング現象を評価するための試験方法を提案した。中空塩化ビニル管を中心に配置したコンクリート供試体を 2 つに切断して、切断面を模擬ひび割れとした。2 つの供試体に模擬ひび割れを跨いで FRP シートを貼付し、ひび割れが閉口する方向に軸力を供試体に加え、FRP シートに圧縮力を作用させた。中空塩化ビニル管内に芯材を入れて、圧縮力下での 2 つの供試体の横ずれを防いだ。幅 0.6mm から 5mm 程度のひび割れを対象として、FRP シートの閉口ひび割れ追従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) FRP シートの厚さを 1.5mm とし、ひび割れ幅をパラメータとして変化させた時のバックリング現象は、ひび割れ幅の違いによらず、ほぼ同一なひび割れ閉口変位（今回の試験条件では 0.2mm 程度）で発生することを確認できた。
- (2) FRP シートの厚さを 1.0mm から 4.5mm まで変化させたとき、FRP シートが厚い方が、バックリング現象発生時のひび割れ閉口変位が大きくなり、閉口ひび割れへの FRP シートの追従性が向上することがわかった。
- (3) ひび割れ近傍の FRP シートの付着を無くすることで、閉口ひび割れへの FRP シートの追従性が向上することが分かった。80mm の無付着域を設けることで、バックリング現象は発生するものの、シートのはく離が発生しないことがわかった。
- (4) ひび割れが充填されていた場合、ひび割れ閉口変位が充填材により抑制されるため、バックリング現象が発生しないことが確認できた。バックリング現象の抑制には、ひび割れ充填が効果的であることがわかった。

【参考文献】

- 1) 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
- 2) 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，高速道路総合研究所，2012.7
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 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，2000.3
- 6) 公益社団法人コンクリート工学会：コンクリート診断技術'15〔基礎編〕，2012.2
- 7) 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
- 8) 斎藤寛之，地下鉄トンネル内温度の予測と検証，第 266 回鉄道総研月例発表会，pp.1-2，2013.4



## 第 3 章 光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究

### 3.1 はじめに

コンクリートのせん断補強として、アラミド繊維シートや炭素繊維シート、ガラス繊維シートなどの連続繊維シートを用いた工法<sup>1),2)</sup>があり、設計施工指針が整備<sup>3),4),5)</sup>され、耐震補強工法などで実用化されている。

今回着目する光硬化型 FRP シートは、長さ 50mm の短繊維ガラスを用いた FRP シートであり、連続繊維シートのように、ある特定の方向に強度が卓越する、いわゆる異方性材料と異なり、どの方向にも同じ引張強度を発揮する疑似等方性材料である。そのため、シートを貼付する方向についても、荷重の作用方向と無関係に自由な方向を選定することができる。しかし、この短繊維ガラスによる光硬化型 FRP シートを用いたせん断補強について、異方性のある連続繊維との性質の違いや強度評価式の適用性について、ほとんど研究が行われていない。

本研究では、短繊維ガラスによる光硬化型 FRP シートに着目し、RC 梁に貼付された際、等方性材料としてのせん断耐力が、連続繊維シートのせん断耐力と同様に取り扱いできるか検証する。さらに、等方性材料を異方性を持たせて貼付したとき、せん断補強効果への影響を検討することを目的とする。

### 3.2 光硬化型 FRP シートによる梁のせん断試験

#### 3.2.1 光硬化型 FRP シートの性質

今回使用する光硬化型 FRP シートは、繊維長さ 50mm の短繊維ガラスをランダム配向によりマット状に加工し、光硬化の性質を有するエポキシアクリレート樹脂を含浸させた FRP シートである。マット状への加工は、JIS 規格「JIS R 3411 ガラスチョップドストランドマット」により定められている。

このため、短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートは、連続繊維シートのような特定方向に強度が卓越する異方性を有した材料と異なり、どの方向への引張りに対しても等しい強度特性を有する疑似等方性材料である。今回使用する光硬化型 FRP シートの物性値<sup>7)</sup>を表-3.1 に示す。

表-3.1 光硬化型 FRP シートの物性値

項目	物性値
ガラス繊維量	450 g/m <sup>2</sup>
シート厚さ	1.2 mm
引張強度	80 N/mm <sup>2</sup> 以上
引張弾性係数	6.0 × 10 <sup>3</sup> N/mm <sup>2</sup> 以上

### 3.2.2 光硬化型 FRP シートのせん断補強効果について

炭素繊維やアラミド繊維などの連続繊維シートは、補強工法に関する指針類<sup>3),4),5),6)</sup>が整備され、実用化されている。これには連続繊維を用いたガラス繊維シートも含まれる。短繊維を用いた光硬化型 FRP シートについて、基本的には連続繊維シートと同様の扱いができると考えられるが、等方性材料のため、異方性材料である連続繊維シートと必ずしも同一の特性を有するとは言えず、また検証もほとんどされていない。

光硬化型 FRP シートは、幅 50cm～100cm のロール状で製作されるため、構造物には、通常シートを 5cm 程度ラップさせながら面的に貼付する。ここで、光硬化型の性質のため、ラップさせるためには下側のシートを貼付し、一度光硬化の過程を経た後、上側シートを重ねる必要がある。また、厚さが 1～2mm 程度あるため、炭素繊維シートやアラミド繊維シートの厚さ 0.2～0.3mm に対して厚く、ラップ部分はさらに厚さが増す。そこで、ラップさせずに突き合わせで貼付できれば、材料費も含めメリットが多い。しかし、FRP シート単体では等方性であるが、ラップさせない貼付では面的に異方性となる。

本論文では、この等方性の FRP シートが、異方性の連続繊維シートに準拠したせん断補強効果が期待できるか検証する。また、等方性材料が一方向を切断し異方性を持って貼付された時のせん断補強効果について、実験によりせん断補強効果を検証する。

シート補強された梁のせん断耐力は、「コンクリートライブラリー101 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：社団法人土木学会」<sup>4)</sup>によると、以下の式(3.1)に示す通り、コンクリートが分担するせん断耐力、鉄筋が分担するせん断耐力、およびシートが分担するせん断耐力の和で表される。

$$V_{fyd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{fd} \quad (3.1)$$

$V_{fyd}$  : 梁のせん断耐力

$V_{cd}$  : コンクリートが分担するせん断耐力

$V_{sd}$  : 鉄筋が分担するせん断耐力

$V_{fd}$  : シートが分担するせん断耐力

シートが分担するせん断耐力  $V_{fd}$  は、式(3.2)により算出される（部材係数は試験のため 1.0 とする）。

$$V_{fd} = K \cdot [A_f \cdot f_{fud} (\sin \alpha_f + \cos \alpha_f) / s_f] \cdot z / \gamma_b \quad (3.2)$$

$$K = 1.68 - 0.67R \quad 0.4 \leq K \leq 0.8$$

$$R = (\rho_f \cdot E_f)^{1/4} \left( \frac{f_{fud}}{E_f} \right)^{2/3} \left( \frac{1}{f'_{cd}} \right)^{1/3}$$

$$\rho_f = A_f / (b_w \cdot s_f) \quad 0.5 \leq R \leq 2.0$$

$A_f$  : 区間  $s_f$  の連続繊維シートの総面積(mm<sup>2</sup>)

- $s_f$  : 連続繊維シートの配置間隔(mm)  
 $f_{fid}$  : 連続繊維シートの引張強度 (N/mm<sup>2</sup>)  
 $E_f$  : 連続繊維シートの弾性係数(kN/mm<sup>2</sup>)  
 $\alpha_f$  : 連続繊維シートが部材軸となす角度  
 $\gamma_b$  : 部材係数

式(3.2)は、引張強度や弾性係数は使用材料により決まるため、シートが部材軸となす角度  $\alpha_f$  が 45 度で最大値となる関数となる。なす角度  $\alpha_f$  とせん断耐力の関係をグラフ化したものを図-3.1 に示す。図からも分かるように、シートが部材軸となす角は、45 度が最大となり、135 度でゼロとなる。これは、せん断ひび割れが斜め 45 度で発生し、このせん断ひび割れに直行する方向にシートを貼付した場合、せん断耐力が最大値となり、せん断ひび割れを平行にシートを貼付した場合、せん断耐力がゼロになることを意味し、計算式には、せん断ひび割れが斜め 45 度で発生する仮定を含んでいる。

等方性の FRP シートは、シートが部材軸となす角  $\alpha_f$  に関係せず、どの方向に対しても一定のせん断耐力となるため、計算式におけるせん断耐力が最大値となる 45 度のせん断耐力値を採用できると考えられる。なお、図中の青線は FRP シートを全面に貼付した場合、赤線は 50% の範囲に貼付した場合の数値を示している。

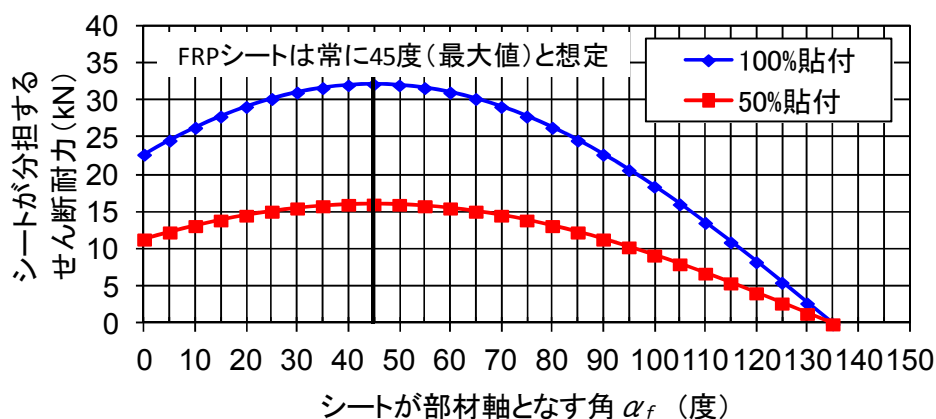


図-3.1 なす角度  $\alpha_f$  とせん断耐力の関係

### 3.3 光硬化型 FRP シートを用いた RC 梁モデルの室内試験

#### 3.3.1 RC 梁モデルの試験概要

FRP シートのせん断耐力を確認するため、既往のせん断試験<sup>8)</sup>を参考に、図-3.2 に示すような 2 点集中荷重による RC 梁のせん断試験を行った。

供試体寸法は、高さ 200mm、幅 100mm、長さ 1800mm とし、支点間隔 1200mm、荷重点間隔 200mm、せん断スパン長 500mm とした。引張側には、引張鉄筋として D19 を 2 本配置し、圧縮側には D13 を 2 本配置した。せん断スパンのうち左側スパンには、全供試体共通でせん断補強筋としてスターラップを 6 本 (D6@100mm) 配置した。右側スパンは、スターラップ等の鉄筋によるせん断補強筋は配置せず、試験用スパンとし、FRP シート等によるせん断補強を行うことで、シート材料のせん断特性の試験を行った。なお、FRP シートと支点・荷重点との接触を避けるため、シート設置長さをせん断スパン長より短い 450mm としている。

試験状況を写真-3.1 に示す。供試体に用いたコンクリートの配合を表-3.2 に、使用材料の強度物性等を表-3.3 に、試験の種類を表-3.4 に示す。

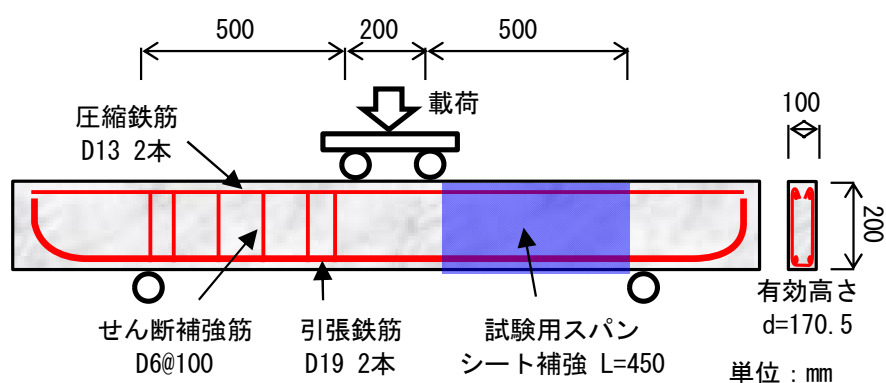


図-3.2 梁のせん断試験概要図

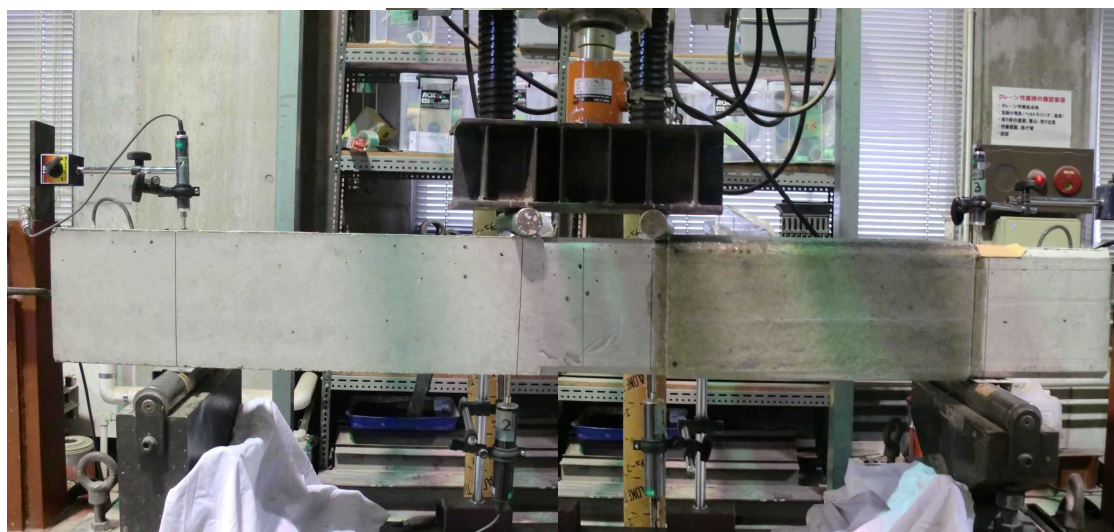


写真-3.1 梁のせん断試験状況

表－3.2 供試体に用いたコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	減水剤 A
45.1	41.4	166	368	731	1034	1.027

表－3.3 供試体の強度物性等

部位	項目			数値	単位
コンクリート	一軸圧縮強度			46.3	N/mm <sup>2</sup>
鉄筋	引張鉄筋	SD345 D19	降伏強度	396	N/mm <sup>2</sup>
			引張強度	574	N/mm <sup>2</sup>
	圧縮鉄筋	SD345 D13	降伏強度	380	N/mm <sup>2</sup>
			引張強度	539	N/mm <sup>2</sup>
	スターラップ	SWM-R D6	降伏強度	481	N/mm <sup>2</sup>
			引張強度	600	N/mm <sup>2</sup>
梁部材	せん断スパン比			2.93	－
	引張鉄筋比			0.034	－

表－3.4 試験種類

試験 No.	左側スパン		右側スパン			備考	
	補強材料	補強内容	補強材料	補強内容	貼付角度		
No. 1	鉄筋	D6@100	無し	—	—	—	
No. 2			鉄筋	D6@100	—	—	
No. 3			FRP	100% 貼付	無し	等方性	
No. 4			FRP		45度		
No. 5					90度		
No. 6					135度		
No. 7			FRP	50% 貼付	0度		異方性
No. 8					45度		
No. 9					90度		
No. 10					135度		

No.1 は、せん断補強しない供試体であり、No.2 は、スターラップにより補強した供試体である。No.3 は、FRP シートを全面貼付し、紫外線により硬化させた。No.4～6 は、図－3.3 に示すように、カッターナイフにより 5cm 間隔で表－3.4 中の貼付角度欄に示す角度で FRP シートをカ

ッティングした。その後、紫外線を照射し硬化させることで、FRP シートに所定の異方性を持たせた。No.7～10 は、No.4～6 と同様に、表-3.4 に示す貼付角度でシートを切断した後、シートの一部を間引くように除去した。その後、紫外線により硬化させることで、貼付面積を 50%とし、かつ異方性を持たせた供試体とした。カッティングによる FRP シートの割付けを図-3.4 に示す。

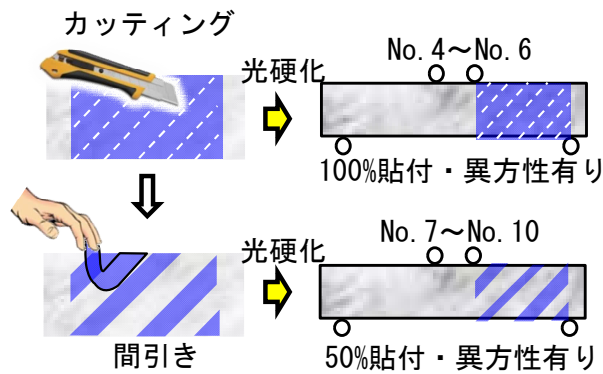


図-3.3 角度付きシート作成概要

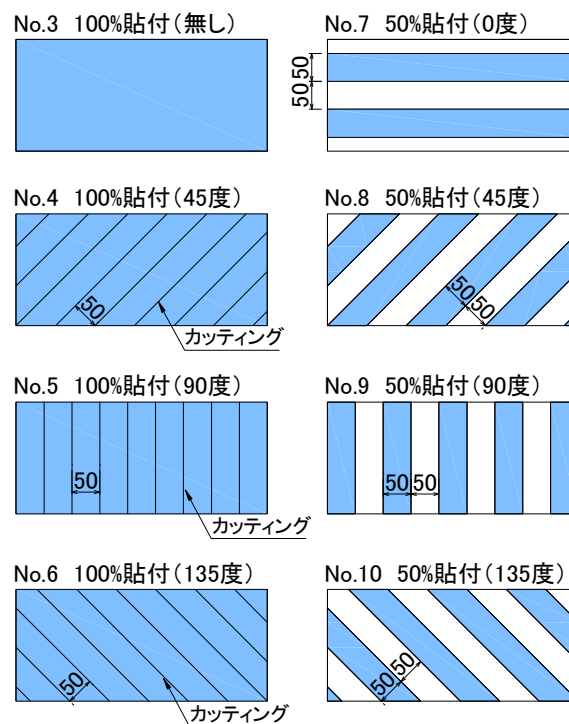


図-3.4 カッティングによる FRP シート割付け図

## 3.3.2 等方性を有した貼付によるせん断耐力

前述の表-3.4 における No.1~3 について、式(3.1)によるせん断耐力と試験結果を表-3.5 に示す。No.3 が等方性の供試体である。試験時の変位とせん断力の関係を図-3.5 に、各供試体の試験時の状況を写真-3.2~写真-3.4 に示す。

No.1 の補強の無い梁については、コンクリートのみのせん断耐力であり、計算式とほぼ近似した 26.7 kN でせん断破壊した。これにより、本試験におけるコンクリートのせん断耐力は、計算式とほぼ同一とみなすことができ、以後の試験では、全せん断力から計算式によるコンクリートの分担せん断力を差し引くことで、せん断補強鉄筋または FRP シートが分担するせん断力として評価した。No.2 では、梁の曲げ破壊が確認（曲げ耐力 66.9kN, 実験結果 69.5kN）でき、No.3 以降の試験荷重の範囲では、せん断スパン左側のスターラップは、せん断補強が有効な範囲であることが確認できた。

表-3.5 FRP シート（等方性）の試験結果

試験 番号	計算式によるせん断耐力				試験結果
	コンクリート	鉄筋	FRPシート	合計	
No.1	26.5	0.0	0.0	26.5	26.7
No.2	26.5	45.5	0.0	72.0 ※	69.5
No.3	26.5	0.0	32.2	58.7	66.3

単位：kN

※66.9kNで曲げ破壊が先行

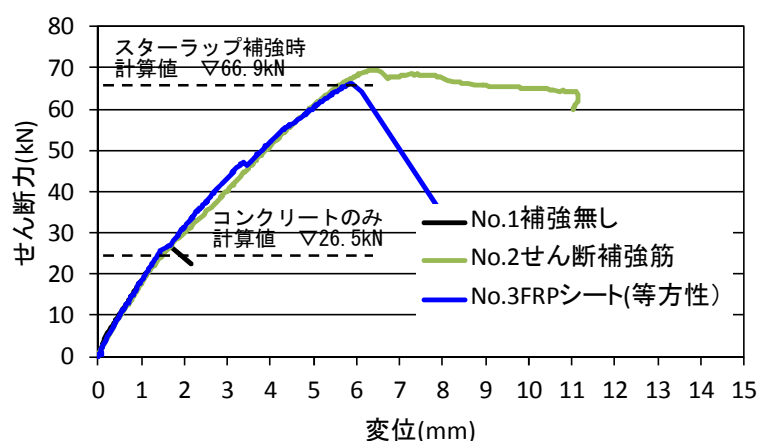


図-3.5 FRP シート（等方性）における変位-せん断力の関係



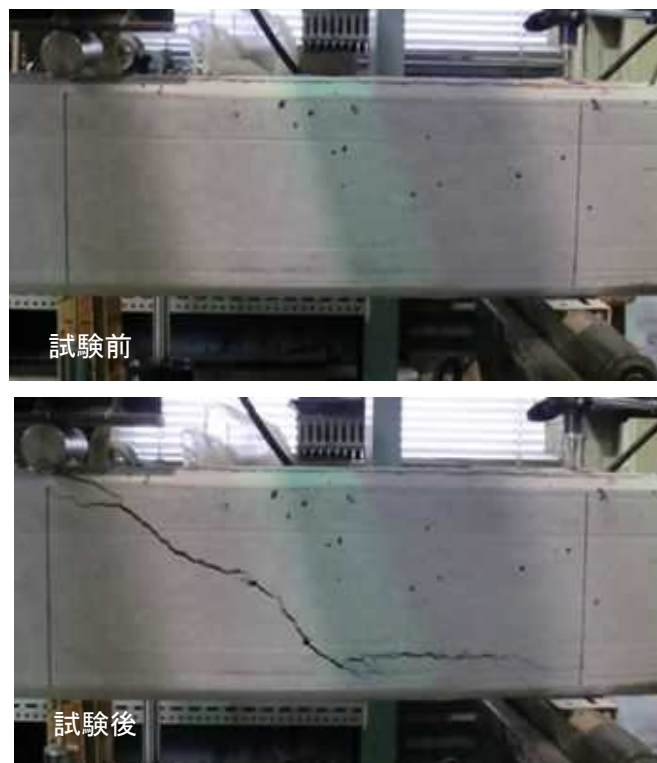


写真-3.2 No. 1 (せん断補強無し) せん断試験状況

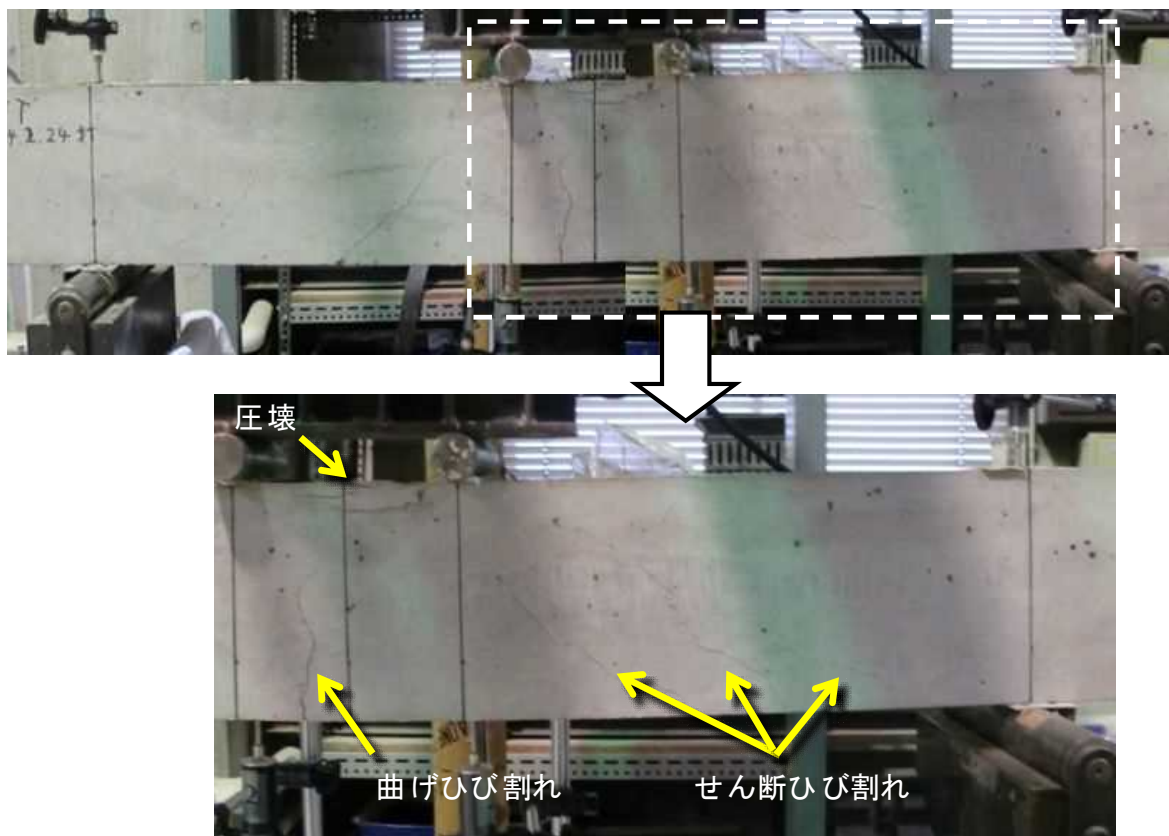


写真-3.3 No. 2 (せん断補強) 曲げ破壊状況



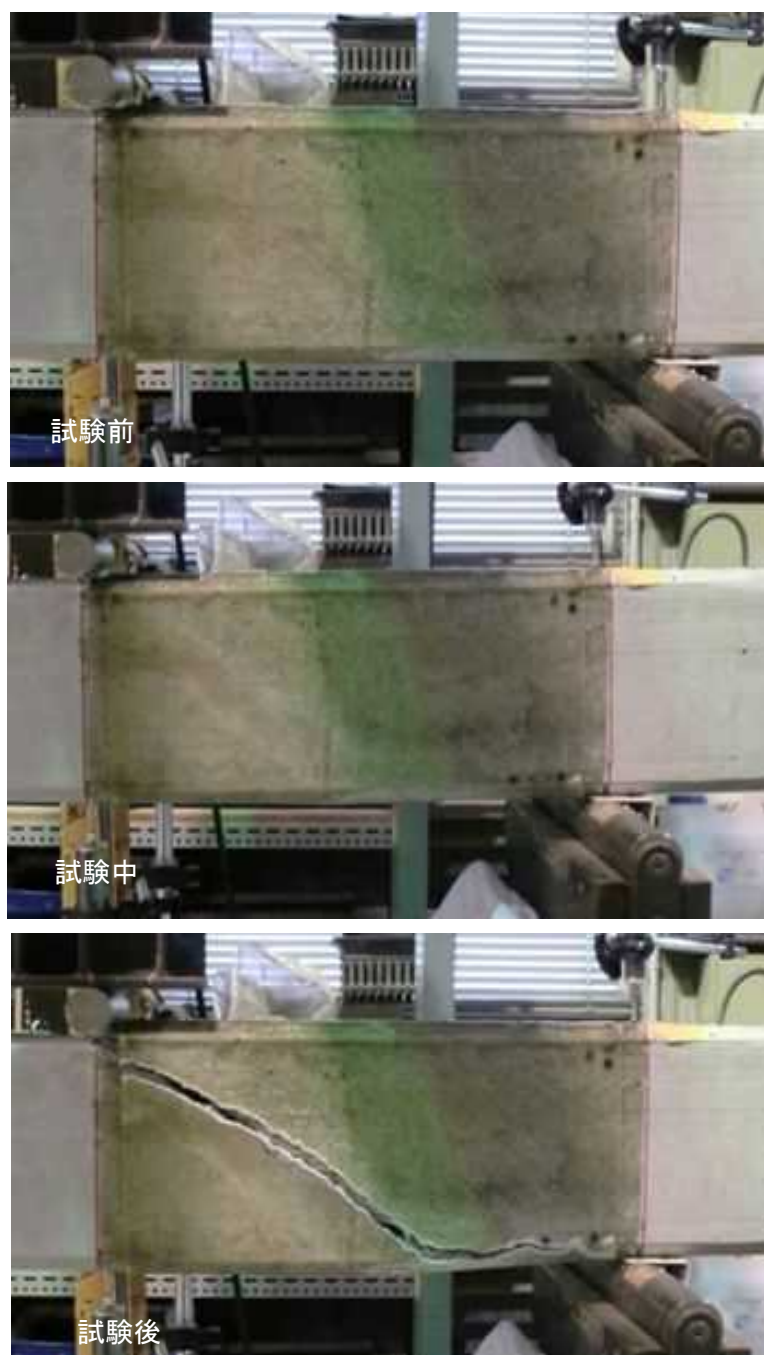


写真-3.4 No. 3（等方性 FRP シート） せん断破壊状況

No.3 については，FRP シートが等方性を有した供試体であり，FRP シートによりせん断耐力の向上が確認できた。試験時の供試体の状況は，荷重を載荷し，コンクリートにせん断ひび割れが発生した際に，ひび割れ周辺の FRP シートがコンクリート面からやや剥離した。その後 FRP シートの内側のコンクリート部分でひび割れが進展するが，そのひび割れの進展を FRP シートが抑制するように耐えているような状況となり，FRP シートの引張強度以上の荷重が作用した時に破断した。このとき，シートが部材軸となす角度  $\alpha_f$  を 45 度として算出した計算値 58.7 kN に対し，66.3kN とやや上回る結果となった。このため，短繊維ガラスによる光硬化型 FRP シートを等方に貼付した場合，計算式において  $\alpha_f=45$  度として算出することで，安全側に推定されることが分かった。

## 3.3.3 異方性を有した貼付（100%貼付）によるせん断耐力

前述の表-3.4におけるNo.4～6について、梁に貼付したFRPシートに異方性を持たせるため、FRPシートをカッターナイフにより切断して作製した供試体における試験結果を表-3.6に示す。試験時の変位とせん断力の関係を図-3.6に、各供試体の試験後の状況を写真-3.5～写真-3.7に示す。写真中の数字は、FRPシートが破断する順番を示しており、黄数字はFRPシート破断直後に梁が破壊したことを示す（No.4のみは全順序の記録無し）。

表-3.6の計算式によるせん断耐力では、カッティングした方向をシートが部材軸となす角度 $\alpha_f$ として算出した値であり、なす角度 $\alpha_f=45$ 度はカッティングしない等方性を有する状態のFRPシート（No.3）と同じせん断耐力の計算値となる。また、なす角度 $\alpha_f=135$ 度では、せん断ひび割れと同一方向にカッティングすることとなるため、計算上のFRPシートのせん断耐力はゼロとなる。

No.4の試験結果から、 $\alpha_f=45$ 度の時は計算式におけるせん断耐力をやや上回る結果となった。このため、等方性であるNo.3と同様に、計算式により算出されるせん断耐力が期待できると言える。このことから、例えばせん断方向が特定されている構造物を補強する際、その方向と直角方向にFRPシートの突き合わせによる継ぎ目があっても、等方性に貼付した時と同等のせん断耐力の向上が見込めると言うことができる。

表-3.6 FRPシート（異方性100%貼付）の試験結果

試験 番号	貼付内容		計算式によるせん断耐力			試験結果 kN
	範囲	角度	コンクリート kN	FRPシート kN	合計 kN	
No. 4	100%	45度	26.5	32.2	58.7	63.1
No. 5		90度		22.8	49.2	55.9
No. 6		135度		0.0	26.5	55.4

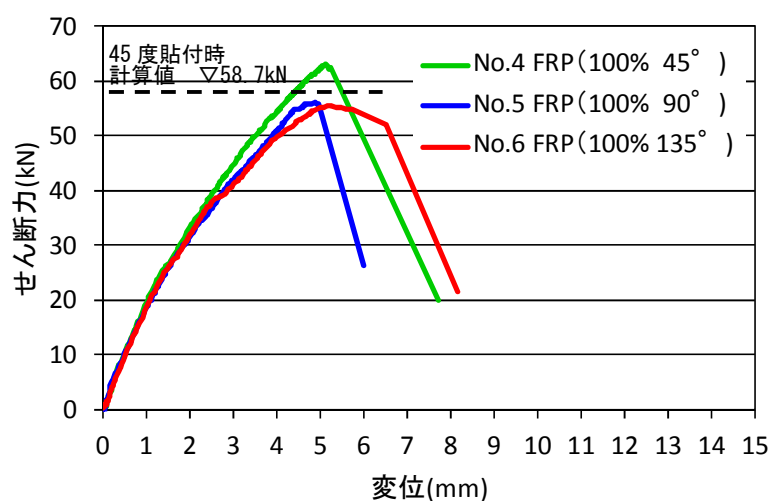


図-3.6 異方性を持たせたFRPシートの変位-せん断力の関係

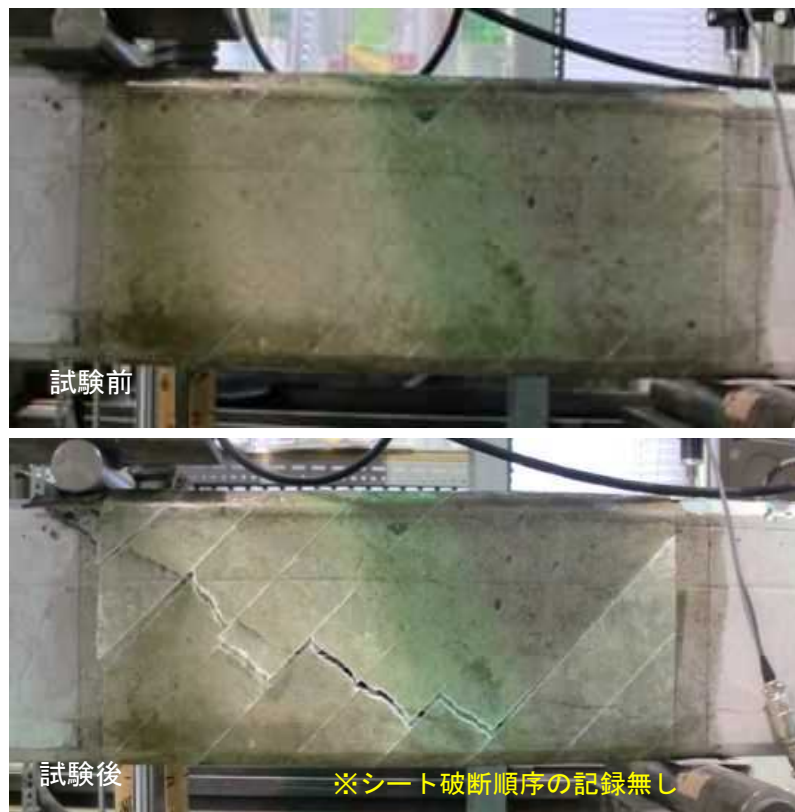


写真-3.5 No. 4 (100% 45 度) せん断破壊状況

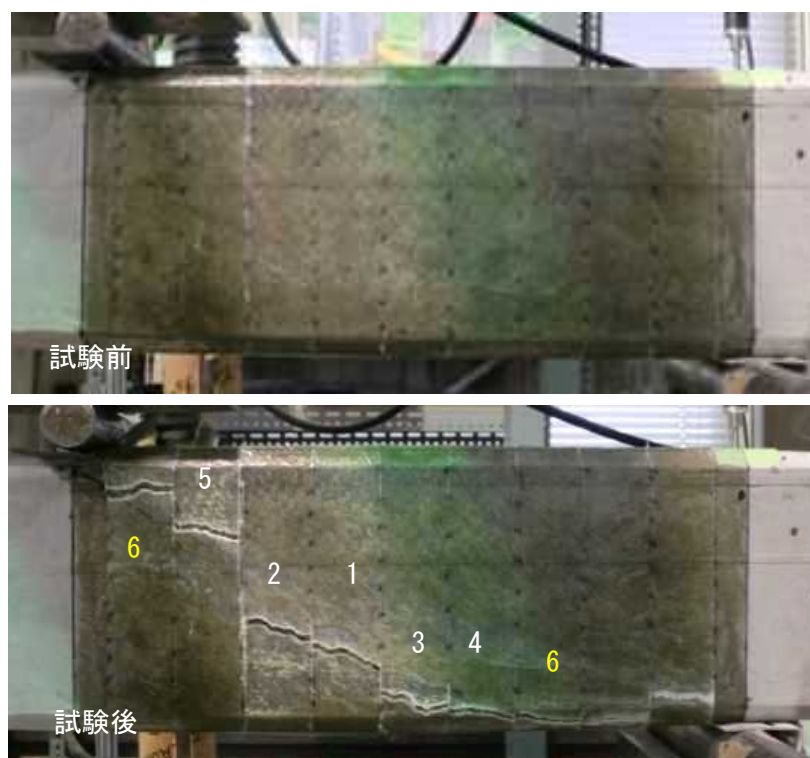


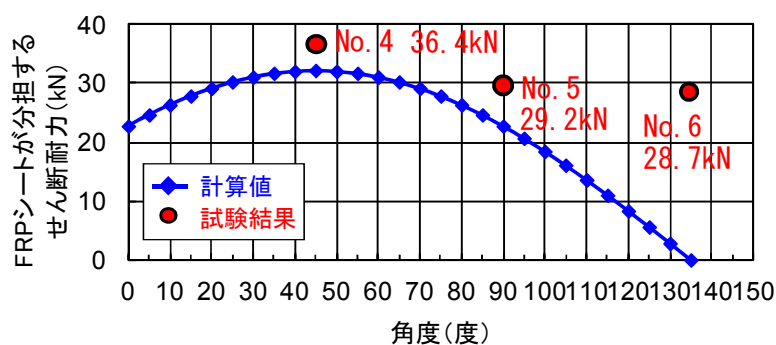
写真-3.6 No. 5 (100% 90 度) せん断破壊状況



写真-3.7 No. 6 (100%135 度) せん断破壊状況

なす角度  $\alpha_f$  と FRP シートが分担するせん断耐力の関係と試験結果を図-3.7 に示す。なお、コンクリートの分断するせん断耐力は、各試験とも式 (3.1) により算出される値を適用している。

なす角度  $\alpha_f$  が全ての種類において計算式による結果を上回り、特に 135 度では大幅に上回るせん断耐力となった。これは、実際のひび割れは 135 度の単一方向のみでなく、載荷点近傍では 135 度に近い角度のひび割れ、支点近傍では水平ひび割れ、またその中間位置では徐々に 135 度に近い角度から水平へ移行している。FRP シートはそれらのひび割れを跨いで貼付されており、なす角度  $\alpha_f=135$  度であっても、FRP シートのせん断耐力はゼロではなく、補強効果（今回の試験では 28.7kN）があると言える。このため、部材軸となす角度  $\alpha_f$  より算出するせん断耐力以上の耐力が期待できる。

図-3.7 なす角度  $\alpha_f$  とせん断耐力の関係

## 3.3.4 異方性を有した貼付（50%貼付）によるせん断耐力

前述の表-3.4 における No.7~10 について、3.3.3 節と同様に、梁に貼付した FRP シートに異方性を持たせ、さらに貼付面積を半分(50%)とした試験を実施した。式(3.2)による FRP シートが分担せん断耐力および試験結果を表-3.7 に示す。また、試験時の変位とせん断力の関係を図-3.8 に、各供試体の試験後の状況を写真-3.8~写真-3.11 に示す。

計算式によるせん断耐力は、FRP シートが部材軸となす角度  $\alpha_f=45$  度の時に最大値となり、その値は貼付面積 100%の時の 2 分の 1 となる。また、 $\alpha_f=135$  度では、FRP シートが負担するせん断耐力はゼロとなる。

表-3.7 FRP シート（異方性 50%貼付）の試験結果

試験 番号	貼付内容		計算式によるせん断耐力			試験結果 kN
	範囲	角度	コンクリート kN	FRPシート kN	合計 kN	
No. 7	50%	0度	26.5	11.4	37.9	31.2
No. 8		45度		16.1	42.6	38.1
No. 9		90度		11.4	37.9	45.5
No. 10		135度		0.0	25.5	61.4

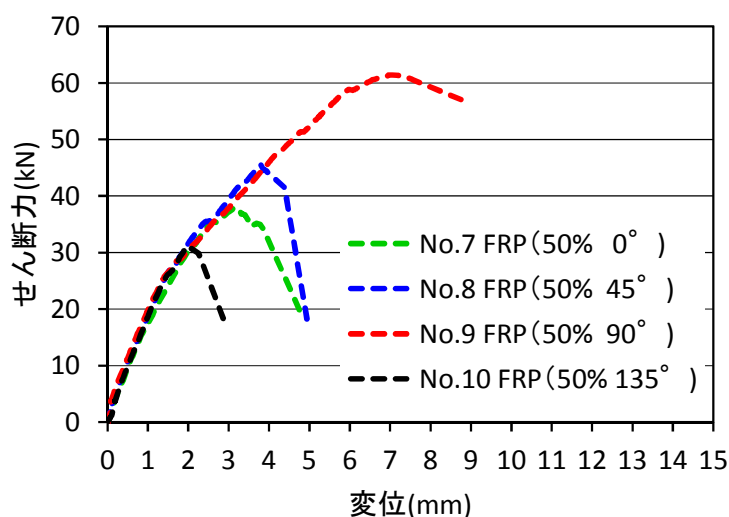


図-3.8 異方性を持たせた FRP シートの変位-せん断力の関係



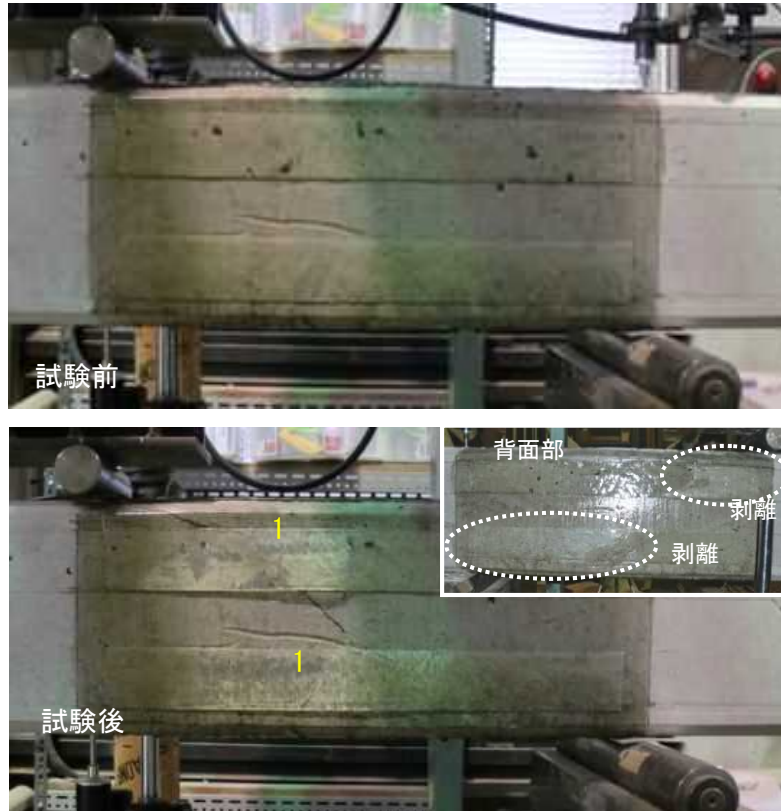


写真-3.8 No. 7 (50% 0 度) せん断破壊状況

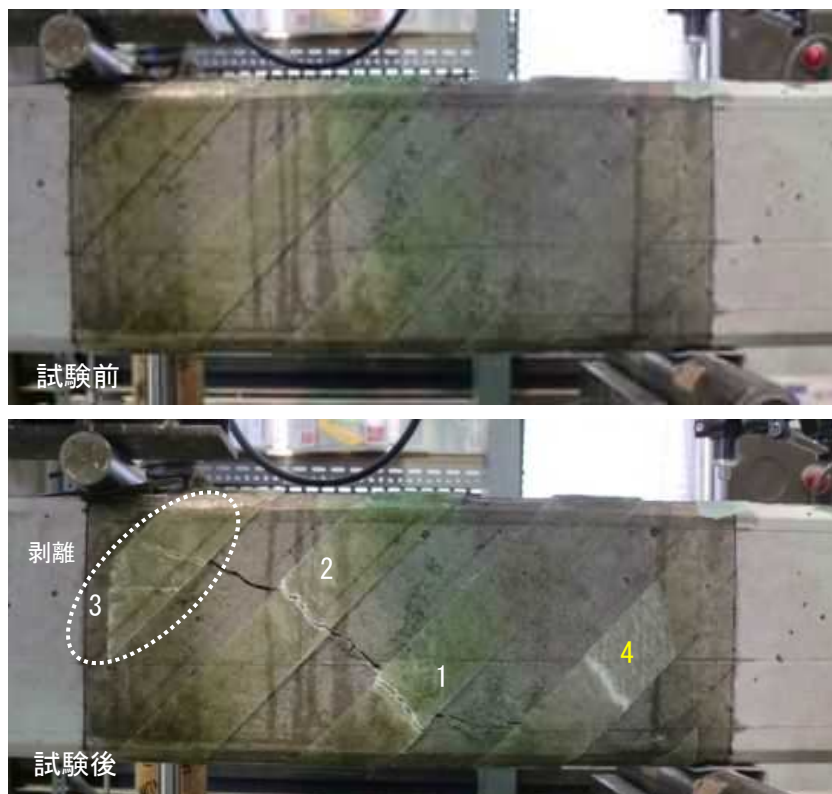


写真-3.9 No. 8 (50% 45 度) せん断破壊状況



写真-3.10 No. 9 (50% 90 度) せん断破壊状況

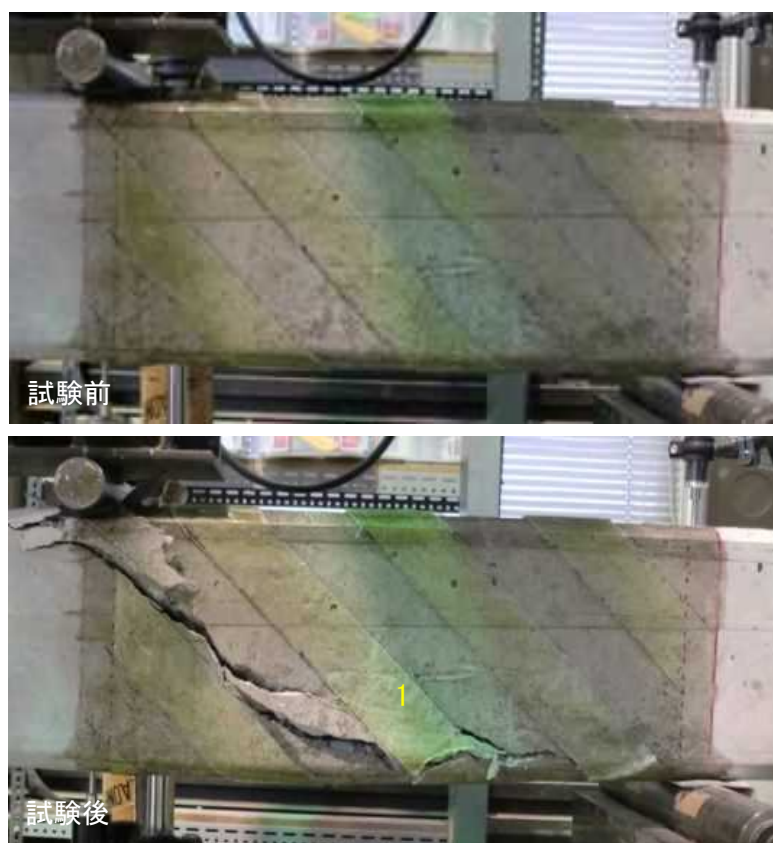


写真-3.11 No. 10 (50% 135 度) せん断破壊状況

なす角度  $\alpha_f$  と FRP シートが分担するせん断耐力の関係と試験結果を図-3.9 に示す。なお、コンクリートのせん断するせん断耐力は、各試験とも式 (3.1) により算出される値を適用している。図-3.9 から分かるように、なす角度  $\alpha_f = 0$  度および 45 度の時、計算式によるせん断耐力を下回る値でせん断破壊した。なす角  $\alpha_f = 0$  度では写真-3.8 右上の背面部の FRP シートが、なす角度  $\alpha_f = 45$  度では写真-3.9 の最も荷点側の FRP シートが破断せず、剥離がシート端部に達していた。今回の試験では、せん断スパン 500mm に対し FRP シート長さ 450mm としたため、特に荷点近傍では FRP シートの剥離が端部まで達し、定着が確保しにくい条件となっていたと言える。このため、なす角度  $\alpha_f = 0$  度および 45 度では、FRP シートの引張耐力が有効に作用せず、FRP シートの貼付面積が、実質的に 50% より小さく、せん断耐力が計算値を下回ったと考えられる。

なす角度  $\alpha_f = 90$  度および 135 度では、計算式によるせん断耐力を上回る結果となり、特に  $\alpha_f = 135$  度では、貼付面積 100% と同等なせん断耐力となった。この  $\alpha_f = 135$  度の破壊は、梁にせん断ひび割れが発生した後、1 本目の FRP シートが破断するまで荷重に耐え続け、FRP シートの破断とともにせん断破壊に至った。この破壊形態は、せん断圧縮によるものと想定できる。

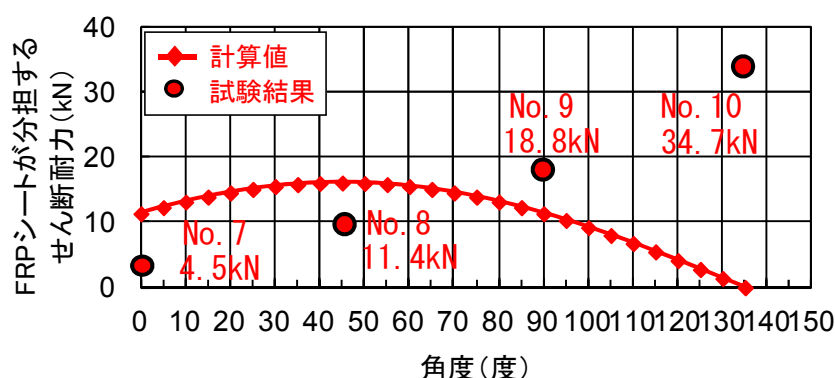


図-3.9 なす角度  $\alpha_f$  とせん断耐力の関係

### 3.3.5 ひび割れ発生位置の比較

今回試験を実施した 10 パターンについて、せん断ひび割れ位置に着目する。供試体に発生したせん断ひび割れ位置をスケッチし、重ね合わせたものを図-3.10～図-3.12 に示す。図中の点線は、部材軸に対するせん断ひび割れの角度を比較しやすい様に、荷点から 135 度（下向き 45 度）に引いた線である。

No.1 のコンクリートのみでせん断耐力を負担する場合、せん断ひび割れの角度が下向き 45 度より小さくなっている。一方、カッティングの無い等方の FRP シートによりせん断補強した No.3 は、下向き 45 度付近の角度となっている。この傾向は、FRP シート貼付面積 100% とし、異方性をもたせた No.4～No.6 についても同様にひび割れが発生している。これは、FRP シートによりせん断補強することで、ひび割れが下向き 45 度の角度で発生していると考えられる。



貼付面積 50% の No.7～No.10 については、No.10 のみ下向き 45 度線の角度でひび割れが発生している。この No.10 は、せん断耐力が貼付面積 100% と同等のせん断耐力となった試験結果であることから、FRP シートの貼付がひび割れ位置や角度に何らかの影響を与えていると推測されるが、その程度については今回の試験では解明できておらず、今後検討の余地があると考えられる。せん断耐力は、一般に圧縮部のせん断力、せん断面の骨材の噛み合わせ、引張鉄筋のダウエル作用や付着割裂に依るとされている<sup>9),10)</sup>。No.10 は、計算式ではシートが分担するせん断力はゼロになるものの、実際には水平ひび割れ部分を補強する形状となり、タイドアーチが形成され、最終的にせん断圧縮により破壊したため計算値より高いせん断耐力となったと考えられる。ただし、FRP シートを間引く位置が異なっていた場合は、ひび割れ位置や水平ひび割れ部分の補強の程度も変わると想定され、せん断圧縮に至らず、斜め引張破壊となった可能性がある。

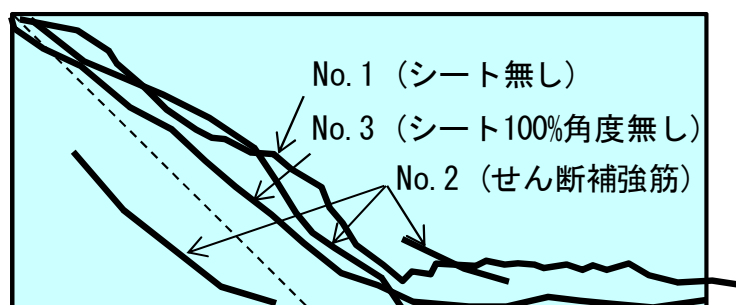


図-3.10 せん断ひび割れ位置 (試験番号 1～3)

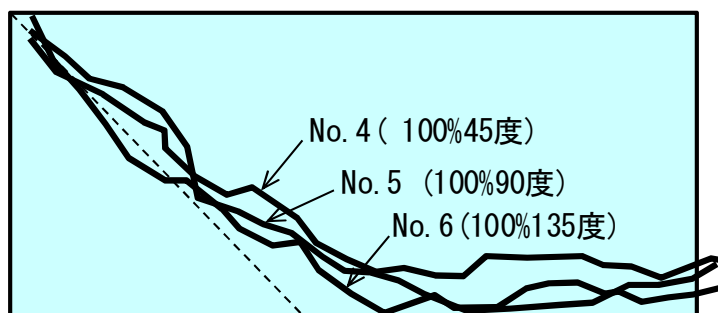


図-3.11 せん断ひび割れ位置 (試験番号 4～6)

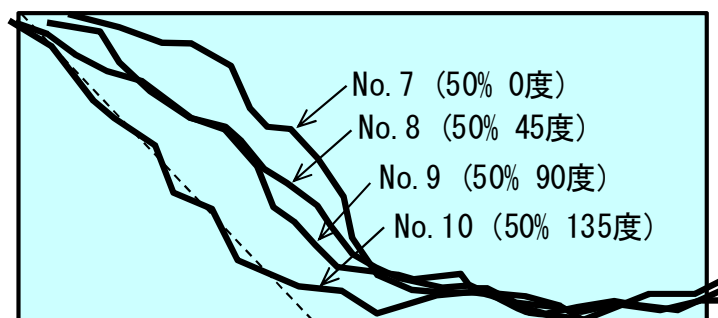


図-3.12 せん断ひび割れ位置 (試験番号 7～10)

### 3.4 まとめ

等方性材料である短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートを、RC 梁のせん断補強として適用したとき、異方性を有する連続繊維シートのせん断補強として用いられる計算式の適用性について検証を行った。また、等方性である光硬化型 FRP シートを、異方性を持たせた貼付をした時、シートの貼付面積 100%と 50%について、角度をパラメータとしてせん断試験を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 等方性材料の光硬化型 FRP シートをせん断補強として梁に貼付したとき、連続繊維シートが部材軸となす角度  $\alpha_f = 45$  度（せん断耐力が最大値）として算出されるせん断耐力が適用できることが分かった。
- (2) FRP シートの貼付面積 100%として、カッティングにより異方性を持たせたとき、今回の試験条件においては、異方性の角度を部材軸となす角度  $\alpha_f$  として算出したせん断耐力以上が期待できることが分かった。
- (3) FRP シートの貼付面積 50%として、カッティングにより異方性を持たせたとき、今回の試験条件においては、シートの剥離が端部に達しやすいため、FRP シートの引張耐力を有効に発揮できず、異方性の角度を部材軸となす角度  $\alpha_f$  として算出したせん断耐力を下回ることが分かった。
- (4) FRP シートを貼付した RC 梁では、せん断ひび割れ位置が載荷点から 135 度（45 度下向き）に引いた角度近づくことが分かった。この傾向は、FRP シートによりせん断強度が向上する試験パターンで見られ、FRP シートがひび割れ位置や角度に何らかの影響を与えていると推測されるが、その程度については今後検討の余地がある。

【参考文献】

- 1) コンクリート補修・補強マニュアル編集委員会, コンクリート補修・補強マニュアル, 2003.5
- 2) 一般財団法人建築保全センター: 連続繊維シートによる耐震改修工法の調査報告,  
<http://www.bmmc.or.jp/gyoumul/gyoumul-3/>
- 3) 国土交通省, あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針, 国住指第 1015 号別添
- 4) 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
- 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: 設計要領第三集トンネル編, 2014.7
- 6) 国土交通省住宅局: あと施工アンカー・連続繊維補強設計・施工指針, 2006.7
- 7) 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
- 8) 羽田野英明他, 連続繊維ロープを用いた RC 部材のせん断補強, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.68, No.4, pp.271-282, 2012
- 9) 田所敏弥他, 斜めひび割れ面のせん断伝達機構と鉄筋コンクリート棒部材の斜め引張破壊, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.195-211, 2003.8
- 10) 長谷川俊昭, RC はりの斜め引張破壊に関する数値解析的検討, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-141, pp.281-282, 2002.9

## 第 4 章 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

### 4.1 はじめに

シート系材料による剥落防止<sup>1),2)</sup>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り、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<sup>3),4),5),6)</sup>、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久性を確保する上で必要であると考えられる。

本研究では、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。

### 4.2 既存の付着性能試験と水圧作用時の荷重作用

剥落防止用のシート系材料に要求される性能は、「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<sup>7),8)</sup>、耐水圧に関する性能につ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-4.1 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の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よう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。

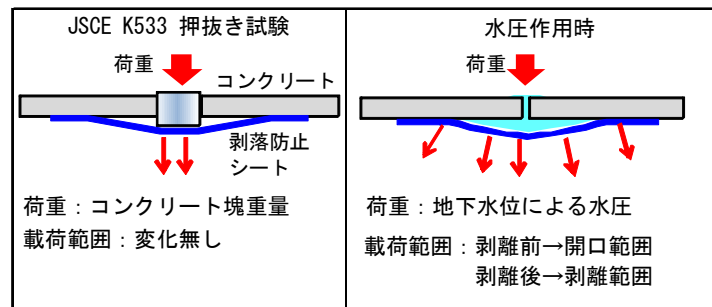


図-4.1 押抜き試験と水圧作用時の荷重作用概念

### 4.3 シート材料の耐水圧試験の提案

#### 4.3.1 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<sup>9)</sup>（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 分程度で硬化し、貼付後も透明であるためコンクリート表面が観察できる。耐水圧試験に使用した FRP シートの基本物性を表-4.1 に示す。

表-4.1 光硬化型 FRP シートの一般的物性

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

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（400×600×60mm、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。U 型ふたの寸法を図-4.2 に示す。

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。試験状況を写真-4.1 に、試験結果を表-4.2 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。

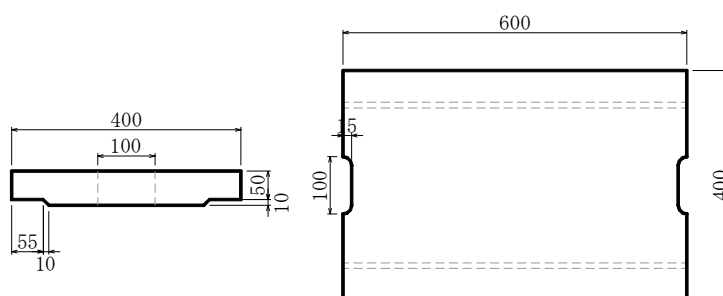


図-4.2 U型ふた 1種 300 寸法



写真-4.1 付着試験状況（上） 押抜き試験状況（下）

表-4.2 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 <sup>2</sup> 以上	2.80N/mm <sup>2</sup>	合格
押抜き試験	荷重1.5kN以上 (変位10mm以上)	1.96kN (12.5mm)	合格

### 4.3.2 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－4.3 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。

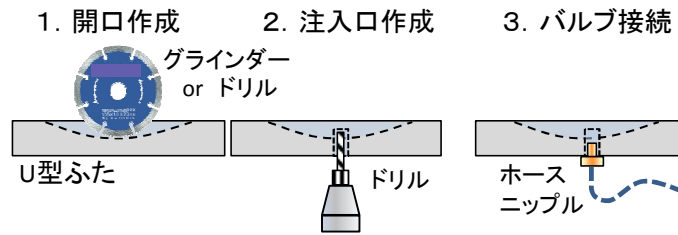
表－4.3 試験の種類

番号	ケース名	形状	開口寸法
No. 1	a- $\phi$ 2	円形	直径 $\phi$ 2mm
No. 2	a- $\phi$ 5	円形	直径 $\phi$ 5mm
No. 3	a- $\phi$ 10	円形	直径 $\phi$ 10mm
No. 4	a- $\phi$ 45	円形	直径 $\phi$ 45mm
No. 5	a- $\phi$ 108	円形	直径 $\phi$ 108mm
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

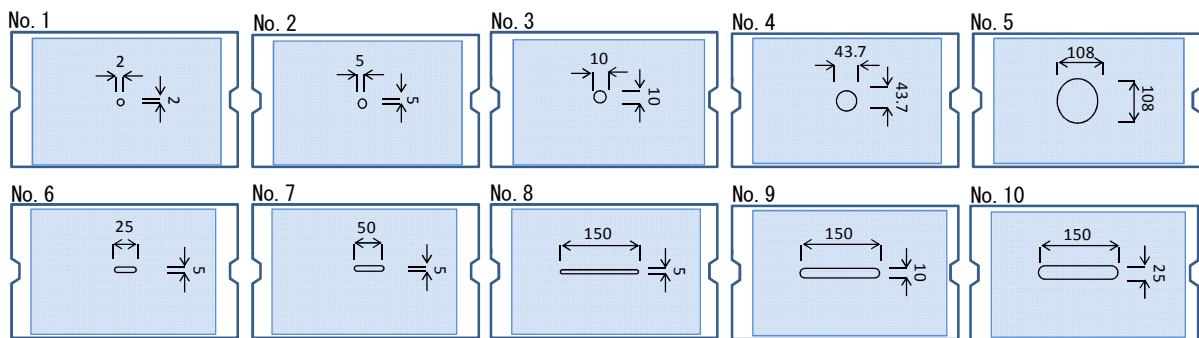
U 型ふたの加工概念図を図－4.3 に、加工後の加工形状を図－4.4 示す。No.1～No.5 の円形の開口は、コンクリートドリルやコンクリートコアドリルを用いて加工した。直径 10mm 以下は、コンクリートドリルにてコンクリート表面より約 40mm 削孔した。直径 45mm 以上は、まずコンクリートコアドリルにより円周状に約 40mm 削孔し、続いて中心部分をノミで削り取った。No.6～No.10 のひび割れを模擬した直線状の開口は、ディスクグラインダーを用いて加工した。

次に、No.1～No.10 の全供試体において、裏面から  $\phi$  8mm 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－4.3 U型ふた加工概要図



図－4.4 供試体加工形状

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（ $\phi 8\text{mm} \times \text{PT}1/4$ ）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、直線形上の開口の場合に押抜き試験よりも広範囲となることや、貼付面を上向きに試験することで U 型ふたの全面が使用できることから、 $580\text{mm} \times 380\text{mm}$  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  $5\text{MPa}$ ）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－4.2 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、圧力のみの計測とした。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、写真－4.3 に示すように、地下水流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。

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。



写真－4.2 試験全体写真（上） 背面ホース接続部（下）



写真－4.3 生分解性蛍光トレーサー染料による着色水

## 4.4 実験結果と考察

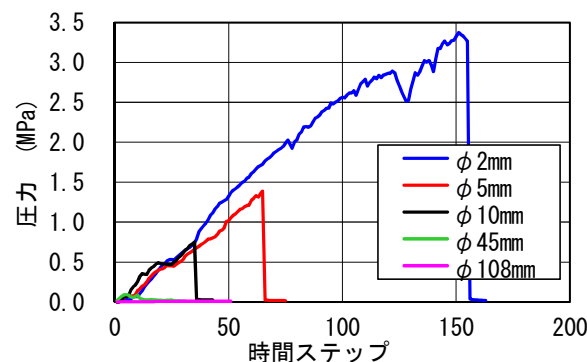
### 4.4.1 欠損部を模擬した水圧試験結果

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（試験番号 No.1～No.5）を実施した。各試験の時間ステップ毎の圧力計測結果を図－4.5 に、試験前後の FRP シート表面を写真－4.4～写真－4.8 に示す。

図－4.5 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、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である。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 シートが初めに剥離する際、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ような剥離となったと考えられる。

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。別のシート系材料や工法によっては、再加圧により水圧が再び上昇することも考えられるが、今回の FRP シートについては、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、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。



図－4.5 時間ステップによる圧力変化

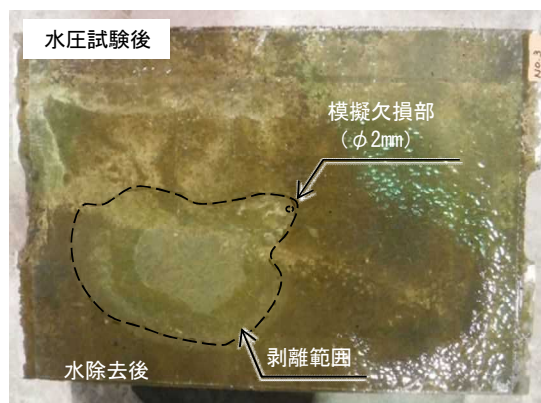
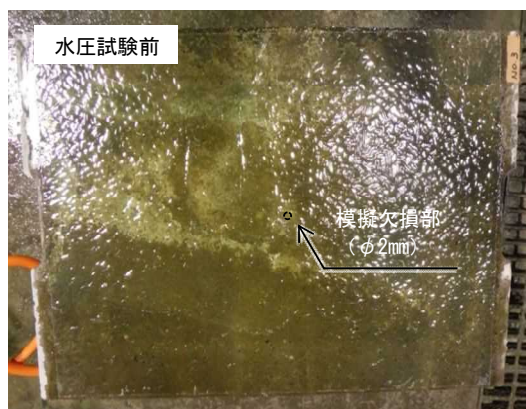


写真-4.4 試験 No. 1 開口寸法 直径φ2mm

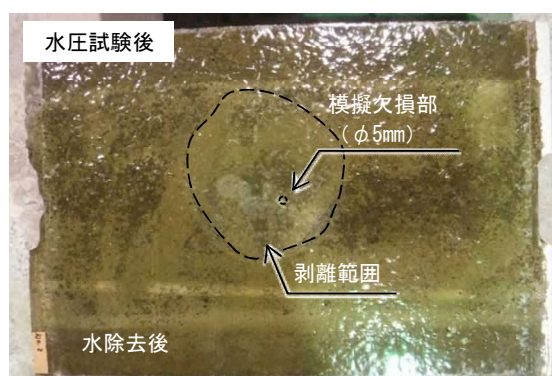
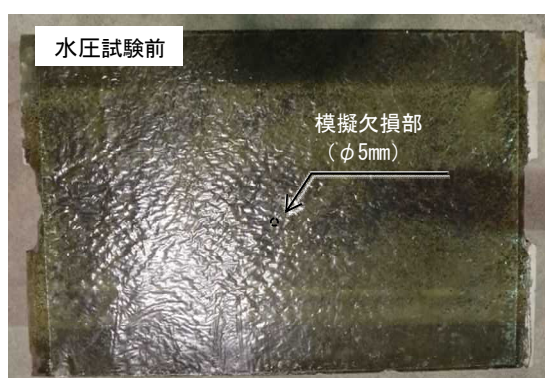


写真-4.5 試験 No. 2 開口寸法 直径φ5mm

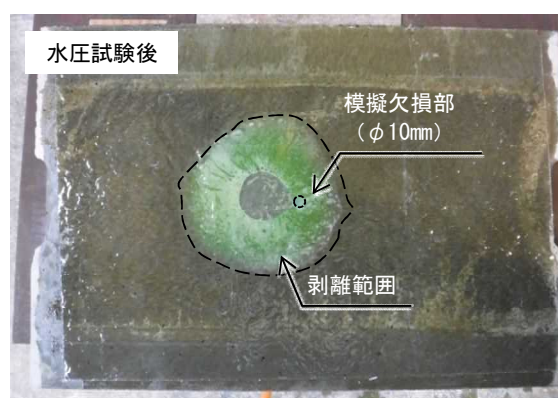
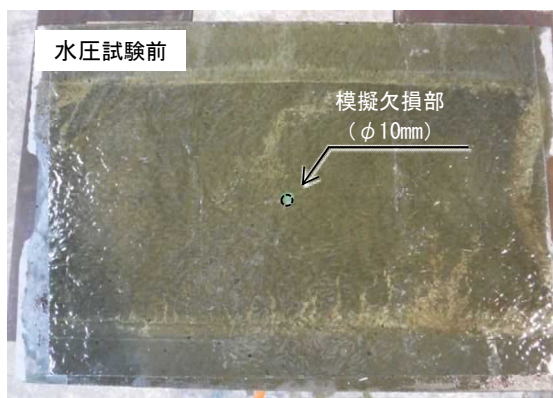


写真-4.6 試験 No. 3 開口寸法 直径φ10mm

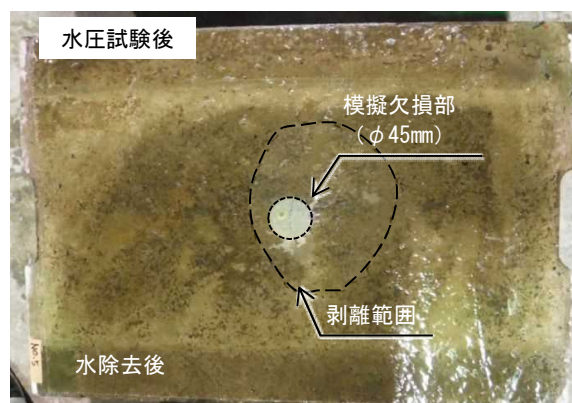
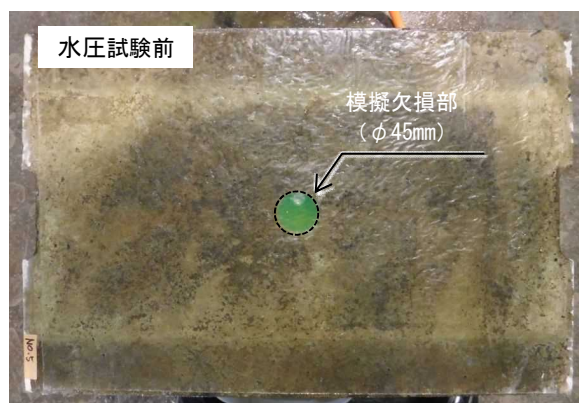


写真-4.7 試験 No. 4 開口寸法 直径φ45mm



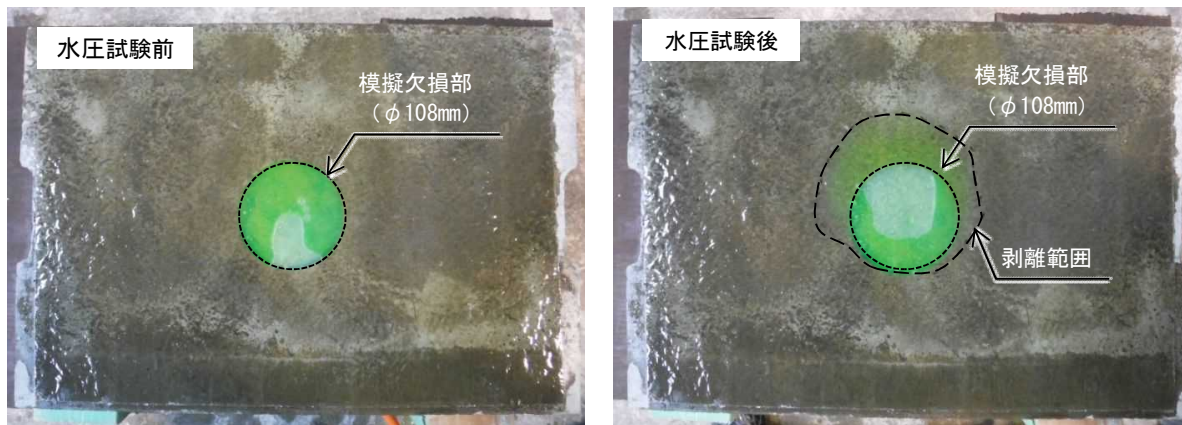


写真-4.8 試験 No. 5 開口寸法 直径φ108mm

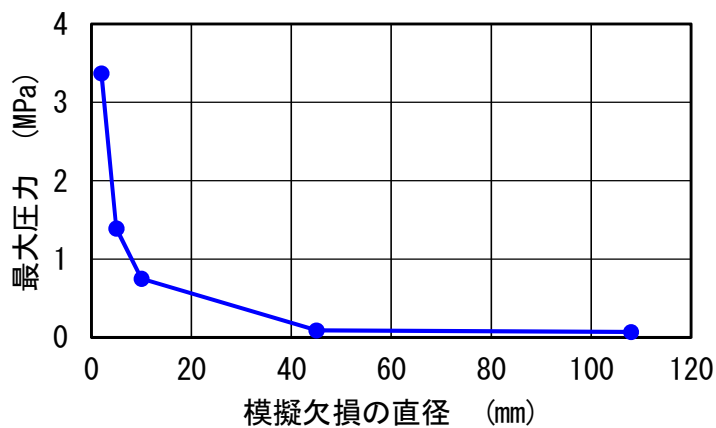
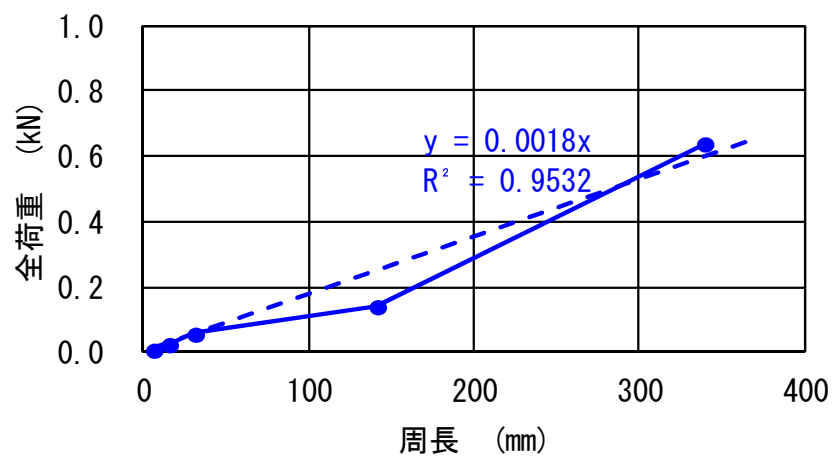


図-4.6 模擬欠損の直径と最大圧力の関係

図-4.6 に、模擬欠損の直径毎の最大圧力の関係を示す。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-4.7 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-4.7 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则认为られる。図-4.6 では直径φ2mmの最大圧力は3.37MPaであり、直径φ108mmの最大圧力0.07MPaより高い圧力までFRPシートが耐えている様子がわかるが、図-4.7の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ることがわかる。言い替えれば、直径が小さい場合は、水圧が高くても水圧が作用する面積が小さいために、FRPシートに作用する荷重は小さい。逆に直径が大きい場合は、水圧が低くても水圧が作用する面積が大きいため、荷重が大きくなる。この荷重と直径（もしくは周長）の関係が、図-4.7から比例関係にあると言える。



図－4.7 周長と全荷重の関係

#### 4.4.2 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。

##### (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、各試験の時間ステップ毎の圧力計測結果を図-4.8 に、試験前後の FRP シート表面を写真-4.9～写真-4.11 に示す。図-4.8 では、加圧速度が手動のため多少ばらつきがあるものの、各供試体とも加圧した圧力が FRP シートの剥離とともに急激に低下しており、この現象は、4.4.1 の直径をパラメータとした試験結果と同様の結果となった。

写真-4.9～写真-4.11 から、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。特に長辺長さが長い試験 No.7 (L=100mm)、試験 No.8 (L=150mm) では、開口部全てが剥離箇所に含まれておらず、付着が残っている箇所が写真から確認できる。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。

模擬ひび割れ長さと最大圧力の関係を図-4.9 に示す。図-4.9 の模擬ひび割れ長さ 5mm の試験結果は、 $\phi 5\text{mm}$  の円形状の結果を指し、青点線は前出の開口形状を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。

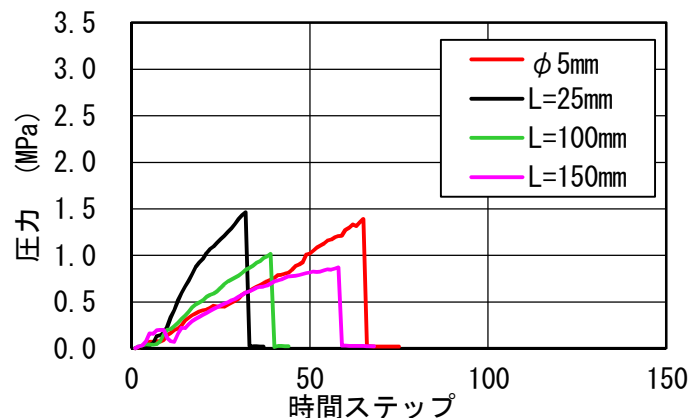


図-4.8 時間ステップによる圧力変化（模擬ひび割れ幅 5mm 時）

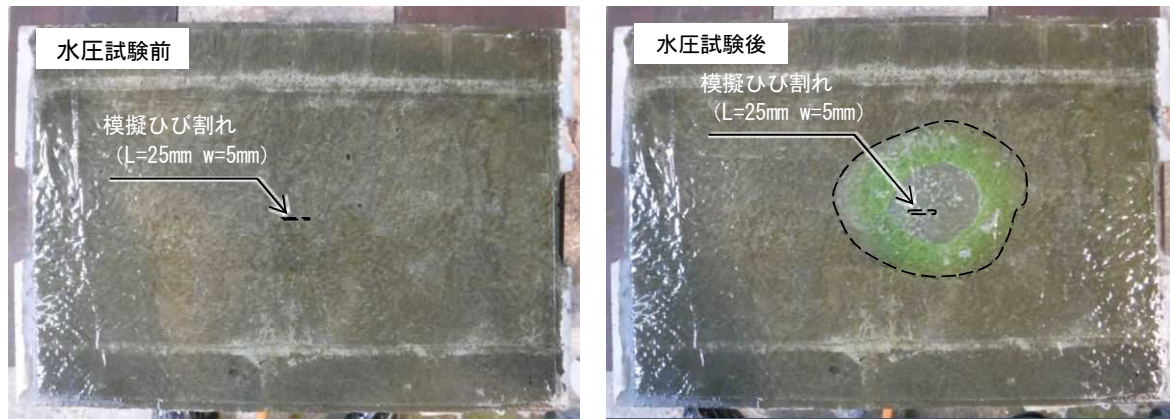


写真-4.9 試験 No. 6 開口寸法 短辺 5mm 長辺 25mm

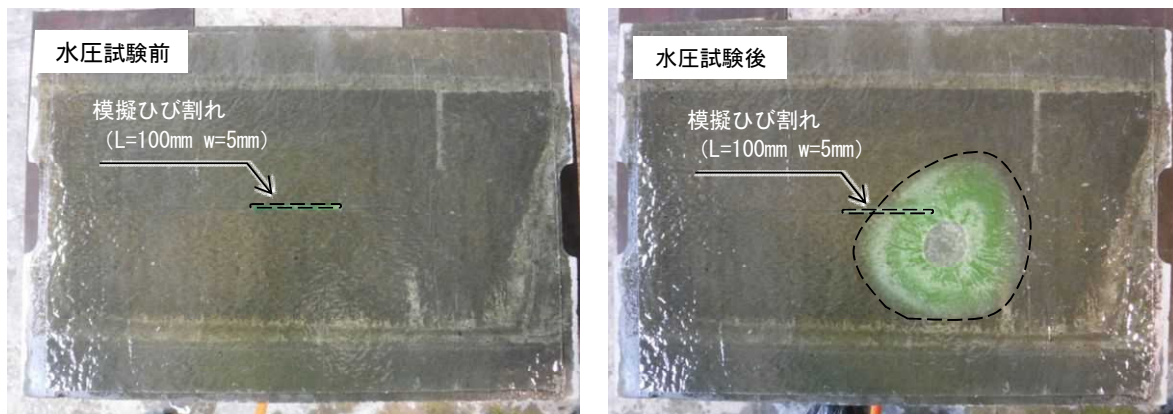


写真-4.10 試験 No. 7 開口寸法 短辺 5mm 長辺 100mm

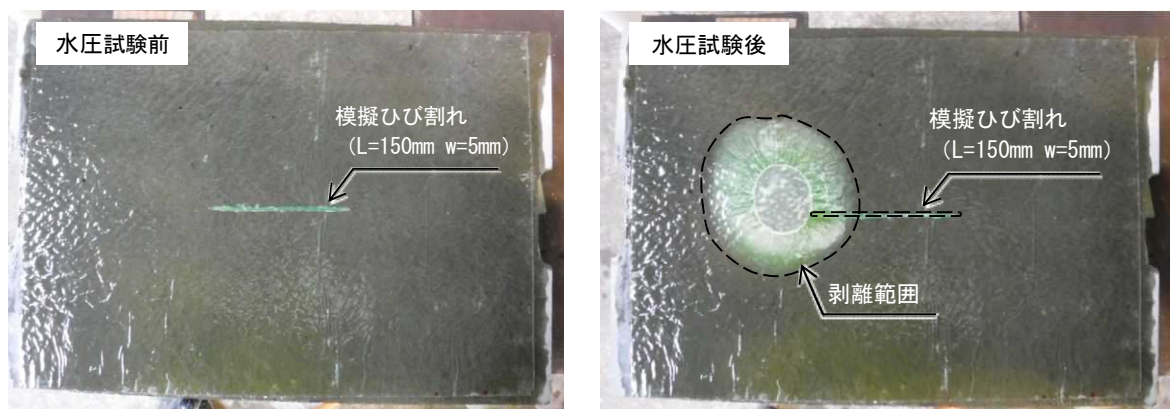


写真-4.11 試験 No. 8 開口寸法 短辺 5mm 長辺 150mm

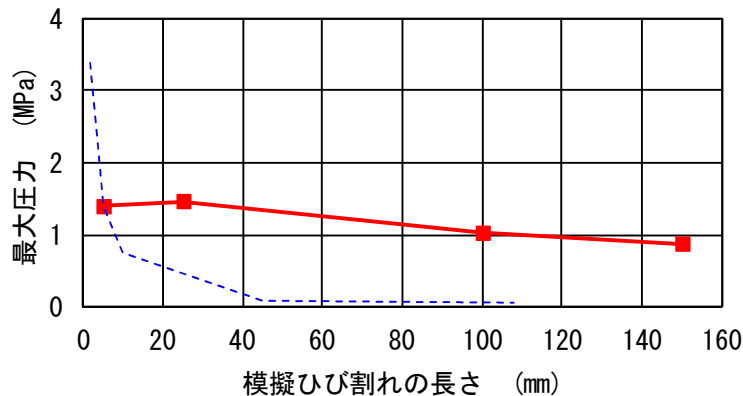


図-4.9 模擬ひび割れ長さと最大圧力の関係（模擬ひび割れ幅 5mm 時）

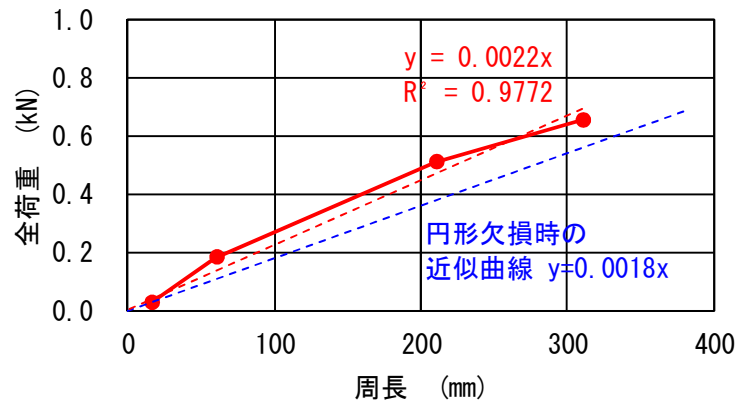


図-4.10 周長と全荷重の関係（模擬ひび割れ幅 5mm 時）

図-4.10 に、模擬ひび割れの周長と全荷重の関係を示す。図中の赤線が当該試験結果であり、その近似線を赤破線で示す。また、開口形状が円形とした時（図-4.7）の近似線を青破線で示す。開口形状が円形時と同様に、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、当該試験による近似線（赤破線）と円形時の近似線（青破線）は良く類似している位置にあると言える。

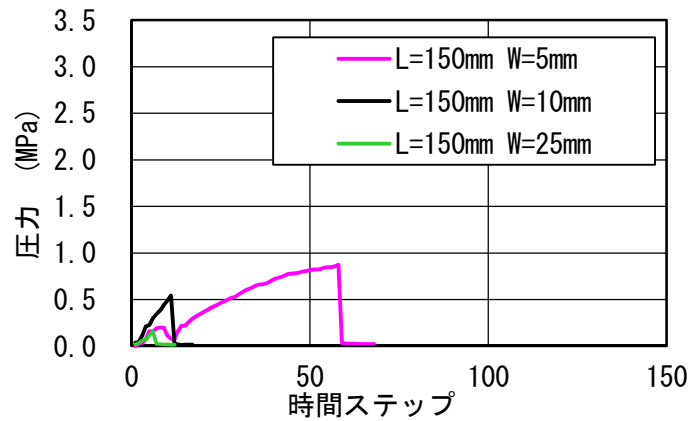
## (2) ひび割れ幅を変化させた耐水圧試験結果

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、各試験の時間ステップ毎の圧力計測結果を図-4.10 に、試験前後の FPR シート表面を写真-4.10～写真-4.11 に示す。図-4.11 より、試験 No.7（L=150mm, W=5mm）に対し模擬ひび割れ幅が大きくなると、剥離時の圧力が低下することが分かる。写真-4.10～写真-4.11 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。

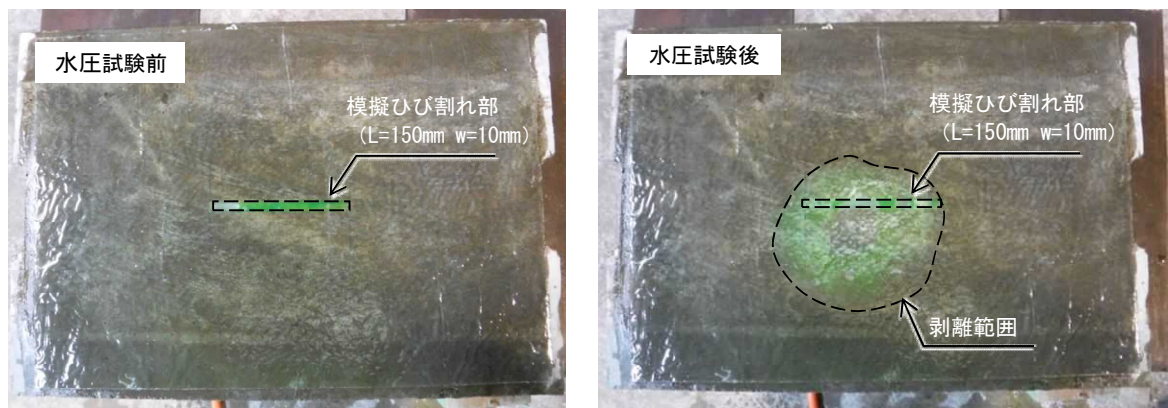
模擬ひび割れ幅と最大圧力の関係を図-4.12 に示す。図中の青点線は、水圧作用を円形とした



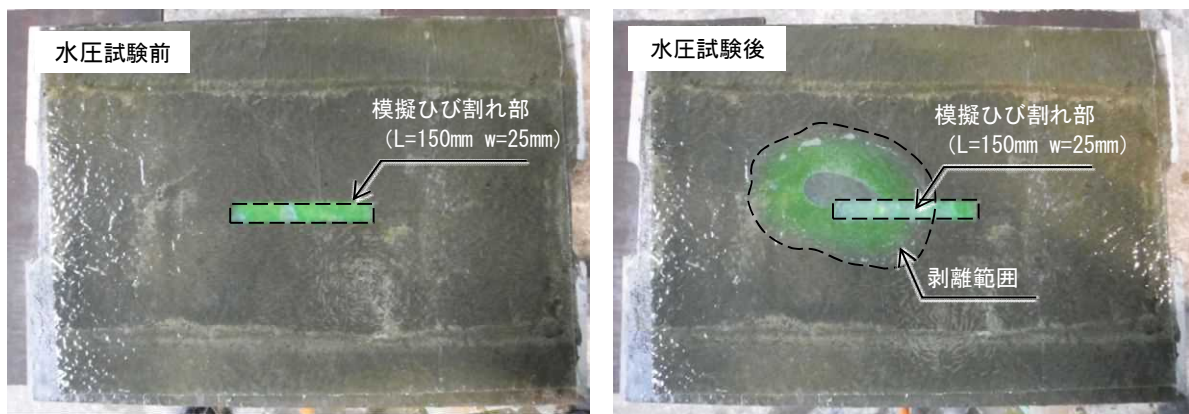
欠損部を模擬した試験結果（図－4.6）を，パラメータの直径を当該試験のパラメータである模擬ひび割れ幅として投影したものであり，ひび割れ幅を変化させた時の試験結果はこれと類似した傾向となった。



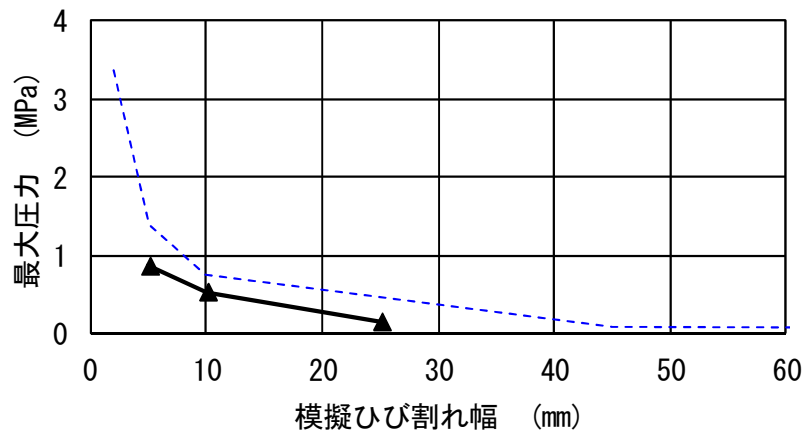
図－4.11 時間ステップによる圧力変化（模擬ひび割れ幅変化時）



写真－4.12 試験 No. 9 開口寸法 短辺 10mm 長辺 150mm

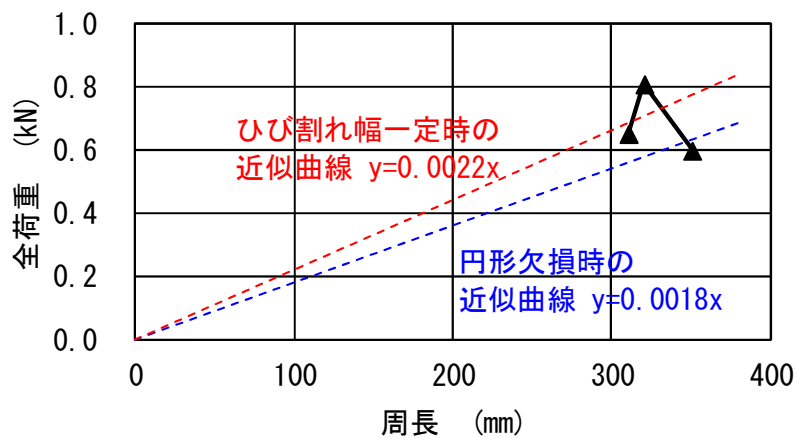


写真－4.13 試験 No. 10 開口寸法 短辺 25mm 長辺 150mm



図－4.12 模擬ひび割れ長さと最大圧力の関係

図－4.13 に、模擬ひび割れの周長と全荷重の関係を示す。模擬ひび割れ長さを一定として、幅のみを変化させた場合、周長自体は 310mm～350mm と狭い範囲であり、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－4.7 中の青破線）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－4.10 中の赤点線）の近傍であった。



図－4.13 周長と全荷重の関係

#### 4.4.3 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よう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、耐水圧性を高めるにはひび割れ長さを長くすることとなるため、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たりの荷重との関係を図-4.14に示す。

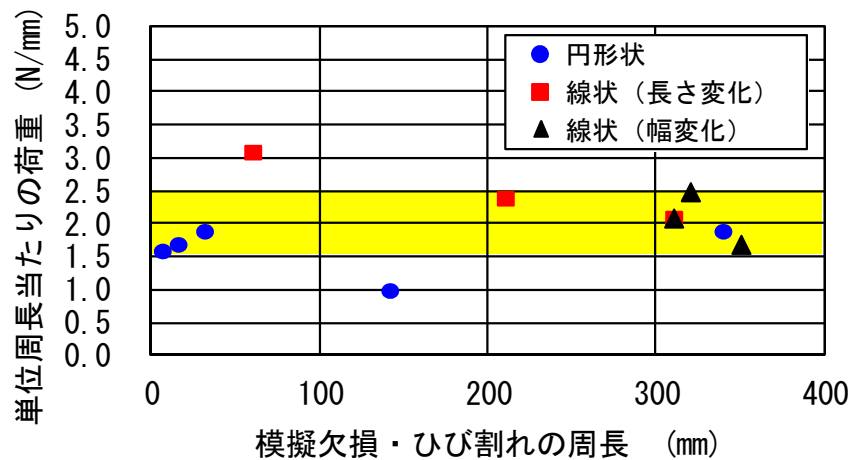


図-4.14 周長と単位周長当たりの荷重の関係

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 1.0kN～3.0kN 程度の範囲となり、特に 1.5～2.5kN 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。

従来の押抜き試験では、シートをはく離させる荷重は、試験中を通じて一定の面積（直径約 100mm の円盤状）で荷重が作用するため、その荷重を支えるシートも、平均的なシートの付着力を評価していると言える。本研究で提案する試験方法では、シートの付着力の最も弱い箇所、つまり開口の周長部分の凹凸や開口形状（直線や曲線、コーナーなどの形状）など様々な条件の中で最も付着力が小さくなっている箇所の付着耐力を評価することとなる。実際の構造物に水圧が作用した場合、本試験のように最も弱部ではく離は生じることは容易に想像できるため、従来の押抜き試験では評価できない付着耐力を、本試験にて評価が可能であると考えられる。

ただし、現在は耐水圧試験方法の提案として実施したため、実際のシート系材料の種類による影響や、温度による影響など、今後研究を発展させていく必要があると考える。

#### 4.5 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  $1.5 \sim 2.5 \text{ N/mm}$  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) 社団法人土木学会；表面被覆材の付着強さ試験方法，JSCE-K531-2010
- 8) 社団法人土木学会；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

## 第5章 コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験による ひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価

### 5.1 はじめに

鉄筋コンクリート構造物に種々の原因により生じたひび割れの補修には、0.2mm 以上のひび割れ幅となった場合、注入工法が適用されることが多い<sup>1)</sup>。注入工法には、アクリルやエポキシなどの樹脂材料や、超微粒子セメントなどのセメント系材料など様々な材料が用いられている。特にエポキシ樹脂は、コンクリート組織の一体性を回復する目的で広く使用されている<sup>2)</sup>。エポキシ樹脂を用いた場合、コンクリートとエポキシ樹脂との付着強度はコンクリートの引張強度より大きく、荷重作用時にはエポキシ樹脂とコンクリートの界面での剥離や樹脂部でひび割れが生じない必要がある。

ひび割れに充填されたエポキシ樹脂（以下、樹脂）とコンクリートとの付着性能は、樹脂の性質、ひび割れの向きや幅、ひび割れ面の湿潤状態や汚れ・析出物などひび割れ内部の状況、注入時の温度、施工後の材齢など様々な要因の影響を受ける可能性がある。しかし、注入時の品質管理において、ひび割れ内部の状況を判定することは困難であり、さらにコア採取により充填深さを確認することはあっても、付着強度などの付着性能を直接評価する品質管理は一般に行われていない。これは、注入後の樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための評価試験方法が確立していないことも一因であると考えられる。樹脂とコンクリートとの付着性能が得られにくい条件の下での性能の評価と施工方法の改善を行うためにも、評価試験方法の標準化が望まれる。

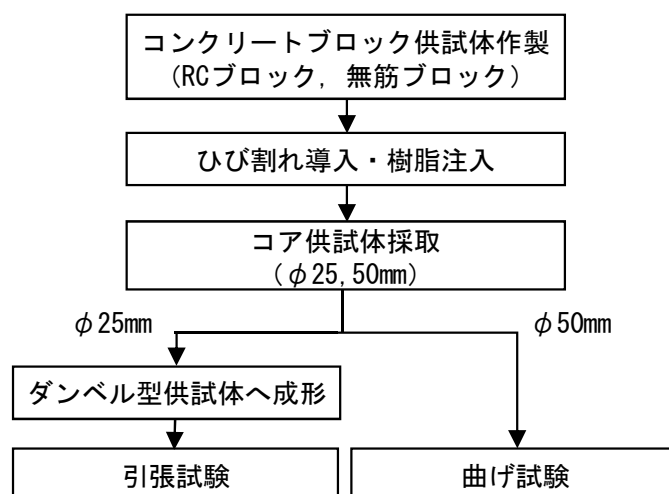
本研究においては、供試体作製方法も含め、ひび割れに注入した樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法を提案することを目的としている。ひび割れを導入したコンクリートブロック供試体を作製し、ひび割れに低圧注入工法により流動性の高いエポキシ樹脂を注入した後、ひび割れ面に直角方向にコア供試体（直径 25mm または 50mm、長さ 250mm）を採取した。コア供試体の一軸引張試験（以下、引張試験）ならびに曲げ試験を行い、引張試験、曲げ試験が充填された樹脂の付着性能を評価する試験方法として適用できるかを確認するとともに、樹脂とコンクリートとの付着性能を評価した。なお、樹脂を注入する行為を表すには「注入」を、樹脂が充填された状態を表すには「充填」を用いた。



## 5.2 実験概要

### 5.2.1 実験全体の流れ

樹脂注入用のコンクリートブロック供試体の作製から、引張試験および曲げ試験を行うまでの手順を図－5.1 に示す。



図－5.1 試験フロー図

本試験では、ひび割れが生じたコンクリート構造物の一部を室内試験で再現するため、ひび割れを有するコンクリートブロック供試体を作製した。すなわち、構造物を貫通しているひび割れと、貫通せずに鉄筋位置で閉じたひび割れの両者を表現するため、無筋ブロック供試体と RC ブロック供試体とを作製した。RC ブロック供試体には、鉄筋を配置することで、コンクリート表面ではひび割れは開口しているが、ひび割れの先端では閉じているひび割れを導入した。無筋ブロック供試体には、割裂載荷により、供試体を貫通（二分）するひび割れを導入した。

今回実施した試験の各材齢における実施内容を表－5.1 に示す。なお、備考欄は供試体の養生状況を示す。

表－5.1 各材齢における実施内容

材 齢	内 容	備 考
0日	コンクリート打設	湿布養生
3日	ひび割れ導入	気中養生 (自然乾燥)
7日	FRPシート貼付	
9日	樹脂注入	
28日	ダンベル型供試体加工	
37日	引張試験, 曲げ試験	—

## 5.2.2 コンクリートブロック供試体の作製

### (1) RC ブロックの作製

RC ブロック供試体を作製するため、図-5.2 に示すような RC はり部材をまず作製した。配筋は複鉄筋とし、両側とも、かぶり 50mm の位置に異形鉄筋 D10 を各 2 本配置した。上側鉄筋の両端部にねじ節鉄筋 D22（長さ 300mm）を溶接し、はりの外側まで延長して配置した。コンクリートの配合を表-5.2 に示す。水セメント比は 55%，粗骨材の最大寸法は 15mm，空気量は 4.8%，スランプは 12.0cm であった。材齢 37 日において、円柱供試体（直径 100mm，高さ 200mm，3 個）から求めた圧縮強度は 43.1N/mm<sup>2</sup>，割裂供試体（直径 150 mm，高さ 150mm，3 個）から求めた引張強度は 3.3N/mm<sup>2</sup> であった。コンクリート打設後，材齢 3 日の時点で，はりの外側に延長しているねじ節鉄筋を油圧ジャッキで引張り，RC はり部材にひび割れを導入した。この時の引張状況を写真-5.1 に，RC ブロックに発生したひび割れ状況を写真-5.2 に示す。除荷後のひび割れ幅は，上側（引張側）で約 1.8mm，下側の鉄筋近傍でゼロ（閉じたひび割れ）であった。

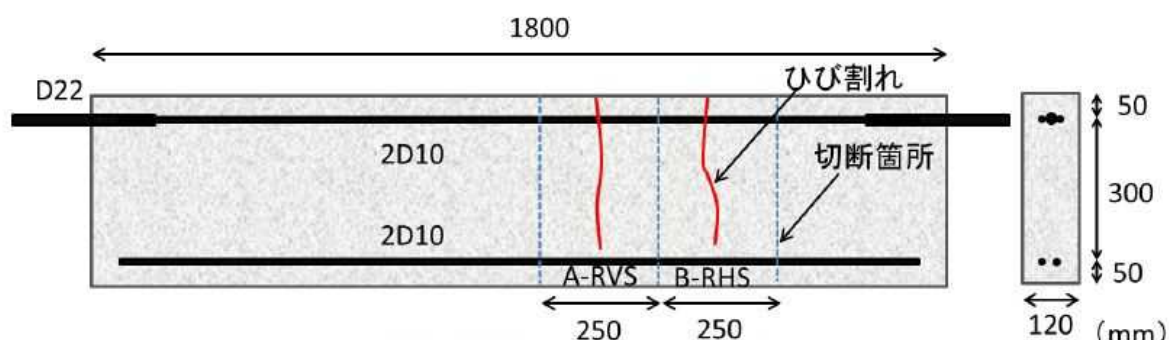
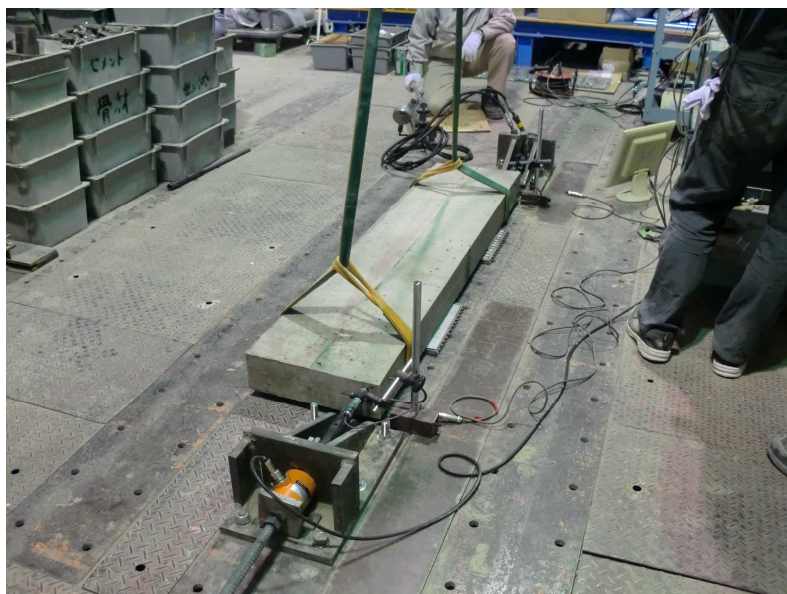


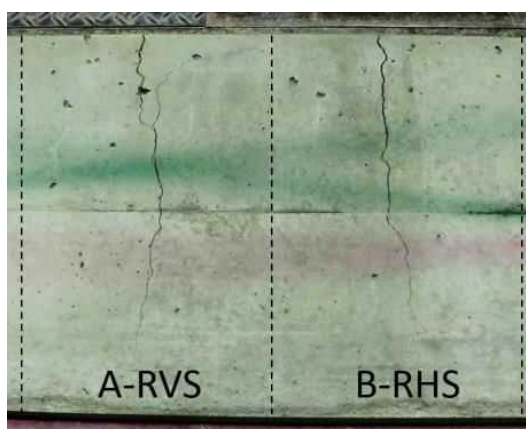
図-5.2 RC はり部材とひび割れ発生位置

表-5.2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位数量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤	AE剤
55.0	48.0	175	318	843	921	0.994	0.318



写真－5.1 RC はり部材の引張状況



写真－5.2 導入されたひび割れ

この RC はり部材から、ひび割れをほぼ中央に含むように 2 つのコンクリートブロック供試体をコンクリートカッターで切り出した。切り出した後の RC ブロック供試体の寸法は、2 つとも高さ 400mm、幅 250mm、厚さ 120mm であった。

## (2) 無筋ブロックの作製

貫通するひび割れを有する無筋ブロック供試体の寸法は、RC ブロック供試体と同様に、高さ 400mm、幅 250mm、厚さ 120mm とした。コンクリートの配合についても、表-5.2 に示す RC ブロック供試体のものと同じとした。幅 250mm の無筋ブロック供試体の上下面の中央部に鋼棒（直径 50mm、長さ 400mm）を当て、圧縮試験機により割裂ひび割れ（寸法 120mm×400mm、幅 0.1～2.4mm 程度）を導入した。この方法で導入したひび割れは、無筋ブロック供試体を貫通（二分）しており、RC ブロック供試体の先端が閉塞したひび割れとは異なっている。なお、二分したコンクリートブロックは、断面同士を併せ再びコンクリートブロックを復元し、側面に後述する FRP シートを貼付することで、分離しないようにした。

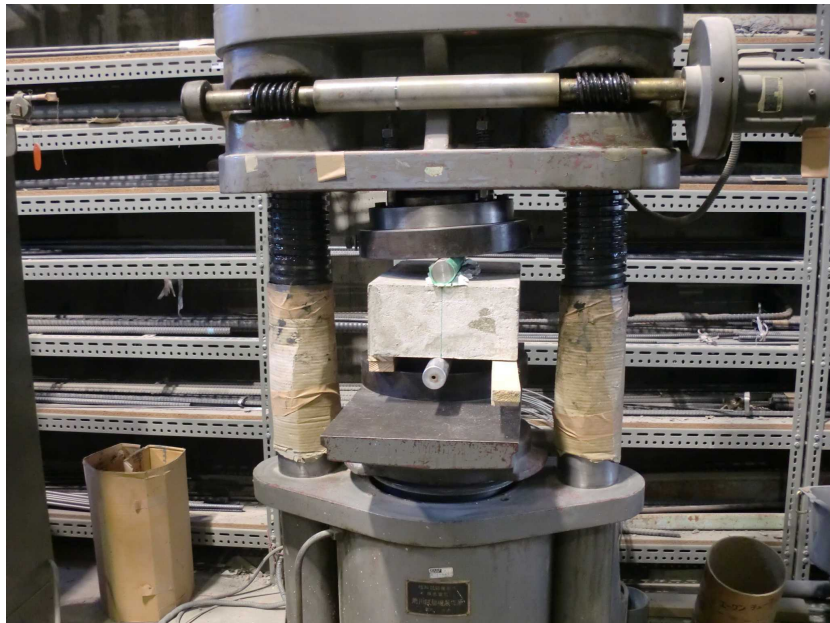


写真-5.3 圧縮試験機による割裂ひび割れ導入状況

### 5.2.3 ひび割れへの樹脂注入

RCブロックと無筋ブロックの両コンクリートブロック供試体とも、ひび割れへの樹脂注入には、既存の低圧樹脂注入工法を適用した<sup>3)4)</sup>。実構造物における注入作業は、上向き注入、下向き注入、水平方向への注入など様々な方向が考えられ、さらにひび割れも鉛直方向ひび割れ、水平方向ひび割れなどがある。今回の試験においては樹脂注入結果に及ぼすひび割れ面の方向の影響を確認するため、**図-5.3**に示すように、注入する方向は水平方向に統一し、ひび割れを水平方向、鉛直方向の2種類について試験を実施した。

樹脂注入の手順は、既存の注入工法<sup>3)</sup>に準拠することとした。注入前に予め注入面のひび割れの中央位置にドリルで削孔（孔径 7mm、深さ 50mm 程度）し、削孔位置に注入器具取付け用の台座をシール材で取付け、台座部以外のひび割れ部分を速硬化性のモルタルでシールした。コンクリートブロック供試体の注入面以外のひび割れ面を含む3面（側面および裏面）には、注入時にコンクリートブロックがひび割れ部で分離することを防止し、また樹脂の漏出防止のため、予め透明な光硬化型 FRP シート<sup>5)</sup>（厚さ 1.2mm）を貼付し、紫外線を約 20 分程度照射し硬化させた。

シール用のモルタルが硬化した後、注入器具を台座に取付け、**写真-5.4**示すように流動性の高いエポキシ樹脂を低圧（注入圧  $0.06\text{N/mm}^2$  程度）で加圧注入した。さらに加圧を維持した状態で2日間静置し硬化させた。樹脂の基本物性を**表-5.3**に示す。

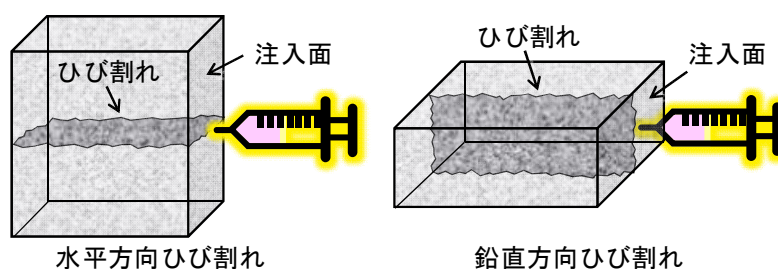


図-5.3 樹脂注入方向



写真-5.4 注入時のブロック供試体



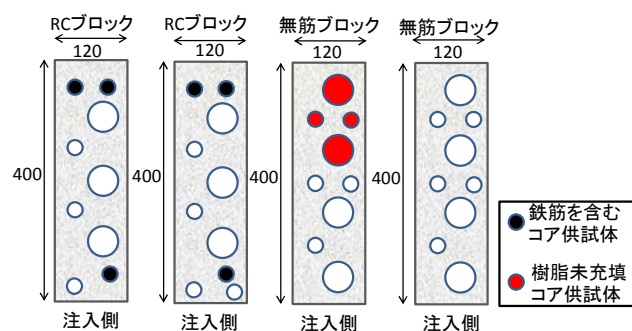
表－5.3 樹脂の基本性能

項目	数値	備考
主材	エポキシ樹脂	
粘度	500±200 mPa・s	20℃時
可使時間	40～70分	20℃時
接着強度	6.5 N/mm <sup>2</sup>	
引張強度	27.3 N/mm <sup>2</sup>	
曲げ強度	50.0 N/mm <sup>2</sup>	

#### 5.2.4 コア供試体の採取とダンベル型供試体への加工

樹脂が充填されたひび割れの面に直交する方向に、コア供試体を採取した。コア供試体の直径は、25mm と 50mm の 2 種類とし、直径 25mm のコア供試体は引張試験に、直径 50mm のコア供試体は曲げ試験に用いた。いずれのコア供試体の長さは 250mm であり、コンクリートブロックの奥行き全長分で採取した。コア供試体採取の位置を図－5.4 に示す。

引張試験用として、円柱状の直径 25mm のコア供試体をダンベル型供試体<sup>6)</sup>に加工した。写真－5.5 に示すように、直径 25mm、長さ 250mm のコア供試体を、ダンベル型供試体の型枠（外寸 80×30×330mm、中央の試験区間の寸法 30×30×80mm）の中央に設置し、両端の肩部（引張試験時の掴み部）に複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料（以下 HPFRCC）を打設した。コア供試体を、ひび割れ部がダンベル型供試体の中央となるように型枠内に置いた。肩部に打設する HPFRCC が、引張試験領域まで回り込まないように、保護材（気泡緩衝材）をコア供試体に巻いた。写真－5.5 の上側が型枠内にコア供試体を置き、型枠の半分程度の高さまで HPFRCC を詰めた状態、写真の下側が HPFRCC を型枠に詰め終わった状態である。脱型後の完成したダンベル型供試体の例を写真－5.6 に示す。なお、ダンベル型供試体の肩部に HPFRCC ではなくモルタルを用いると、引張試験時にモルタル部分に局所的な損傷が生じ、引張試験を行えないため、HPFRCC を使用することで、この引張試験が可能となる。



図－5.4 コア供試体採取位置



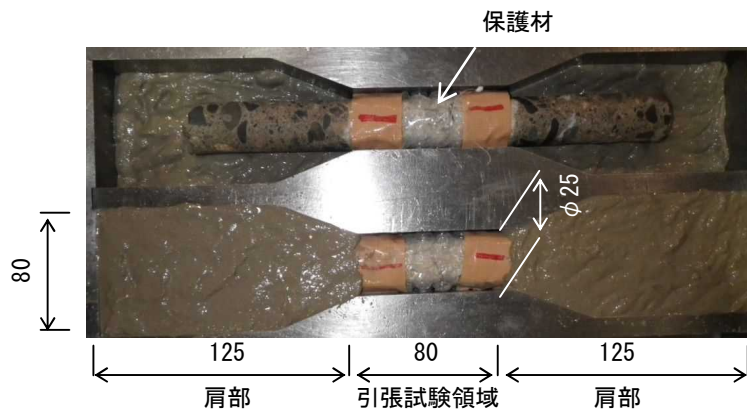


写真-5.5 型枠で成形中のダンベル型供試体



写真-5.6 完成したダンベル型供試体の例

### 5.2.5 樹脂の充填状況

直径 25mm のコア供試体 17 本（無筋 10 本，RC7 本），直径 50mm のコア供試体 14 本（無筋 8 本，RC6 本）を採取した。RC ブロックから採取したコア供試体では，注入時のひび割れ面の方向が水平，鉛直のいずれにおいても，樹脂はひび割れ面に充填されていた。無筋ブロックについては，ひび割れ面を鉛直にして樹脂を注入した供試体から採取したコア供試体では，全て樹脂がひび割れに充填されていた。しかし，ひび割れ面を水平にして樹脂を注入した無筋ブロックでは，コア供試体のうち 14 本は充填されていたが，4 本において樹脂が未充填の箇所があった。未充填箇所は前出の図-4.2 に示す。この樹脂未充填のコア供試体は，ひび割れ部分で分離しているため，以後の引張試験への適用から除外した。なお，採取したコアのひび割れ位置が，コアの中心位置から大きく外れるものは引張試験と曲げ試験の対象から除外することとしていたが，今回のコアにおいては，いずれもひび割れが概ねコアの中央に位置しており，以後の引張試験，曲げ試験に問題とならない程度であった。

## 5.3 試験結果と考察

### 5.3.1 引張試験

#### (1) 引張試験概要

写真-5.7 に示す引張試験装置を用いて，ダンベル型供試体の引張試験を行った。引張力は，手回しジャッキにより最大荷重までの載荷時間が 1 分程度となるように，できるだけ一定の速度で与え，最大荷重をロードセル（容量 10kN）により計測する。この引張試験では，コンクリート，樹脂およびその界面のうち最も引張強度が小さいところで破壊が起こるため，樹脂や界面の付着強度がコンクリート母材の引張強度以上となっているかを評価することができる。



写真-5.7 引張試験装置

## (2) 引張試験結果

15 個のダンベル型供試体の引張試験結果を表－5.4 に示す。また試験後の供試体を写真－5.8, 写真－5.9 に示す。ここで引張強度とは、最大荷重をダンベル型供試体の試験部分（直径 25mm）の断面積で除して求めた値であり、ひび割れ幅とは、引張試験前にマイクロスコープ（倍率 50 倍）を用いて計測したコア供試体のひび割れ幅（樹脂の厚さ）の最小値および最大値を計測し、平均した値である。

引張試験の結果、破断面が樹脂充填部を横切るものがあったものの、樹脂充填部分あるいは樹脂とコンクリートの界面で破壊したものはなく、すべてコンクリートの母材部分で破壊した。また、ひび割れ幅の大小や、注入時のひび割れ方向に依存することなく、樹脂がひび割れ内部に充填されていれば、母材破壊した。

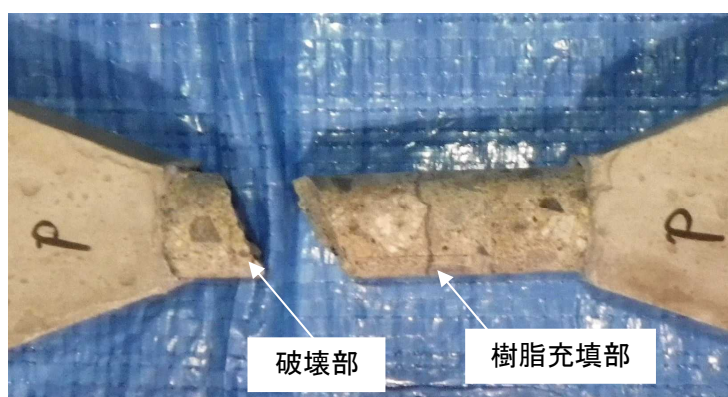
直径 25mm のコア供試体を加工したダンベル型供試体（引張域：80mm）の引張試験から求めた引張強度は、表－5.4 に示すように平均  $1.59\text{N/mm}^2$  であり、前述の割裂試験から求めた引張強度  $3.3\text{N/mm}^2$  のおよそ半分であった。割裂供試体では引張破壊域は中央部分に強制されているが、ダンベル型供試体では 80 mm の引張域の最弱部分で破壊が生じること、供試体の引張域の寸法が異なること、コア採取により骨材界面が影響を受けていることが、この引張強度の測定値の差の原因と考えられるが、今後のさらに検討が必要である。

表－5.4 引張試験結果

供試体 番号	ひび割れ幅 (mm)	引張強度 $\text{N/mm}^2$	破壊箇所	備考	
				ブロック 供試体	注入時の ひび割れ方向
No.1	0.58	1.51	母材	RC	垂直
No.2	1.10	1.96	母材	RC	垂直
No.3	1.69	1.18	母材	RC	垂直
No.4	0.51	1.83	母材	RC	水平
No.5	1.22	1.91	母材	RC	水平
No.6	1.47	1.72	母材	RC	水平
No.7	1.71	2.16	母材	RC	水平
No.8	0.88	1.36	母材	無筋	垂直
No.9	1.27	1.56	母材	無筋	垂直
No.10	0.74	1.61	母材	無筋	垂直
No.11	0.33	1.40	母材	無筋	水平
No.12	0.66	1.49	母材	無筋	水平
No.13	0.92	1.71	母材	無筋	水平
No.14	0.58	0.88	母材	無筋	水平
No.15	0.82	1.58	母材	無筋	水平
平均	0.97	1.59			
最大値	1.71	2.16			
最小値	0.33	0.88			



写真－5.8 引張供試体の破壊状況(右側より No. 1)



写真－5.9 引張供試体の破壊状況(母材破壊)

### 5.3.2 曲げ試験

#### (1) 曲げ試験概要

円柱供試体の曲げ試験方法は標準化されていないため、図-5.5 に示すように、円柱状の供試体を支持する鞍型の治具を合板で作製（外寸 40mm×100mm，厚さ 12mm，円弧部分の直径 50mm）し，下側両端の治具の内寸を 200mm，上側の 2 枚の治具の内寸を 60mm とし，供試体をセットし，曲げ試験を行った。支点部の鞍型木製治具は，供試体の変形を拘束しないように，若干の回転を可能とした。試験状況を写真-5.10 に示す。

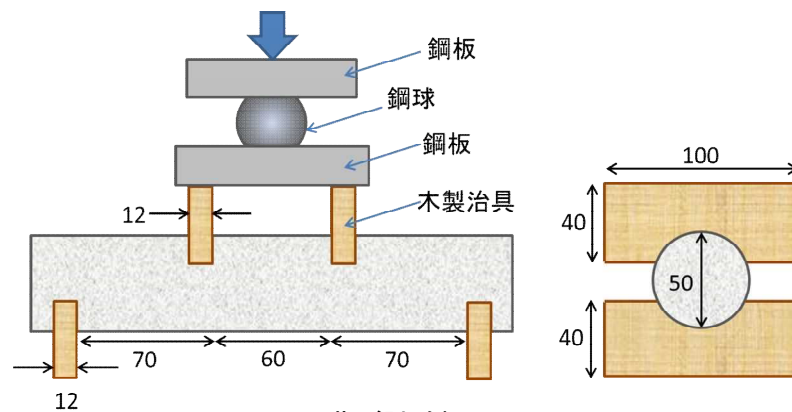


図-5.5 曲げ試験概要図



写真-5.10 曲げ試験状況



## (2) 曲げ試験結果

RC ブロック供試体から採取した直径 50mm のコア供試体 6 個 (No.1~No.6) と、無筋ブロック供試体から採取したコア供試体 6 個 (No.7~No.12) の曲げ試験を行なった。曲げ試験結果を表-5.5 に、試験後の供試体を写真-5.11、写真-5.12 に示す。

曲げ試験においては、引張試験と同様に、いずれの供試体においても樹脂充填部分やコンクリートと樹脂の界面での破壊は無く、コンクリート母材部で破壊した。ブロック供試体の貫通したひび割れ、閉じたひび割れの違いや、注入時のひび割れの方向に影響されず、母材破壊していることが確認できた。

支点部の鞍型木製治具の中央に荷重が作用していると仮定して、平均曲げ破壊荷重から曲げ強度を算出すると  $5.81\text{N/mm}^2$  であり、圧縮強度から通常推定される曲げ強度(圧縮強度の  $1/7$  として  $6.12\text{N/mm}^2$ )とほぼ同等の数値となった。

表-5.5 曲げ試験結果

供試体 番号	ひび割れ幅 (mm)	曲げ破壊 荷重(kN)	破壊箇所	備考	
				ブロック 供試体	注入時の ひび割れ方向
No.1	0.32	2.5	母材	RC	垂直
No.2	0.76	1.6	母材	RC	垂直
No.3	1.32	1.5	母材	RC	垂直
No.4	0.47	2.2	母材	RC	水平
No.5	0.77	2.2	母材	RC	水平
No.6	0.98	1.8	母材	RC	水平
No.7	1.10	2.0	母材	無筋	垂直
No.8	1.37	2.2	母材	無筋	垂直
No.9	0.44	1.9	母材	無筋	水平
No.10	0.77	2.1	母材	無筋	水平
No.11	0.98	2.0	母材	無筋	水平
No.12	1.31	2.4	母材	無筋	水平
平均	0.88	2.0			
最大値	1.37	2.5			
最小値	0.32	1.5			



写真-5.11 50mm コア曲げ供試体の破壊状況 (全体)





写真－5.12 25mm コア引張供試体の破壊状況(一例)

### 5.3.3 引張試験と曲げ試験による樹脂付着性能の評価

ひび割れにエポキシ樹脂を注入した供試体を用いて、引張試験や曲げ試験を行った結果、いずれの供試体においても、コンクリートの母材で破壊し、充填された樹脂部や、コンクリートと樹脂の界面では破壊しなかった。

今回の試験条件では、ひび割れは試験室で新たに導入したものであり、ひび割れ内部に析出物など樹脂注入を阻害する不純物が無い状態で適正に注入材が充填されており、樹脂充填部の付着強度は、コンクリート部の引張強度よりも大きいことが確認された。このことから、注入された樹脂の付着性能を評価するための試験方法として、引張試験と曲げ試験がいずれも、ひび割れに充填された樹脂の付着性能を判定する有効な試験であると言える。

実構造物に発生しているひび割れは、中性化、塩害などのコンクリート自身の劣化や、通行車両による疲労劣化、基礎の沈下など外力によるものなど、様々な要因により発生する。また、構造物の置かれる環境や管理者の経済事情により、早期にひび割れが発見され手当される場合や、劣化し相当な時間が経過したものなど様々な状態が想定される。このようなひび割れにひび割れ注入を行う場合、室内で再現したひび割れとは異なり、経年に伴いひび割れ面の風化や析出物によるひび割れ閉塞などが影響し、樹脂充填のムラの発生や、コンクリートと樹脂の付着を阻害することも考えられるため、この劣化状態で樹脂注入した場合、本試験を適用するとコンクリート母材での破壊ではなく、樹脂や界面で破壊すると想定される。現在は、補修工法として注入工法を選定した場合、充填されていれば構造物の機能が回復したとして取り扱われ、ひび割れ内部の付着阻害要因による付着性能の低減は考慮されないが、阻害要因の状況と付着性能の関係を調査するためには、本試験が有効であると考えるが、今後さらに、付着阻害となるひび割れ内部の析出物等の程度と付着の関係などについて研究を進めたい。

実構造物への適用は、コア抜きの方角についても工夫が必要となる。コア抜きをした場合、通常ひび割れ方向は、割裂試験を行った状態と同じような方向にひび割れがある。図－5.5 に示すように、構造物からコア採取した後、コアをコンクリートにてブロック状に成形し、再度コア採

取する。この採取方法により、構造物からひび割れ面に沿って際採取したコアに対し、ひび割れ面がコアの真ん中に位置するようにコア採取することができる。

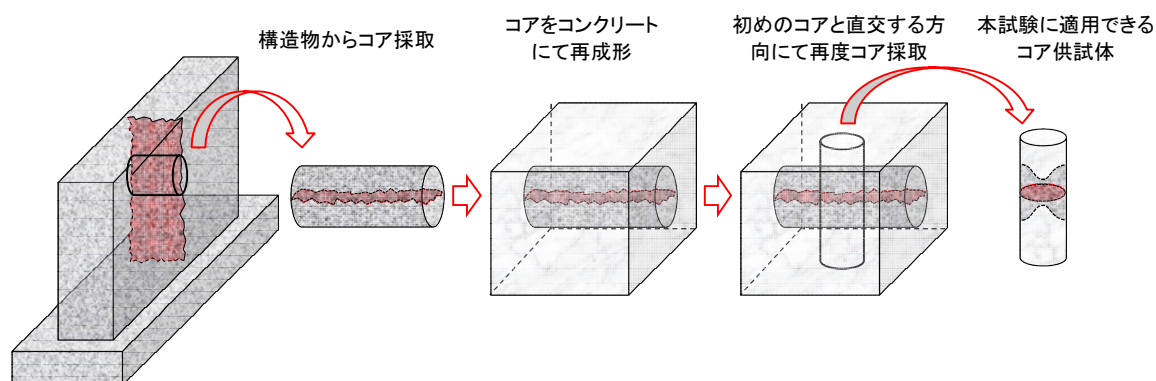


図-5.6 構造物からのコア採取工法

#### 5.4 まとめ

コンクリート構造物のひび割れ部に充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂充填部を含むコア供試体（直径 25mm または 50mm，長さ 250mm）を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) ひび割れを導入した鉄筋コンクリート部材から切り出すことにより、先端が閉塞したひび割れを有する RC ブロック供試体と、コンクリート供試体を割裂することにより、貫通したひび割れを有する無筋ブロック供試体が、樹脂注入試験を行うための供試体に適用できることが分かった。
- (2) 樹脂注入されたひび割れを含むコア供試体を HPFRCC を用いてダンベル型供試体へ加工し、ダンベル型引張試験機により引張試験を行うことで、確実に充填された注入においては、樹脂の付着がコンクリート母材以上であることを確認した。
- (3) 樹脂注入されたひび割れを含むコア供試体を、合板製の鞍型治具を用いて曲げ試験することで、確実に充填された注入においては、樹脂の付着がコンクリート母材以上であることを確認した。
- (4) 樹脂の付着性能を評価するための試験方法として、引張試験、曲げ試験の両者とも有効であった。
- (5) 本実験で用いた樹脂材料と注入工法の場合、ひび割れの先端が閉じている場合でも樹脂が充填されていた。

【参考文献】

- 1) コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2009：公益 社団法人日本コンクリート工学会，pp.120-123
- 2) 村中智幸ほか，実構造物におけるひび割れ注入後の品質管理に関する検討，平成 24 年度技術研究発表会，2013.2
- 3) 土木学会技術評価第 9 号：鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法（IPH システム）の設計施工法，2011.6
- 4) 渡邊祥庸，二羽淳一郎，日野篤志，加川順一：内圧充填接合補強工法による RC 柱の補修効果の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.33，No.2，pp.1381-1386，2011.7
- 5) 柿澤雅樹，藤田征也，六郷恵哲：コンクリートのひび割れの収縮に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.1906-1911，2014.7
- 6) 田中僚，佐藤あゆみ，浅野幸男，六郷恵哲：小型棒状試験片を後成形したダンベル型供試体による各種断面形状の HPFRCC と UFC の引張性能の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.298-303，2014.7

## 第 6 章 模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と樹脂注入性評価への利用

### 6.1 はじめに

ASR は、骨材中のアルカリ反応性鉱物とコンクリートのアルカリ性細孔溶液中の水酸化アルカリ（KOH や NaOH）が化学反応して起こる。反応性骨材の周辺に反応生成物（アルカリシリカゲル）を生成し、これが水分を吸水することにより膨張し、膨張圧によってコンクリートにひび割れを生じさせる。ASR によるコンクリートの膨張及びひび割れの進行は、水分及びアルカリが供給される条件下で長期にわたってゆっくりと進行するのが一般的である。また、ひび割れ形状は環境条件及び鉄筋、外部拘束による拘束条件の影響を大きく受け、拘束の小さな無筋コンクリート構造物の表面では網目状・亀甲状のひび割れとされ、鉄筋コンクリート及び PC コンクリート構造物では、軸方向鉄筋や PC 鋼材に沿った方向性のあるひび割れが発生するとされている。コンクリートの内部では、ひび割れは主体的に網目状となっていると考えられるが、十分には把握されていない。亜硝酸リチウムなどを用いた膨張抑制技術が比較的多く研究<sup>1),2)</sup>されているものの、膨張進行が収束した後の機能回復に関する研究は少なく、ひび割れへの樹脂注入性能に関して解明されていないのが現状である。ASR ひび割れに樹脂を注入して、ひび割れを固定できれば、内部のひび割れの解明が進むことが期待できる。

本研究では、ASR によるひび割れを室内において早期に再現するため、模擬膨張骨材を用いたコンクリートについて提案するとともに、模擬膨張骨材を用いた供試体を作成し、再現した ASR ひび割れに樹脂注入を実施し、補修工法として樹脂注入の適用性について評価を行った。

### 6.2 模擬膨張骨材

#### 6.2.1 模擬膨張骨材の概要

鉄筋破断の機構解明として、鉄筋応力に着目した ASR による膨張を模擬するため、膨張性球状塊を適用した既往の研究がある<sup>3)</sup>。膨張性球状塊とは、膨張材と細骨材と遅延剤に少量の水を添加して混練し、球状に造粒させた人工粗骨材である。

本研究では、ひび割れ形状に着目した ASR によるひび割れを再現するため、複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(High Performance Fiber Reinforced Cement Composite、以下 HPFRCC)を用いて反応性骨材を模擬する模擬膨張骨材を提案する。HPFRCC に静的破砕剤を一定量混入し、骨材の粒状（粒径 20～25mm）に成形したものであり、写真－6.1 に示す。HPFRCC は静的破砕剤による膨張で模擬膨張骨材自体が分裂しないように、つまり模擬膨張骨材を用いてコンクリートを練り混ぜた際に、粗骨材としての役割を果たせるためである<sup>4)</sup>。



写真-6.1 模擬膨張骨材

### 6.2.2 模擬膨張骨材の作製

模擬膨張骨材の制作において、模擬膨張骨材中の静的破碎剤の添加量を  $50\text{kg/m}^3$ （以下、模擬骨材 A）、 $100\text{kg/m}^3$ （以下、模擬骨材 B）の 2 種類を作製した。模擬膨張骨材の配合を表-6.1 に示す。この配合における理論密度は、骨材中の空気量をゼロして、 $2.074\text{g/cm}^3$  と算出される。

静的破碎剤はふるい分けを行い、 $0.6\text{mm}$  以下のものを用いた。模擬膨張骨材の練混ぜにはオムニミキサー（写真-6.2）を使用し、型枠には加工したプラグトレイ（写真-6.3）を用いて模擬膨張骨材を作製した。プラグトレイとは、一般に農業の育苗に用いる材料で縦横  $2.1\text{cm}$  に区切られた四角すいの形状をしたトレイである。今回の模擬骨材作製のための型枠として用い、深さ  $34\text{mm}$  のプラグトレイを深さ約  $15\text{mm}$  まで電熱線で切断し、平らな面を養生テープで覆い、切り口から一つずつ打設した。打設状況と完成した骨材を写真-6.4、写真-6.5 に示す。また、脱型後は供試体打設まで湿布養生を行った。

表-6.1 模擬膨張骨材の配合

骨材 種類	W/C (%)	単位 (kg/m <sup>3</sup> )									理論 密度 (g/cm <sup>3</sup> )
		W	C	Ls	珪砂		静的 破砕剤	高性能 AE 減水剤	増粘剤	纖維	
					6号	7号					
模擬骨材A	50	390	780	234	202	303	50	9.13	1.01	12.13	2.074
模擬骨材B					183	275	100				



写真-6.2 オムニミキサー

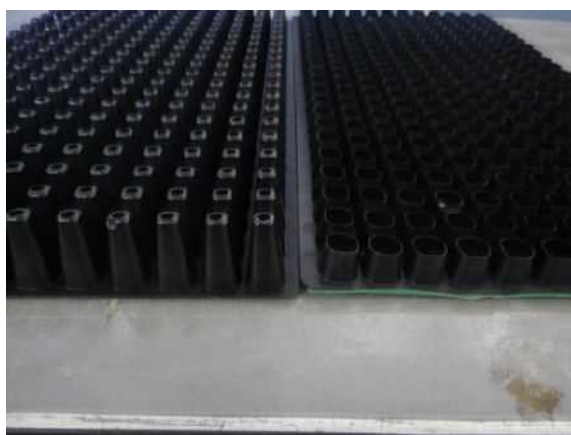


写真-6.3 プラグトレー  
加工前（左） 加工後（右）



写真-6.4 模擬膨張骨材打設状況



写真-6.5 模擬膨張骨材



## 6.2.3 円柱供試体による模擬膨張骨材の膨張確認

模擬膨張骨材の膨張性能を確認するため、円柱供試体(直径 100mm×高さ 200mm)を作成した。模擬膨張骨材中の静的破砕剤の添加量は、模擬骨材 A (50kg/m<sup>3</sup>)、模擬骨材 B (100kg/m<sup>3</sup>) の 2 種類について比較した。円柱供試体のコンクリート配合を表-6.2 に示す。模擬骨材 A および B の 1m<sup>3</sup> 当たりの混入量は、粗骨材の 10%置換、30%置換、50%置換とし、それぞれ A-10、A-30、A-50 および B-10、B-30、B-50 とした。模擬膨張骨材の粒径から、粗骨材 G1 を優先して置換し、G1 が不足する置換率 50%では一部を G2 で置換した。

表-6.2 模擬膨張骨材を用いたコンクリート配合




名称	W/C (%)	単位 (kg/m <sup>3</sup> )							粗骨材 置換率	
		W	C	S	G 1	G 2	G 3	G 4		A E 減水 剤
					25 ~15	15 ~5	模擬 骨材 A	模擬 骨材 B		
A-10	55	165	300	809	200	697	76	—	0.94	10%置換
A-30					1	697	229	—		30%置換
A-50					0	498	382	—		50%置換
B-10					200	697	—	76		10%置換
B-30					1	697	—	229		30%置換
B-50					0	498	—	382		50%置換

模擬膨張骨材を用いたコンクリートの養生は、ひび割れの発生状況に大きく影響を与えると考えられるが、ひび割れ発生に対する最適な養生方法が不明であるため、円柱供試体のひび割れ状況を確認しながら適宜養生を切り替えた。養生条件と試験結果を表-6.3、表-6.4 に示す。表中の骨材材齢とは、模擬膨張骨材の材齢であり、供試体材齢とは模擬膨張骨材を用いたコンクリートの材齢である。模擬骨材 A では、湿布、水中、気中 (40℃) の 3 種類のうち、気中 (40℃) 養生が最もひび割れが発生したため、模擬骨材 B では、水中養生に替えて気中 (20℃) を追加し、湿布、気中 (20℃)、気中 (40℃) の 3 種類の養生とした。

模擬骨材 A では、表-6.3 に示すように養生条件を材齢 1 日より湿布養生、材齢 4 日より気中 (40℃) 養生とした養生 3 のみひび割れが発生した。各円柱供試体材齢 6 日および 11 日のひび割れ状況を写真-6.6 に示す。模擬骨材の置換率が多い方がひび割れが顕著に発生したことがわかる。

表-6.3 模擬骨材 A の養生条件

骨材材齢 (日)	作製	1	2	3	4	5	6	7	8	9~	試験結果
供試体材齢 (日)	作製	1	2	3	4	5	6	7	8	8~	
A-10 A-30 A-50	養生1 (湿布)				湿布 (20℃)						ひび割れ無し ひび割れ無し ひび割れ無し
A-10 A-30 A-50	養生2 (水中)				湿布			水中 (20℃)			ひび割れ無し ひび割れ無し ひび割れ無し
A-10 A-30 A-50	養生3 気中 (40℃)				湿布			気中 (40℃)			ひび割れ発生 ひび割れ発生 ひび割れ発生

円柱供試体材齢 6日 (模擬骨材材齢 7日)		
10%置換	30%置換	50%置換
		




円柱供試体材令11日 (模擬骨材材令12日)		
10%置換	30%置換	50%置換
		

写真-6.6 模擬骨材 A 気中 (40℃) 養生の供試体





写真-6.7 模擬骨材 B 置換率 10%供試

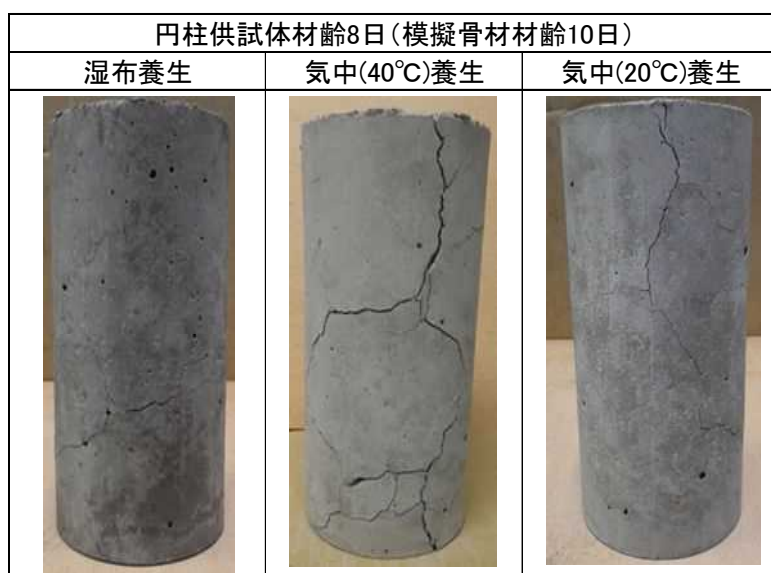


写真-6.8 模擬骨材 B 置換率 30%供試

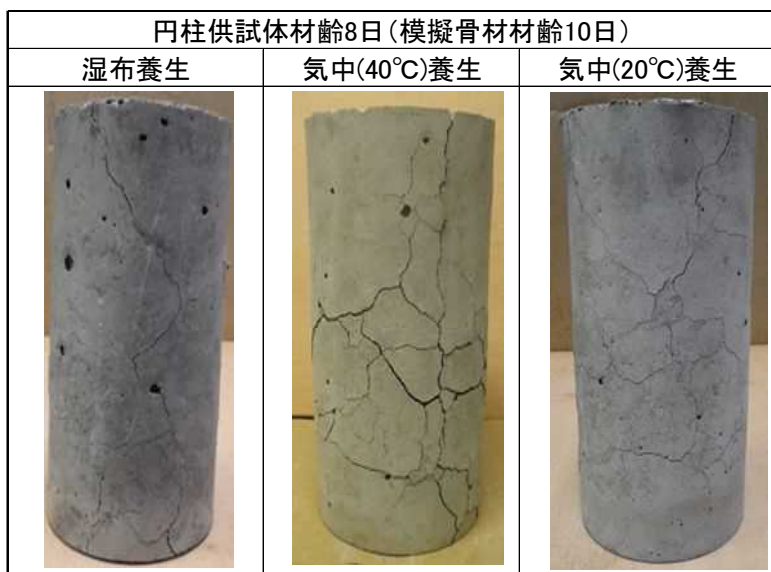


写真-6.9 模擬骨材 B 置換率 50%供試

### 6.3 版状供試体によるひび割れ確認

#### 6.3.1 試験概要

模擬 ASR ひび割れを発生させた供試体に、ひび割れ補修としてエポキシ樹脂を注入し、ASR ひび割れへ樹脂充填した場合の樹脂の充填状況を確認する実験を行った。試験の種類を表-6.5 に示す。模擬膨張骨材は、円柱供試体の試験結果から、模擬骨材 B（静的破砕剤混入量 100kg/m<sup>3</sup>、粗骨材置換率 50%）を採用した。模擬膨張骨材による ASR ひび割れの形状を比較するため、静的破砕剤を直接粗骨材置換する供試体を用いた注入試験（試験 No.1）と、実際の ASR 反応性骨材を使用し ASR ひび割れを導入した供試体を用いた注入試験（試験 No.3）を併せて実施した。試験 No. I の配合表を表-6.6 に示す。なお、ASR 反応性骨材を用いた供試体は、本研究室で別途作成し、既に ASR ひび割れが導入済みの供試体<sup>5)</sup>を使用するため、供試体作成方法などは本論文の範囲外のため省略する。

表-6.5 注入試験種類

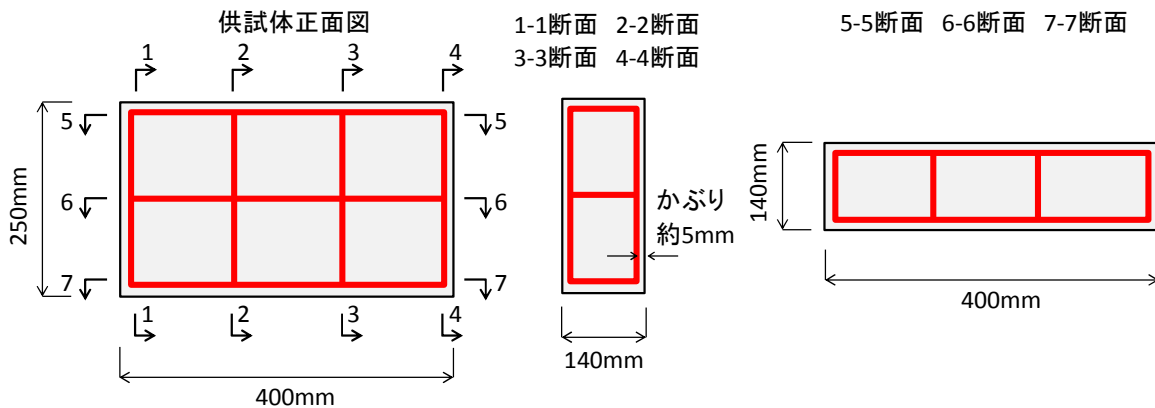
試験No.	使用膨張骨材	備考	注入面
No.1	静的破砕剤	静的破砕材(9.1kg/m <sup>3</sup> )を直接コンクリートに混入し供試体を作成	片面
No.2	模擬膨張骨材	模擬骨材Bを用いてコンクリート供試体を作成(静的破砕剤は供試体コンクリート1m <sup>3</sup> 当たり18.4kgに相当)	両面
No.3	ASR反応性骨材	反応性骨材を用いて既にASRひび割れを導入した供試体	両面

表-6.6 試験 No. I のコンクリート配合

No.1配合	W/C (%)	単位 (kg/m <sup>3</sup> )					
		W	C	S	G	静的破砕剤	AE 減水剤
静的破砕剤使用	55	180	327	833	901	9.1	1.023

### 6.3.2 版状供試体の作成

静的破砕剤および模擬膨張骨材を使用する版状供試体は、図－6.1 に示すように、400mm×250mm×140mm とした。供試体に亀甲状ひび割れが発生した際に、供試体が分裂しない程度に最小限の異形鉄筋（D6）を配置した。供試体長手方向に対し鉄筋比  $pt=0.5\%$  程度となるが、亀甲状ひび割れを発生させるために、かぶり 5mm と可能な限り供試体外周部に配置した。



図－6.1 版供試体作製概要図

養生条件は、円柱供試体の試験結果から気中（40℃）養生が最もひび割れが発生することが確認できたが、版状供試体では供試体寸法が大きく気中（40℃）養生の温度の維持が困難であったため、気中（20℃）養生を標準とし、ひび割れの発生状況を確認しながら、材齢 2 日まで気中（20℃）養生、材齢 3 日で一度水中養生とし、材齢 4 日から再び気中（20℃）養生に切り替えたところ、ひび割れの進展が確認できた。

ASR 反応性骨材を用いた供試体は、別途研究で使用した供試体であり、100×200×1100mm の寸法の供試体を使用した。

版状供試体の写真を写真－6.10～写真－6.12 に示す。





写真－6.10 試験 No. 1 供試体（静的破砕剤使用時供試体）



写真－6.11 試験 No. 2 供試体（模擬膨張骨材使用時供試体）



※ひび割れへマーキング記載有り

写真－6.12 試験 No. 3 供試体（ASR 反応性骨材を使用した ASR ひび割れ供試体）

### 6.3.3 樹脂注入および切断

版状供試体に導入したひび割れへの樹脂注入は、既存の低圧注入工法<sup>6),7)</sup>を適用した。高流動性エポキシ樹脂を  $0.06\text{N/mm}^2$  の低圧にてひび割れに注入することで、 $0.1\text{mm}$  以下のひび割れへも充填可能とされている工法である。

注入位置にドリル削孔（孔径  $7\text{mm}$ 、深さ  $70\text{mm}$  程度）し、注入用台座を設置した後、供試体全体を速硬性モルタルでシールした。モルタルが硬化した後に、注入器具を台座に取り付け、エポキシ樹脂を低圧注入した。樹脂注入状況を写真-6.13 に示す。注入箇所は概ね注入面  $0.02\text{m}^2$  毎に 1 本程度とし、静的破砕剤、模擬膨張骨材の供試体は 2 本／面、ASR 反応性骨材の供試体は 10 本／面とした。当該工法は、硬化時に加圧養生が必要なため、加圧した状態で 3 日間静止し、注入完了とした。



試験 No. 2 供試体（模擬膨張骨材使用供試体）  
（試験 No. 1 供試体も同様な状況）



試験 No. 3 供試体  
（ASR 反応性骨材使用供試体）

写真-6.13 エポキシ樹脂注入状況

供試体内部の樹脂の充填状況を確認するため、各供試体をブロック状に切断した。切断したブロックの寸法および切断面の名称を図-6.2 に示す。切断面は、互いに面する2面あるうち、注入面側を向く面を観察することとした。例えば、供試体 No.1 の断面1は、ブロック1側とブロック2側の2面あるうち、注入面側を向いているブロック2側の面を観察面とした。

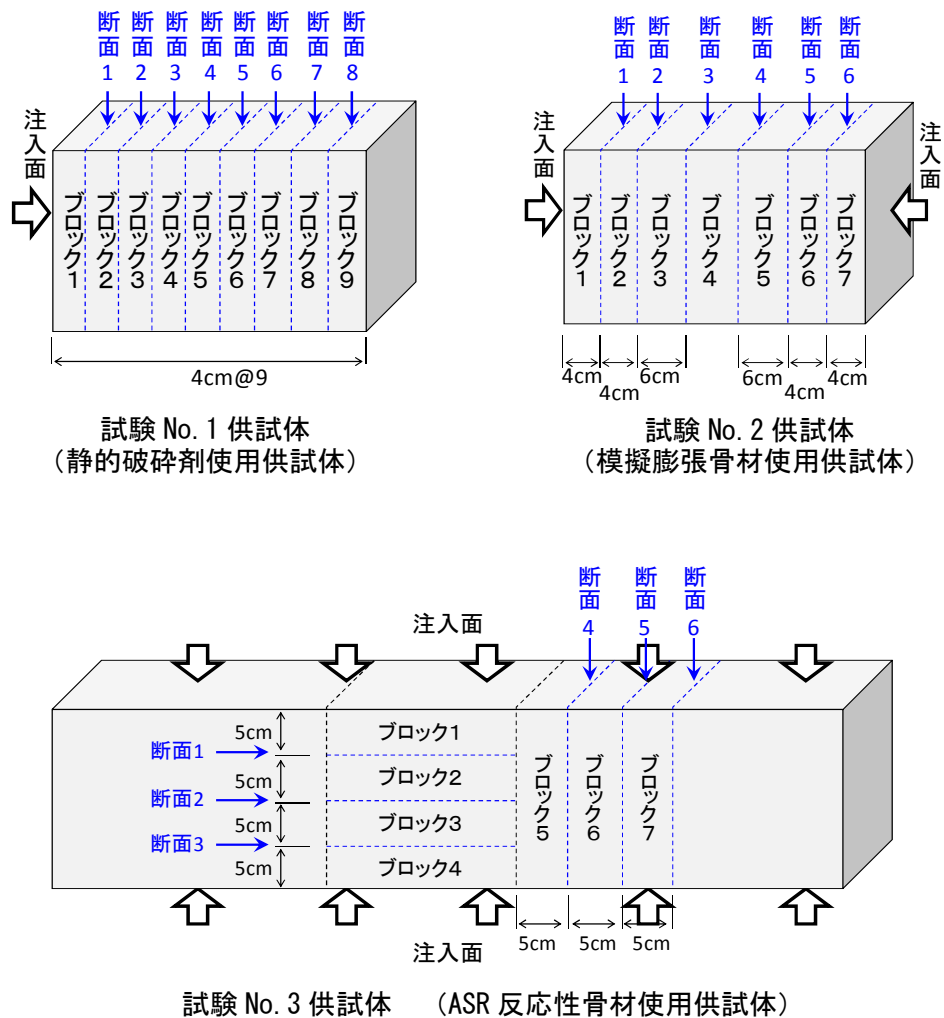


図-6.2 樹脂注入状況確認用の切断形状

### 6.3.4 画像処理による注入評価

紫外線で白く発光する性質を利用し、コンクリート切断面に紫外線を照射した状態でデジタルカメラにより撮影し、写真を画像処理により発光部分と非発光部分の面積比率として算出する。画像処理で樹脂以外の部位が発光（例えば繊維）した場合、樹脂として認識されるが、樹脂注入の状況を判定する上で問題の無い程度として扱った。また、供試体端部は樹脂溜まりの影響を避けるため、画像の上下左右約 2cm 程度をトリミングし、断面中央付近で樹脂注入の評価を行った。

#### (1) 静的破碎剤を使用した供試体（試験 No. 1）

画像処理状況を次頁の図-6.3 に示す。図-6.3 の左は供試体断面の写真，中央は紫外線を照射した写真，右は中央の写真を画像処理により樹脂部分を白，それ以外を黒に表示した画像である。断面 1 および断面 4 では供試体断面全体にひび割れが分布しており，そのひび割れに樹脂が充填されている。目視でも確認できないような微細なひび割れについても，紫外線を照射することで樹脂が充填されている状況が確認できる。断面 9 は，右半分においてひび割れが比較的大きいにもかかわらず注入されていなかった。

図-6.4 は，断面 1 が注入面に近い断面，断面 8 が注入面から最も遠い断面として，画像処理結果から求まる画像中の樹脂比率をグラフ化したものである。断面 4（注入面から 16cm）では，充填量は注入面近傍の断面 1 に対して 8 割程度に低下し，断面 8（注入面から 32cm）では 4 割程度まで低下していることがわかる。これより，ひび割れ幅が比較的大きくても，注入口から遠ざかる程，樹脂の注入量が低下していくことがわかる。

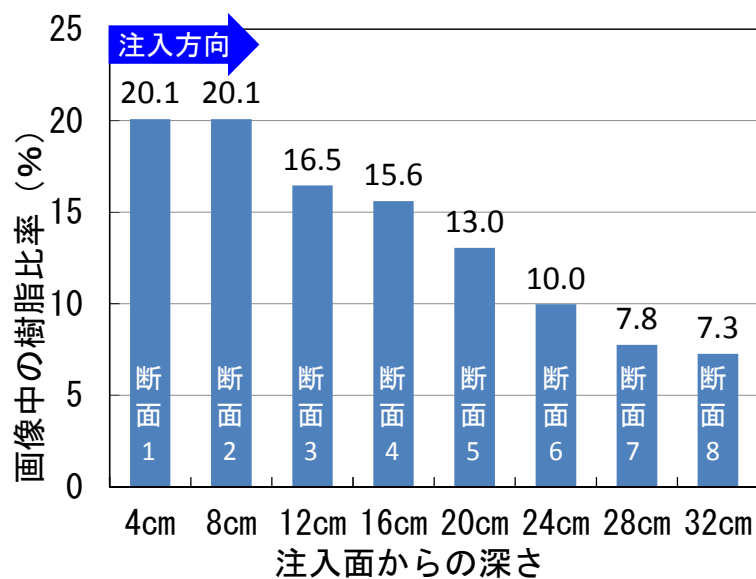
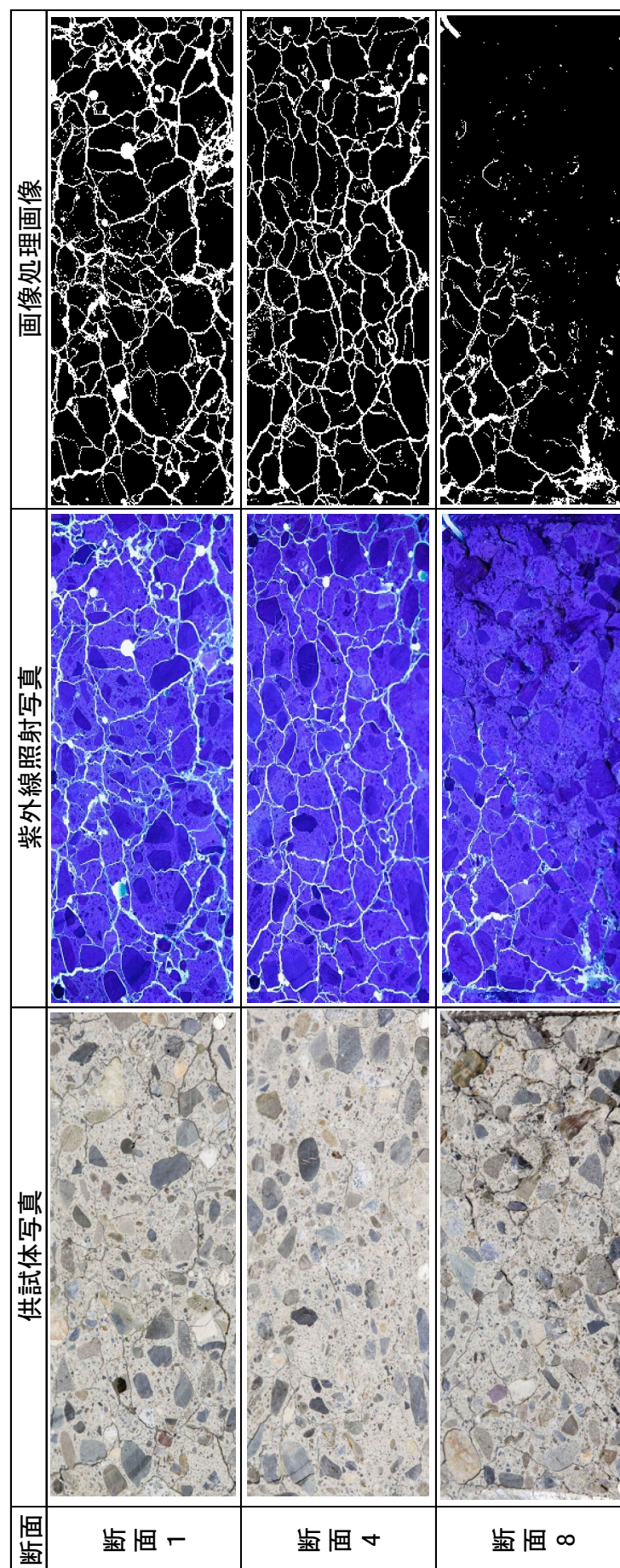


図-6.4 試験 No. 1 樹脂注入評価

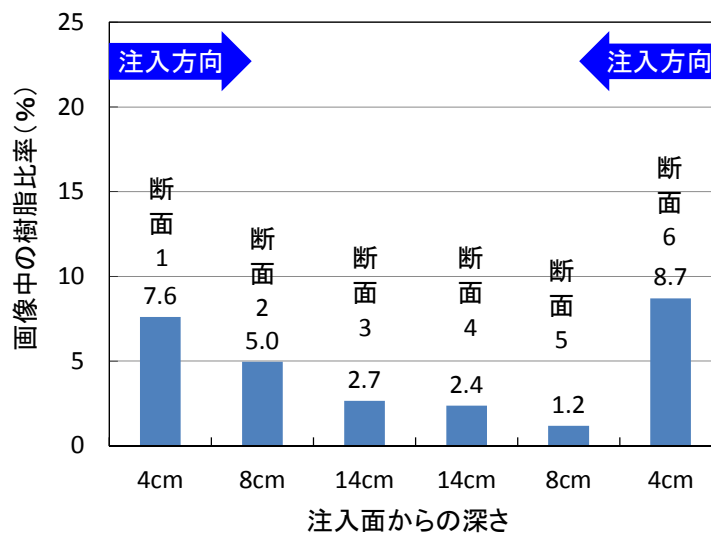




図一6.3 試験 No. 1 静的破砕剤使用供試体画像処理


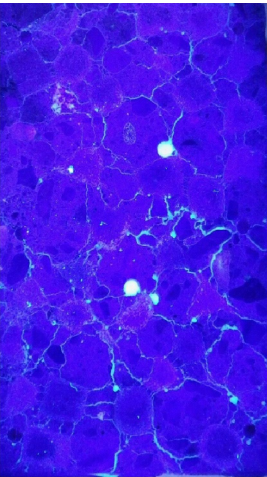
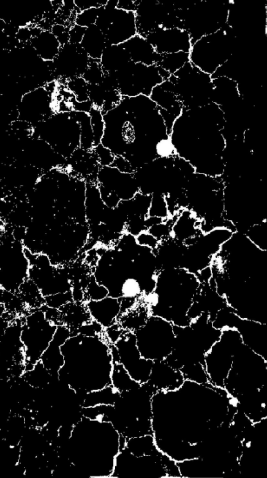
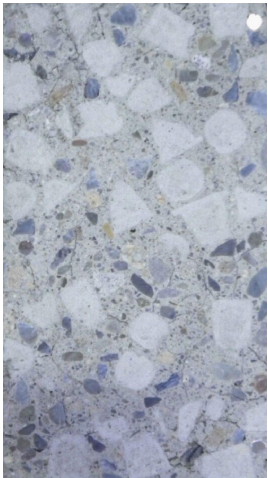
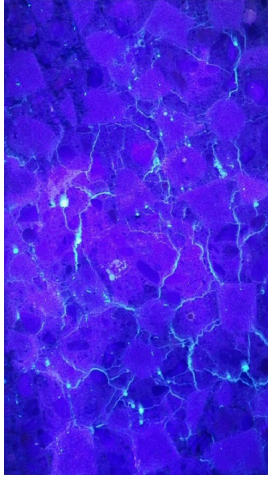
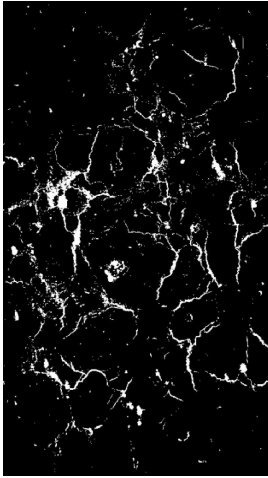

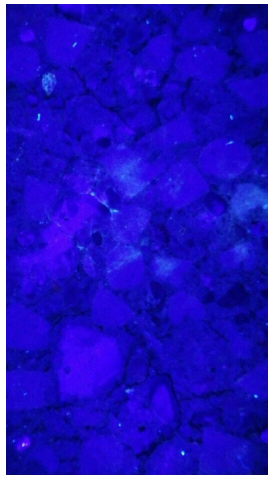
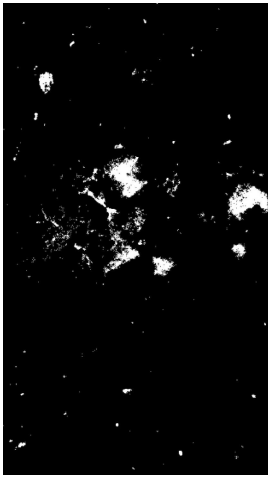
## (2) 模擬膨張骨材を用いた供試体（試験 No. 2）

模擬膨張骨材を用いた供試体断面の画像処理状況を次頁の図－6.5 に、画像処理による樹脂充填状況を図－6.6 に示す。図－6.5 より、断面 1, 2 は断面中心付近（注入孔周辺）は樹脂の充填が確認できるが、断面外周部はあまり充填されておらず、断面 3 では断面全体がほとんど充填されていないことがわかる。図－6.6 から、両側注入のため断面 1 と断面 6 では樹脂充填が確認できるものの、注入面から離れた距離にある断面では大きく充填量が低下し、注入面から 14cm の深さとなる断面 3, 4 では、注入面付近の断面 1 や断面 6 の 3 分の 1 程度しか充填されていないことがわかる。



図－6.6 試験 No. 2 樹脂注入評価



断面	供試体写真	紫外線照射写真	画像処理画像
断面 1			
断面 2			
断面 3			

図一6.5 試験 No. 2 模擬膨張骨材使用供試体画像処理

## (3) 実 ASR 反応性骨材を用いた供試体（試験 No. 3）

図-6.7 に注入面に横断方向に切断した断面，図-6.8 は注入面に縦断方向に切断した断面を示す。

注入方向に対し横断面に切断した断面 1～3 は，断面を目視するとひび割れが確認できるが，注入口周辺に局所的に樹脂が充填されるものの，断面全体ではほとんど樹脂が充填されていなかった。注入方向に縦断面に切断した断面 5 は，注入孔とすぐ近傍のみ樹脂が充填されているに留まり，断面のほとんどが未充填となっていた。図-6.9 から，樹脂の充填は注入面近傍のみ樹脂が充填され，注入口から遠い供試体中心部で充填されにくい傾向がわかった。注入面から 10cm の深さにある断面 2 では，注入面付近の断面 1 や断面 3 の 50 分の 1 程度まで低下していることがわかる。

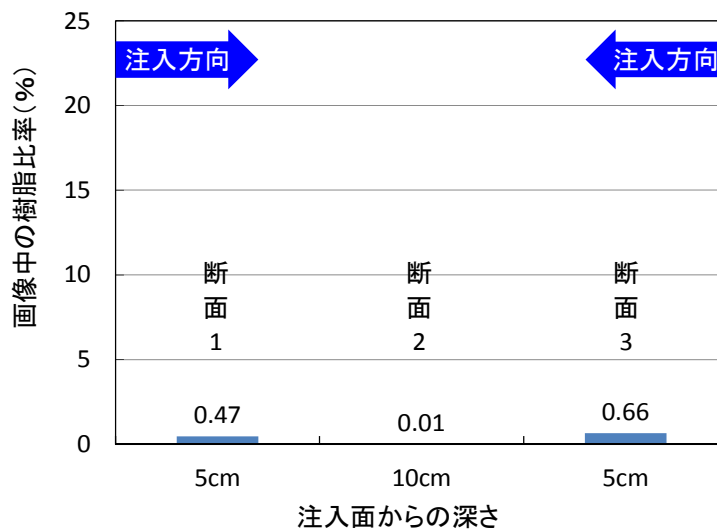
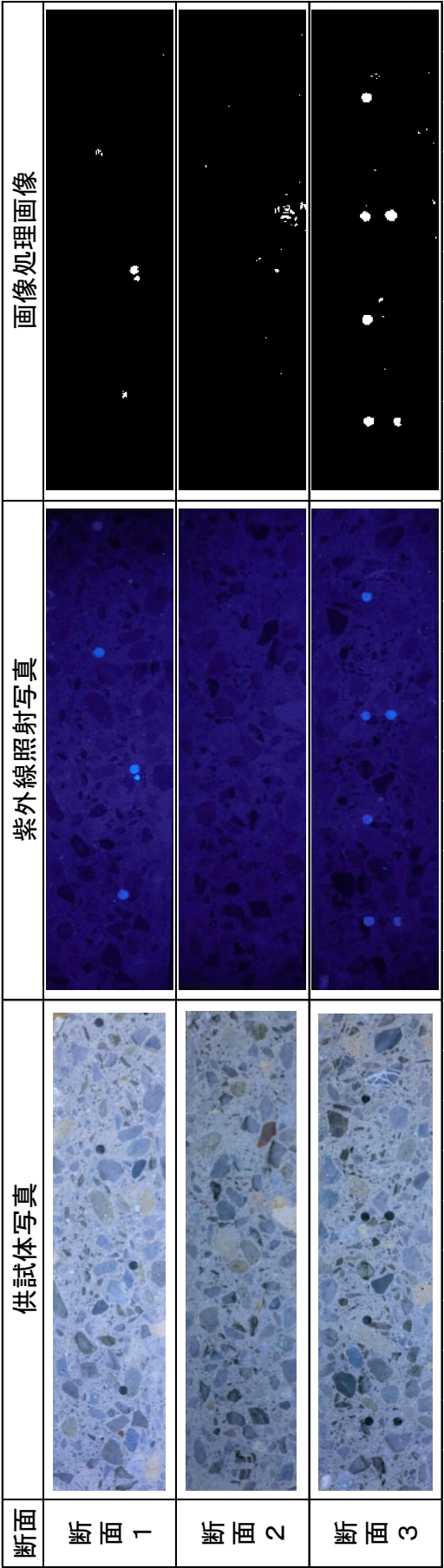


図-6.9 試験 No. 3 樹脂注入評価



図一6.7 試験No.3 ASR 反応性骨材使用供試体（横断面）



図一6.8 試験No.3 ASR 反応性骨材使用供試体（縦断面）

## 6.4 版供試体の充填状況の比較

試験 No.1 の静的破砕剤を用いた供試体では、微細なひび割れが比較的連続して発生しているため、樹脂注入も注入面から奥行き方向に深く注入している状況が確認できた。1 方向から注入した際、注入孔から横方向および深さ方向に広く充填されたが、最深部では供試体断面の半分程度が未充填であり、供試体全体を充填するには至らなかった。

試験 No.2 の模擬膨張骨材を用いた供試体では、注入孔近傍は比較的充填されていたが、注入孔より遠い箇所や深部はほとんど未充填であった。

図-6.10 に試験 No1 と試験 No2 のひび割れ箇所の拡大写真および画像処理図を示す。試験 No.1 は、モルタル部分で主体的にひび割れが発生し、ひび割れ同士が連続している様子が分かる。これは、静的破砕剤がモルタル部分に細かく分散して混入されているためである。一方で試験 No2 のひび割れは、粗骨材の位置から放射状にひび割れが発生し、隣り合う粗骨材が近い場合にひび割れ同士が結合していることが分かる。ひび割れ注入においては、注入用に設けた注入口と連続したひび割れには充填されたものの、供試体全体では多くのひび割れが不連続の状態であったため、注入口から遠ざかるほど未充填となったと考えられる。

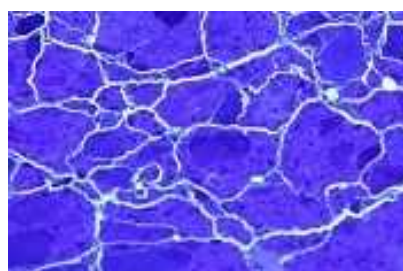
試験 No.3 の実際の ASR 反応性骨材を使用した供試体は、注入孔の極めて近い範囲のみ充填され、外周部や深部ではほとんど充填されていなかった。ASR ひび割れも、骨材周辺にある反応生成物が水分吸水に伴う膨張圧でひび割れが発生するが、この粗骨材周辺のひび割れが供試体全体では不連続であったと考えられる。

注入による充填状況から ASR の模擬ひび割れを評価した場合、ひび割れの不連続性から、試験 No.1 より試験 No.2 の模擬膨張骨材を使用した供試体の方が、ASR ひび割れに近いひび割れ状態と言える。しかしながら、注入量や注入位置からの距離による低下傾向にはまだ大きな差があるため、今後の研究として解明していきたい。また、模擬膨張骨材等により発生したひび割れの幅やその変化については数値的な計測を行っていないため、注入における連続性を評価する意味からも、今後併せて明らかにしていきたい。

実際の ASR ひび割れに一般のひび割れ注入工法を適用する場合、今回の試験結果から、注入材の充填は注入孔のごく近傍までであり、深部では充填されないことが想定される。乾燥収縮ひび割れや温度ひび割れのように、ひび割れがコンクリート表面から構造物内部まで連続しているひび割れとは異なり、ASR によるひび割れは、膨張性粗骨材の周辺でひび割れが発生するが、必ずしも全てのひび割れが連続するとは限らず、不連続なひび割れが多いことに起因すると考えられる。このため、樹脂注入を行っても、注入孔と接するひび割れのみが充填され、不連続な状態のひび割れは未充填となったと言える。なお、ひび割れ同士に連続性があっても、その途中に樹脂が充填されないような微細なひび割れ幅であった場合も未充填となることも考えられる。



試験 No. 1  
静的破砕剤



試験 No. 2  
模擬膨張骨材

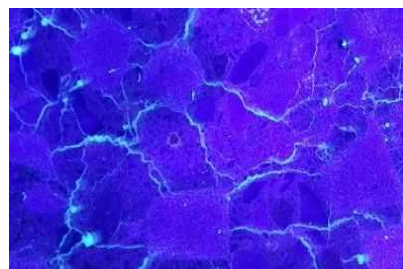
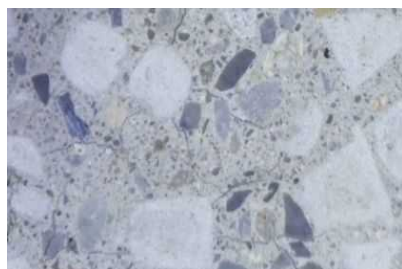


図-6.10 試験 No. 1 と No. 2 の断面比較

## 6.5 まとめ

HPFRCC に静的破砕剤を混入した模擬膨張骨材により，ASR ひび割れを室内で再現する提案を行った。ASR ひび割れを再現した供試体へひび割れ補修である樹脂注入を行った後，供試体を切断し，切断面において樹脂の充填状況を評価した。実際の ASR 反応性骨材を用いた供試体も同様に注入・切断し，切断面の比較を行った。その結果，以下の知見が得られた。

- (1) HPFRCC に静的破砕剤を混入し，粗骨材形状に整形した模擬膨張骨材を粗骨材と置換してコンクリートを作成することで，ASR ひび割れのような亀甲状のひび割れを再現できることがわかった。
- (2) 模擬膨張骨材を使用したコンクリートでは，模擬膨張骨材中の静的破砕剤混入量が多い方（本実験では 100kg/m<sup>3</sup>）がより大きく亀甲状のひび割れが発生することがわかった。
- (3) コンクリートに静的破砕剤を混入したものと，模擬膨張骨材を粗骨材置換して混入した供試体では，模擬膨張骨材の方がひび割れの不連続性が，実際の反応性骨材による ASR ひび割れに近いことがわかった。
- (4) ASR により発生したひび割れへ，既往の樹脂注入工法による補修を適用した場合，樹脂が十分に充填されないことが想定できることがわかった。

【参考文献】

- 1) 齊藤満・北川明雄・枷場重正：亜硝酸リチウムによるアルカリ骨材膨張の抑制効果，材料，Vol.40, No.468, pp.1375-1381, 1992.10
- 2) 江良和徳，岡田繁之，三原孝文，河原健児：亜硝酸リチウム高圧注入によるアルカリ骨材反応 抑制効果の検証，アップグレード論文報告集，第 5 巻，2005.10
- 3) 西村次男・岸利治・小田部裕一・田中泰司・魚本健人：膨張性球状塊の製造とアルカリ骨材反応の再現試験に関する基礎的検討，土木学会第 60 回年次学術講演会，V-001, pp.1-2, 2005.9
- 4) 河村将史・高田浩夫・浅野幸男・YUN Hyun-Do・六郷恵哲：水ガラスカレットや静的破碎剤粒子を混入したコンクリートや HPFRCC の膨張移動，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 15 巻，2015.10
- 5) 高木雄介ほか：ASR が RC 部材のせん断耐力に与える影響およびその補修に関するモデル実験，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 13 巻 413-42, 2013.11
- 6) 土木学会技術評価第 9 号：鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法（IPH システム）の設計施工法，2011.6
- 7) 公益社団法人土木学会：技術推進ライブラリーNo.9 鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法（IPH システム）の設計施工法に関する技術評価，2011.9



## 第 7 章 結 論

本論文における各章の結論、現状の課題および今後の展望について述べる。

### 7.1 各章の結論

#### 7.1.1 コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案

2 章において、閉口するひび割れへの FRP シートの追従性やバックリング現象を評価するための試験方法を提案した。中空塩化ビニル管を中心に配置したコンクリート供試体を 2 つに切断して、切断面を模擬ひび割れとした供試体を用いて、模擬ひび割れを跨いで FRP シートを貼付し、ひび割れが閉口する方向に軸力を供試体に加え、FRP シートに圧縮力を作用させた。幅 0.6mm から 5mm 程度のひび割れを対象として、FRP シートの閉口追従性をこの試験方法で評価した結果、FRP シートの厚さを 1.5mm とし、ひび割れ幅をパラメータとして変化させた時のバックリング現象は、ひび割れ幅の違いによらず、ほぼ同一なひび割れ閉口変位（今回の試験条件では 0.2mm 程度）で発生することを確認できた。また、FRP シートの厚さを 1.0mm から 4.5mm まで変化させたとき、FRP シートが厚い方が、バックリング現象発生時のひび割れ閉口変位が大きくなり、閉口ひび割れへの FRP シートの追従性が向上することが分かった。さらに、ひび割れ近傍の FRP シートの付着を無くし、無付着とすることで、閉口ひび割れへの FRP シートの追従性が向上することが分かった。80mm の無付着域を設けることで、バックリング現象は発生するものの、シートのはく離が発生しないことが分かった。実構造物においては、ひび割れの形状が直線ではなく、ひび割れ幅も同一ひび割れ内で大小様々に変化していることから、今回の試験による数値そのものを適用することはできないが、バックリング現象の発生の可能性の評価について、提案する試験方法は有効であると考ええる。

#### 7.1.2 光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究

3 章において、等方性材料である短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートを、RC 梁のせん断補強として適用したとき、異方性を有する連続繊維シートのせん断補強として用いられる計算式の適用性について検証を行った。また、等方性である光硬化型 FRP シートを、異方性を持たせた貼付をした時、シートの貼付面積 100%と 50%について、角度をパラメータとしてせん断試験を行った。その結果、等方性材料の光硬化型 FRP シートをせん断補強として梁に貼付したとき、連続繊維シートが部材軸となす角度  $\alpha_f = 45$  度（せん断耐力が最大値）として算出されるせん断耐力が適用できることが分かった。また、FRP シートの貼付面積 100%として、カッティングにより異方性を持たせたとき、今回の試験条件においては、異方性の角度を部材軸となす角度  $\alpha_f$  として算出したせん断耐力以上が期待できることが分かった。FRP シートの貼付面積 50%として、カッティングにより異方性を持たせたとき、今回の試験条件においては、シートの剥離が端部に達しやすい

ため、FRP シートの引張耐力を有効に発揮できず、異方性の角度を部材軸となす角度  $\alpha_f$  として算出したせん断耐力を下回ることが分かった。FRP シートを貼付した RC 梁では、せん断ひび割れ位置が載荷点から 135 度（45 度下向き）に引いた角度近づくことが分かった。この傾向は、FRP シートによりせん断強度が向上する試験パターンで見られ、FRP シートがひび割れ位置や角度に何らかの影響を与えていると推測されるが、その程度については今後検討の余地がある。

### 7.1.3 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

4 章において、剥落防止対策として用いられるシート系材料のうち、光硬化型 FRP シートを用いて、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、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。また、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。全ての試験タイプに対して、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。

### 7.1.4 コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価

5 章では、コンクリート構造物のひび割れ部に充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂充填部を含むコア供試体（直径 25mm または 50mm、長さ 250mm）を用いて引張試験および曲げ試験を行う方法を提案した。その結果、ひび割れへの樹脂注入を行う供試体の作成方法として、ひび割れを導入した鉄筋コンクリート部材から切り出すことにより、先端が閉塞したひび割れを有する RC ブロック供試体と、コンクリート供試体を割裂することにより、貫通したひび割れを有する無筋ブロック供試体が、樹脂注入試験を行うための供試体に適用できることが分かった。樹脂注入されたひび割れを含むコア供試体を HPFRCC を用いてダンベル型供試体へ加工し、ダンベル型引張試験機により引張試験を行うことで、確実に充填された注入においては、樹脂の付着がコンクリート母材以上であることを確認した。また、樹脂注入されたひび割れを含むコア供試体を、合板製の鞍型治具を用いて曲げ試験することで、確実に充填された注入においては、樹脂の付着がコンクリート母材以上であることを確認した。樹脂の付着性能を評価するための試験方法として、引張試験、曲げ試験の両者とも有効であった。

実際の構造物から採取したひび割れへ本試験を適用する際、採取した供試体から改めてひび割れを中央に配置するような円柱供試体を作製することが必要となり、今後、この作成方法を含めて検討を行っていく必要がある。

### 7.1.5 模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と 樹脂注入性評価への利用

6 章では、HPRFCC に静的破砕剤を混入した模擬膨張骨材により、ASR ひび割れを室内で再現する提案を行った。ASR ひび割れを再現した供試体へひび割れ補修である樹脂注入を行った後、供試体を切断し、切断面において樹脂の充填状況を評価した。実際の ASR 反応性骨材を用いた供試体も同様に注入・切断し、切断面の比較を行った。その結果、HPRFCC に静的破砕剤を混入し、粗骨材形状に整形した模擬膨張骨材を粗骨材と置換してコンクリートを作成することで、ASR ひび割れのような亀甲状のひび割れを再現できることが分かった。模擬膨張骨材を使用したコンクリートでは、模擬膨張骨材中の静的破砕材混入量が多い方（本実験では 100kg/m<sup>3</sup>）がより ASR ひび割れに近いひび割れが発生することが分かった。コンクリートに静的破砕材を混入したものと、模擬膨張骨材を粗骨材置換して混入した供試体では、模擬膨張骨材の方がひび割れの連続性が、実際の反応性骨材による ASR ひび割れに近いことが分かった。ASR により発生したひび割れへ、既往の樹脂注入工法による補修を適用した場合、樹脂が十分に充填されないことが想定できることが分かった。今後、ASR ひび割れに対して、樹脂注入を行う場合、ひび割れの連続性を確保するような工夫や、注入位置を注入面に対して分割するのではなく、構造物の奥行き方向を考慮して三次元的にブロック分けする工夫などが必要と考える。

## 7.2 樹脂材料の総評

### 7.2.1 光硬化型 FRP シートに関する総評

光硬化型 FRP シートは、紫外線を照射して硬化するため、短期間のうちにはく落防止の効果が発揮でき、補修材料として非常に有効な材料であると言える。維持管理における補修工事は、道路については、現在供用している箇所を一時的に通行止めもしくは車線規制などして対応することが多く、地域の物流を支える幹線道路や住民の生活道路であった場合は、工事のための規制にも制約がある。また鉄道の場合は、営業していない夜間のみで補修工事を行うことが多く、通電が停止している短い時間の中で補修を行うため、短期間で施工できることは非常にメリットが大きい。

また、透明であるため使用用途は、他の炭素繊維シートやアラミド繊維シートの適用箇所以上の範囲で使用できると考えられる。歴史的な価値を有する建設物は、従来の巻立てなどによる補強ではその歴史的価値の低下を招いてしまうため、構造物の風貌を残しつつ補強する必要がある。このような場合に、透明である光硬化型 FRP シートは、コンクリート面が見える状態で構造物を補修・補強できる材料と言える。このように、今まで無かった付加価値を有する新材料は、既存

の材料とは異なった使用目的や適用箇所に施工が要求されることが想定できる。2 章ではひび割れを跨いで貼付した場合のバックリング現象の発生、3 章では等方性材料としての耐震補強の既存構成式の適用について、4 章ではシート貼付面の水圧作用について述べたが、新材料を正しく評価するためには、単に既存の材料試験方法による評価では無く、新材料を正しく評価する新たな試験や、要求される新たな用途に対する試験方法の確立も同時に開発していく必要がある。

## 7.2.2 樹脂注入に関する総評

エポキシ樹脂注入の歴史は古く、広島県の実験ドームにおいて、1965 年の第 1 回保存工事でエポキシ注入が実施（広島県ホームページより）されるなど、半世紀以上に渡って施工されている技術である。エポキシ樹脂などの有機系材料の注入補修や、超微粒子セメントなどの無機系材料による注入補修は、構造物の補修工法として広く適用されており、特にエポキシ樹脂注入は 1 章で述べたいように、注入工法で最も適用される補修工法と言える。今後も構造物の老朽化が加速する中で、長寿命化のために主流となる工法であると想定される。

エポキシ樹脂とコンクリートの接着性能は良好であることは公知であるが、ひび割れ内の不純物の有無に対する付着性能の低下の程度については、あまり具体的な指標が無い。さらに、ASR によるひび割れの構造物内部の分布状況などについても、亀甲状と考えられるものの具体的な研究成果も無い。今後、このようなひび割れについて補修としてひび割れ注入を適用することが想定されるが、注入用の樹脂を開発・販売するメーカーは、ひび割れ内が健全な状態での樹脂の性能や浸透性について評価し、樹脂材料の品質として保証している。しかしながら、ひび割れ内の不純物の評価指標や、樹脂の付着性能の低減、不連続なひび割れにおける注入材料の適用性については、樹脂メーカーの守備範囲外として扱われる傾向にある。ひび割れの内部の評価や ASR ひび割れの分布を評価する技術については、材料メーカー主体でなく、研究機関が進んで行う必要があると考える。その際に、5 章で示したような樹脂材料で補修されたひび割れを直接引張試験を行う方法や、6 章で示した ASR ひび割れを模擬膨張骨材を使用して室内で供試体を作製する方法や、樹脂注入した後にスライスしてひび割れ分布を定量表示する方法などを発展させることで、樹脂の注入材料としての適用性が更に向上していくと考える。

## 7.3 今後の課題

### 7.3.1 光硬化型 FRP シートに関する今後の課題

光硬化型 FRP シートは、透明であるためシート貼付後もコンクリート面が観察できることに最大の魅力がある。同種材料の炭素繊維シートやアラミド繊維シートは、シート貼付後は全くコンクリート面が見えないため、補修部材の変状が目視確認できず、シートが大きく変位して変状に気が付くことがあるが、光硬化型 FRP シートは日常管理において、変状を目視確認で検査できる。一方で、透明であるからこそ、ガラス繊維に含浸させる樹脂材料、プライマー材料、貼付補助剤などの材料選定に、付着力やひび割れ追従性などの力学的な品質要求とともに透明性が要求されるため、必然と材料が限定され、価格も高価になってしまう。今後、材料開発の面で安価に透明

な材料が開発されれば、光硬化型 FRP シートの市場はさらに拡大すると考える。

光硬化型 FRP シートは、工場での製造過程においてガラス繊維に樹脂を含浸させたシートとして出荷される。このため、光硬化型 FRP シートの厚さとは、樹脂を含んだ厚さとなっており、樹脂を含まない炭素繊維シート・アラミド繊維シートの厚さより 3～10 倍程度厚い。耐震補強でシートを重ね貼りする際、光硬化型 FRP シートでは厚さが増してしまう。特に床板補強のように、格子に間隔を空けて 2 方向に貼付するような場合、2 方向のシート同士がラップ箇所とラップしない箇所の段差が顕著になる。FRP シートの厚さはシートの製造工程において、ガラス繊維のマットに樹脂が自然に含浸する厚さがそのままシート厚さとなる。そのため、ガラス繊維の目付量の増減に伴い FRP シート厚さが自然に決定されてしまい、厚さを選定する余地がない。また、重ね貼りをした場合、結果的に樹脂の厚さが厚くなり透明性が弱まる傾向にある。このことから、耐震補強においては、工場における FRP シートの製作過程において厚さを制御できるような製造方法を開発する必要があると言える。

FRP シートは、透明であるからこそ 2 章で述べたようなバックリング現象などのシートの浮きが目視で発見できる。FRP シート自体が損傷を受ける前段階の、浮きのみで変状が発見できることは、維持管理を行う上で早期発見となるため有利であると言える。FRP シートに浮きが発生した場合、FRP シート自体が破断していなければ、浮いた箇所を再接着できれば、はく落防止や耐震補強としての機能が回復する。このため、FRP シートの浮きを、FRP シートを剥がすこと無く樹脂注入するような対応で再接着する工法を確立できれば、維持管理を行う上で、FRP シートの優位性が向上できる。

### 7.3.2 樹脂注入に関する今後の課題

補修する構造物は、日本中の各建設地において個別に設計・施工・維持管理されてきた構造物であり、その構造物に様々な理由で発生したひび割れを補修対象としている。このため、全く同じひび割れというものは存在しないと言える。補修は対象構造物に対し、一つひとつ調査し、補修工法を選定する必要がある。構造物に直接手の届く位置まで接近できれば調査も比較的实施しやすいが、山間部の橋梁や河川橋など大がかりな足場が必要となる箇所もあり、一様なマニュアル通りの点検・補修工事は実質困難である。建設業に携わる人口が減少していく中で、老朽化が加速する構造物を維持補修するため、注入工法にも設計・施工・補修後の再劣化判定など全てにおいて効率化を考えていく必要がある。

例えば、軟弱地盤のセメント改良などの地盤改良技術は、大口径地盤改良など改良する範囲を大きくし、4 軸地盤改良機のように 1 回で改良する量を増やすなどして効率化に関する技術開発が進められている。また、軟弱地盤の薬液注入では、二重管ストレーナ方式や、二重管ダブルパッカー方式など、薬液を効率良く地盤内に注入する工法がある。一方で、コンクリートへのひび割れ注入は、注入圧力の作用方法、エア抜きなどの改良が行われてきたが、注入そのものの効率化については、まだ開発の余地があると考ええる。

また、6 章で示したように連続したひび割れに対しては有効なエポキシ樹脂注入であるが、ASR ひび割れのような不連続と考えられるひび割れについては、注入用に削孔した孔周りしか注入さ

れていない。不連続なひび割れについては，そのひび割れ状況を調査する技術と併せて，充填可能な注入技術の開発も望まれる。



## 【発表論文】

### (1)博士論文に含まれる内容

- 1) 柿澤 雅樹, 藤田 征也, 六郷 恵哲: コンクリートのひび割れの収縮に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1906-1911, 2014 (2 章に要約して掲載)
- 1') Masaki Kakizawa, Masaya Fujita, Kousuke Tanabe, Keitetsu Rokugo : Evaluation of buckling-behavior of UV-cured FRP repair-sheet due to narrowing concrete crack width, The 6th International Conference of Asian Concrete Federation(ACF), pp.234-237, 2014 (2 章に要約して掲載)
- 1'') Masaki Kakizawa, Kousuke Tanabe, Koichi Kobayashi, Keitetsu Rokugo : Buckling-behavior of UV-cured FRP repair-sheet due to narrowing concrete crack width, The Fifth International Conference on Construction Materials(ConMat'15), pp.2061-2070, 2015 (2 章に要約して掲載)
- 2) 柿澤 雅樹, 田邊 幸佑, 内田 裕市, 六郷 恵哲: 光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1555-1560, 2015 (3 章に要約して掲載)
- 3) 柿澤 雅樹, 西尾 亮人, 藤本 匠, 六郷 恵哲: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.1947-1952, 2016 (4 章に要約して掲載)
- 4) 西尾 亮人, 柿澤 雅樹, 六郷 恵哲, 小林 孝一: コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.441-446, 2016 (5 章に要約して掲載)
- 5) 柿澤 雅樹, 藤本 匠, 西尾 亮人, 六郷 恵哲, 小林 孝一: 模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と樹脂注入性評価への利用, 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, Vol.16, 2016 (6 章に要約して掲載)

## (2)研究活動によるその他の発表論文

- 1) 柿澤 雅樹, 山辺 正, 石山 宏二: 水の相変化を考慮した岩質材料の熱・応力・浸透連成挙動に関する研究, 土木学会第 51 回年次学術講演会, III-A322, pp.644-645, 1996.9
- 2) 山辺 正, 石山 宏二, 柿澤 雅樹: 水の相変化を考慮した砂岩の熱・応力・浸透連成挙動に関する研究, 土木学会第 52 回年次学術講演会, III-A315, pp.630-631, 1997.9.
- 3) 柿澤 雅樹, 西村 直人, 市川 晃央, 西村 和夫: コンクリート養生管理システムによるプラスチック収縮ひび割れの抑制, 土木学会第 68 回年次学術講演会, Vol.68, VI-030, 2013.9
- 4) 西村 直人, 市川 晃央, 柿澤 雅樹, 西村 和夫: セントル内の養生温度差が覆工の温度応力ひび割れに与える影響, 土木学会第 68 回年次学術講演会, Vol.68, VI-018, 2013.9
- 5) 西村 直人, 市川 晃央, 柿澤 雅樹, 西村 和夫: コンクリート養生管理システムの開発と実用化, 日本工業出版, 建設機械 2014 年 05 月号, 2014.5
- 6) 西尾 亮人, 田邊 幸祐, 柿澤 雅樹, 六郷 恵哲: コンクリートのコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価, 平成 26 年度 中部本部修習技術者研究業績発表会, [8], 2015.2

## 【謝 辞】

本論文は、筆者が岐阜大学大学院工学研究科生産開発システム工学専攻博士後期課程に在籍中の研究成果をまとめたものです。

指導教官である岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 六郷恵哲先生には、本研究の遂行にあたり、実験の計画から準備、実験および考察において、常に適確なアドバイスと共に、社会人であるため準備に手間取る部分を補って頂き、スムーズに研究を進めることができました。心より感謝いたしております。また、岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 小林孝一先生には、国際発表の際に、海外に不慣れな私を現地の引率や発表練習までお付き合い頂きありがとうございました。さらに、2016年4月より指導教官として、論文のまとめにおいて丁寧に指導頂き、深く御礼申し上げます。

岐阜大学総合情報メディアセンター教授 内田裕市先生ならびに岐阜大学工学部社会基盤工学科教授 國枝稔先生には、本論文をご精読の上、適確なご指摘を頂き、深く感謝申し上げます。また、岐阜大学工学部社会基盤工学科客員教授 浅野幸男先生には、実験方法や材料についてのご指導頂き、感謝の意を表します。

岐阜大学名誉教授 小柳洽先生、群馬大学理工学部准教授 小澤満津雄先生をはじめ、コンクリート研究会メンバーには、研究の計画段階から試験パラメータの設定や、考察について進捗ごとに適宜有益なアドバイスを頂き、深く感謝申し上げます。中日本建設コンサルタント株式会社技師長 羽田野英明博士には、3章の実験をはじめ、論文添削など博士課程の多方面においてご指導いただき、感謝の意を表します。

2章～4章において、光硬化型 FRP シートやプライマーの材料面についてご指導頂いた、サンコーテクノ株式会社今田篤也様、角谷義隆様、DIC マテリアル株式会社田中秀和様には、深く感謝致します。

5章～6章において、中日建設株式会社 高木賢一郎様、株式会社 REC 東盛珠樹様には、注入技術についてご協力頂き、深く感謝申し上げます。

また勤務先である株式会社竹中土木には、この様な研究機会を与えて頂き深く感謝いたしております。技術・生産本部技術部長 平井卓様をはじめ、技術部および開発部のメンバーには、研究遂行において実験方法や計測における要領など様々な面でご指導頂き、心より感謝申し上げます。株式会社竹中土木名古屋支店においては、営業部長 森治義様には入学前から一緒に大学に足を運んで頂くなどご協力頂きました。工事部長 富永勝治様には多忙な業務において私の研究に理解し、業務と学業のバランスを確保して頂きました。その他の名古屋支店メンバーにおいては、私の学業のため業務で負担を強いることなどある中で研究に協力頂き、深く御礼申し上げます。

最後に、常に明るく励ましてくれた妻に深く感謝申し上げます。また、心から応援して頂いた両親にも感謝致します。



## 1.5 論文の構成

本論文の構成を、図-1.5 に示す。

第1章では、光硬化型 FRP シートやひび割れ注入用エポキシ樹脂の概要と問題点を述べている。この研究背景を踏まえ、研究の目的とその位置づけについて述べている。

第2章「コンクリートのひび割れの閉口に伴う補修材・光硬化型 FRP シートのバックリング現象を評価するための試験方法の提案」では、従来のひび割れ追従性試験では評価できないひび割れの閉口方向への FRP シートの追従性を評価するための試験方法を提案した。ひび割れ幅、FRP シート厚さ、FRP シートの無付着域の大きさをパラメータとして、光硬化型 FRP シートの閉口方向のひび割れ追従性を、この試験方法により評価した。その結果、FRP シートの厚さが 1.5 mm の場合には、ひび割れ幅の違いによらず、今回の試験条件では約 0.2mm のひび割れ閉口変位で FRP シートにバックリング現象が発生することを確認した。FRP シートが厚い場合やひび割れ周辺部の無付着域が大きい場合には、バックリング開始時のひび割れ閉口変位が大きくなり、閉口ひび割れに対する FRP シートの追従性が向上することを確認した。

第3章「光硬化型 FRP シートの異方性を有した貼付による RC 梁のせん断耐力の実験的研究」では、等方性材料である短繊維ガラスを用いた光硬化型 FRP シートについて、異方性を有する連続繊維補強によるせん断耐力の既往の算出式への適用性について載荷試験で検証した。また、カッティングにより異方性を持たせて貼付した際のせん断耐力を確認した。その結果、光硬化型 FRP シートのせん断耐力は、既往の算出式におけるシートが部材軸となす角度を $\theta=45^\circ$  度として算出するせん断耐力以上となることを確認した。また、異方性を持たせた貼付では、貼付面積 100%時は、既往の算出式以上であることを確認した。貼付面積を半分にした際は、異方性の角度によっては FRP シートの引張強度が有効に発揮できず、計算値を下回ることがあることが分かった。

第4章「光硬化型 FRP シートの水圧作用に対する耐水圧性評価の試験方法の提案」では、剥落防止対策として用いられる光硬化型 FRP シートについて、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。プレキャスト製の U 型側溝ふたを使用し、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シートの剥離したときの荷重が一定の範囲となり、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。

第5章「コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに充填された樹脂の付着性能の評価」では、コンクリート構造物のひび割れに充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂が充填されたひび割れ部を含むコア供試体を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。直径 25mm のコア供試体をダンベル型に成形し、一軸引張試験を行った。また、支点部に鞍状の合板製治具を用いて、直径 50mm のコア供試体の曲げ試験を行った。一軸引張試験ならびに曲げ試験により、コンクリートのひび割れに充填された樹脂の付着性能を評価することができた。

第6章「模擬膨張骨材を用いたコンクリートの ASR ひび割れの再現と樹脂注入性評価への利