

平成 16 年度（財）港湾空港建設技術サービスセンター
研究開発助成報告書

助成番号：平成 17 年 1 月 11 日付 04 - 1 号
助成開発項目：(8) 公共施設の維持・管理に関するもの

動的ひび割れ追従性を考慮した
高靱性セメント系表面保護工の設計方法の確立

平成 18 年 5 月

名古屋大学大学院工学研究科社会基盤工学専攻

国枝 稔

目次

1. 研究背景および目的	1
1.1 高靱性セメント複合材料とは	1
1.2 研究目的	2
2. 道路橋 RC 床版を対象とした計測	5
2.1 計測概要	5
2.2 計測結果	7
2.3 まとめ	7
3. 栈橋構造物の RC 床版を対象とした計測	8
3.1 計測概要	8
3.2 動的載荷試験の結果	8
3.3 静的載荷試験の結果	10
3.4 まとめ	11
4. 重力式コンクリート擁壁の計測	13
4.1 計測概要	13
4.2 計測結果	14
4.3 まとめ	15
5. 高靱性セメント複合材料を用いたひび割れ追従性試験	16
5.1 試験概要	16
5.2 試験結果と考察	17
5.3 まとめ	21
6. まとめ	24

1. 研究背景および目的

1.1 高靱性セメント複合材料とは

高靱性セメント複合材料とは、セメント系材料を繊維で補強した複合材料であり、引張応力下において複数ひび割れ特性を示し、曲げ、引張、圧縮破壊時の靱性を大幅に向上させた材料である。ここでは参考文献 1 をもとに、使用材料、硬化後の性能、および適用についての特徴を述べる。

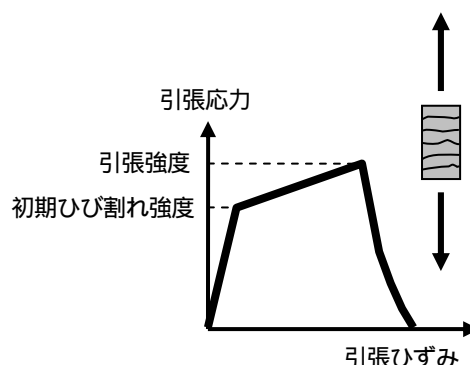


図 - 1.1 ひずみ硬化型の応力 - ひずみ曲線のイメージ

(1) 使用材料の特徴

複数ひび割れが生じるためには、ひび割れを架橋する繊維が破断しないことが重要である。そのため、繊維はできるだけ高強度が望ましい。例えば、代表的な高靱性セメント複合材料の ECC (Engineered Cementitious Composites) と呼ばれる材料では、モルタル中に直径が数十～数百ミクロンのポリエチレン繊維 (PE) やビニロン繊維 (PVA) などの有機繊維や鋼繊維を体積で 1～2% 程度含有しており、図 - 1.1 に示すような、数% のひずみ能力を有するひずみ硬化特性と複数ひび割れ特性を示す。さらに、付着特性に関しては、化学的な付着や摩擦付着など、繊維が破断しない範囲でできるだけ高い付着特性を発揮し、かつ、繊維の引抜きが卓越するように材料設計が行われる。

(2) 性能の特徴

曲げ、引張、圧縮破壊時の大きな靱性が高靱性セメント複合材料の最大の特徴である。繊維の混入によって、引張強度や引張靱性 (0.2～2.0% の引張ひずみ) の向上や、耐摩耗性の向上が期待できる。また、圧縮強度や圧縮靱性 ($3.0 \sim 5.0 \times 10^{-4}$ の最大荷重時の圧縮ひずみ) も向上し、耐震性能の向上を期待した部材の設計方法も提案されている。コンクリートの剥落に対する抵抗性を向上させるために高靱性セメント複合材料が用いられる場合もある。さらに、図 - 1.2 に示すような、微細な複数ひび割れも重要な特性の一つであり、最大荷重以前では 0.05mm 以下のひび割れ幅に低減することができる。

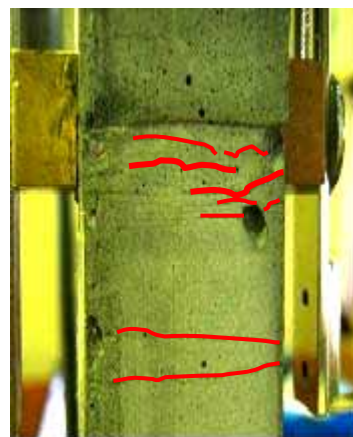


図 - 1.2 ひび割れの様子

(3) 適用の特徴

高靱性セメント複合材料は、コンクリートの脆性的な破壊挙動を克服していることから、コンクリート系構造要素の構造性能や耐久性の大幅な向上が期待でき、従来のコンクリートに代わる新たな用途として、現在、様々な利用法が試されている。ここで、いくつかの適用例を紹介する。

岐阜県内にある重力式コンクリート擁壁において、アルカリ骨材反応によるひび割れに対する補修に用いられた²⁾ (図 - 1.3)。施工後 2 年時の調査においても、幅の大きなひび割れは ECC 内には生じていないことが確認されている。他にも、吹付け ECC を用いて、高架橋の曲げひび割れ部の中性化抑止対策が試験施工として行われている³⁾ ECC のひび割れ分散性およびひび割れ幅の低減効果を期待した適用例である。打込み ECC を用いた施工例として、美原大橋 (北海道) における主橋梁部の道路床版補強がある (図 - 1.4)。疲労耐久性確保のため、打込み ECC を鋼床版の上面に打設することによって

鋼床版の剛性を向上させ、主橋梁部の疲労耐久性を確保することが目的である。また、ECCのひび割れ幅低減を期待し、ダム堤体の止水性の改善を目的に行われた補修事例もある⁴⁾(図 - 1.5)。

しかし、コスト面、製造過程、現場での施工上の問題点などから、高靱性セメント複合材料を実際の補修・補強工事で用いた施工例は未だ数少ないのが現状である。今後、靱性に優れた高靱性セメント複合材料の更なる利用が期待される。

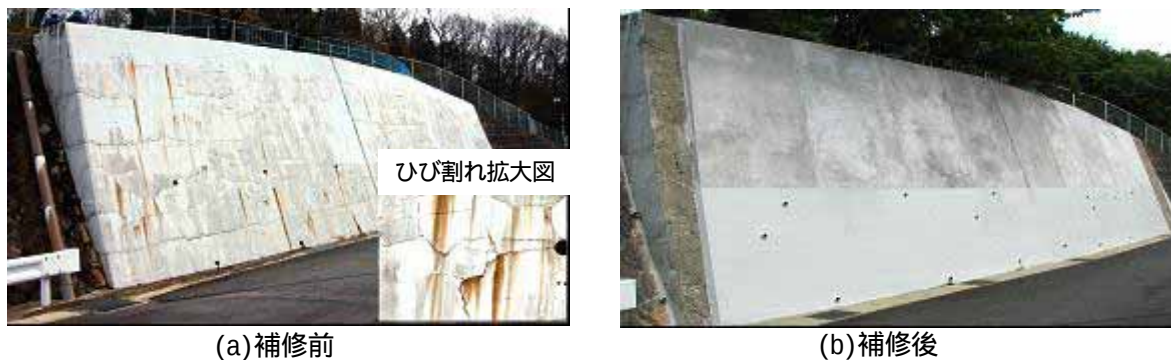


図 - 1.3 重力式コンクリート擁壁における補修



図 - 1.4 美原大橋における主橋梁部の道路床版補強



図 - 1.5 ダム堤体の補修

1.2 研究目的

コンクリート構造物の中性化や塩害を抑制するために、従来の表面保護工では、有機系塗料（エポキシ樹脂やポリウレタン樹脂など）などが用いられてきた。しかし、これらは薄層であることから、

剥離，膨れや割れなどが生じやすく，多くの不具合事例が報告されている．本研究では，従来までの薄い膜状の保護工（厚さ 300 ミクロン）ではなく，10～20mm 程度の厚さを持った保護工の適用により，膨れや割れの劣化が低減で

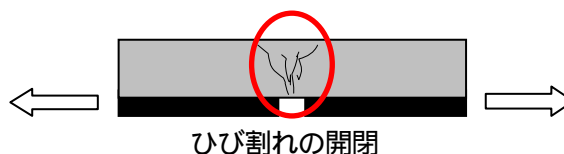


図 - 1.6 断面修復材のひび割れ追従性のイメージ

きることに着目し，複数ひび割れを生じる高靱性セメント系材料を中性化あるいは塩害抑制対策工として適用することを目的とした．この技術により，コンクリート構造物の長寿命化が期待できものと考えられる．その中でも特にひび割れ追従性に着目した設計方法の提案を行う．本研究の構成を図 - 1.7 に示すとともに，その概要を以下に示す．

(1) ひび割れ幅変動の計測（2 章，3 章，4 章）

ひび割れ追従性に関する設計を行うにあたり，実際の変動幅がどの程度であるかを把握するため，実構造物のひび割れ幅変動を計測し，そのデータベースの充実を図った．対象としては，道路橋の RC 床版における，活荷重作用時の変動（動的，2 章），栈橋構造物の RC 床版の活荷重作用時の変動（動的，3 章），重力式コンクリート擁壁における気温変化による変動（擬似動的，4 章），の 3 種類とした．

(2) ひび割れ追従性試験方法の開発（5 章）

高靱性セメント複合材料を対象とし，鋼板を利用したひび割れ追従性試験方法を開発し，2 種類の高靱性セメント系材料を用いてその適用性を検証した．

ひび割れ追従性を考慮した高靱性セメント系表面保護工

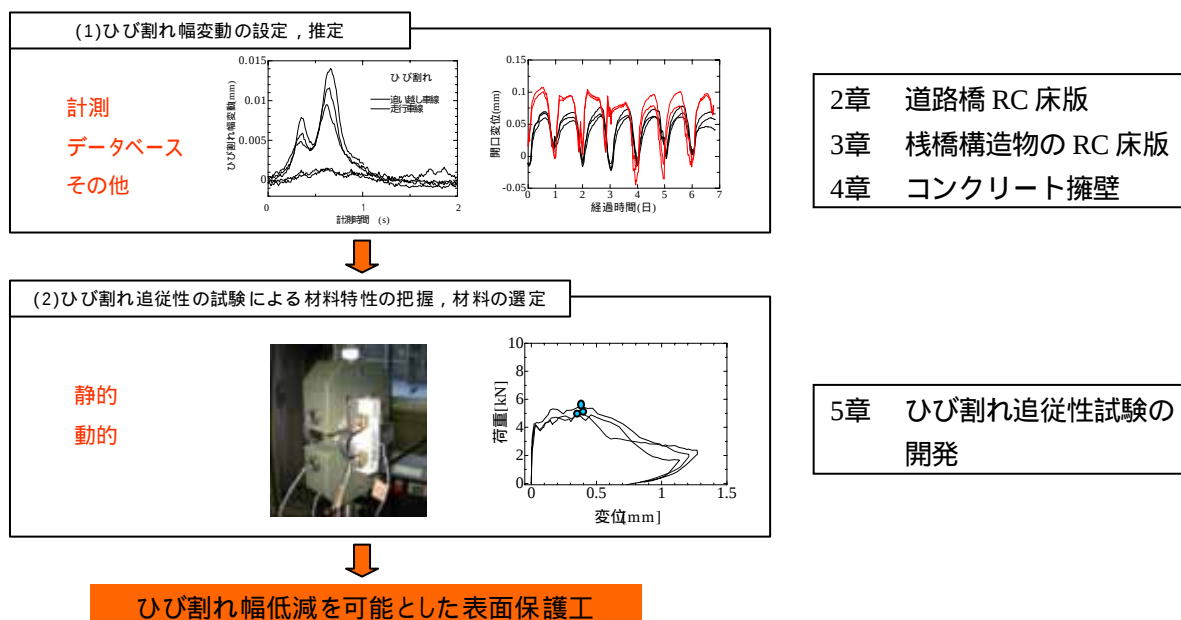


図 - 1.7 本研究開発の構成

< 1 章の参考文献 >

- 1) 国枝稔：高性能な繊維補強セメント系複合材料（HPFRCC），橋梁と基礎，pp.27 - 30，2005

- 2) 六郷恵哲ら：ECC による重力式コンクリート擁壁表面補修の試験施工と要素部材の引張性能評価，高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.133 - 140，2003
- 3) 須田久美子ら：鉄道高架橋の曲げひび割れ部中性化抑止対策工への吹付け ECC 工法の適用，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.162 - 167，2005
- 4) 児島茂春ら：高靱性複合材料を用いた吹付け補修工法の適用，コンクリート工学，Vol.42，No.5，pp.135 - 139，2004

2．道路橋 RC 床版を対象とした計測

2.1 計測概要

名古屋高速万場線にある高架橋（3 径間連続非合成鈹桁橋）の中央スパン（スパン長 45m）内にある RC 床版に生じたひび割れを対象とした．なお，この床版には構造性能の低下が懸念されるなどの理由があるわけではなく，塗装塗替え時の足場を利用することにより選定されたものである．

この高架橋の RC 床版の厚さは 230mm，床版支間長は 2.84m（ハンチ部を含む）である．この地点での 24 時間交通量は約 20,000 台（2 車線の合計）である（平成 16 年交通量調査より）．対象とした橋梁の断面図およびひび割れ位置関係を図 - 2.1 に示す．なお，図中に示される位置にて観察されたひ

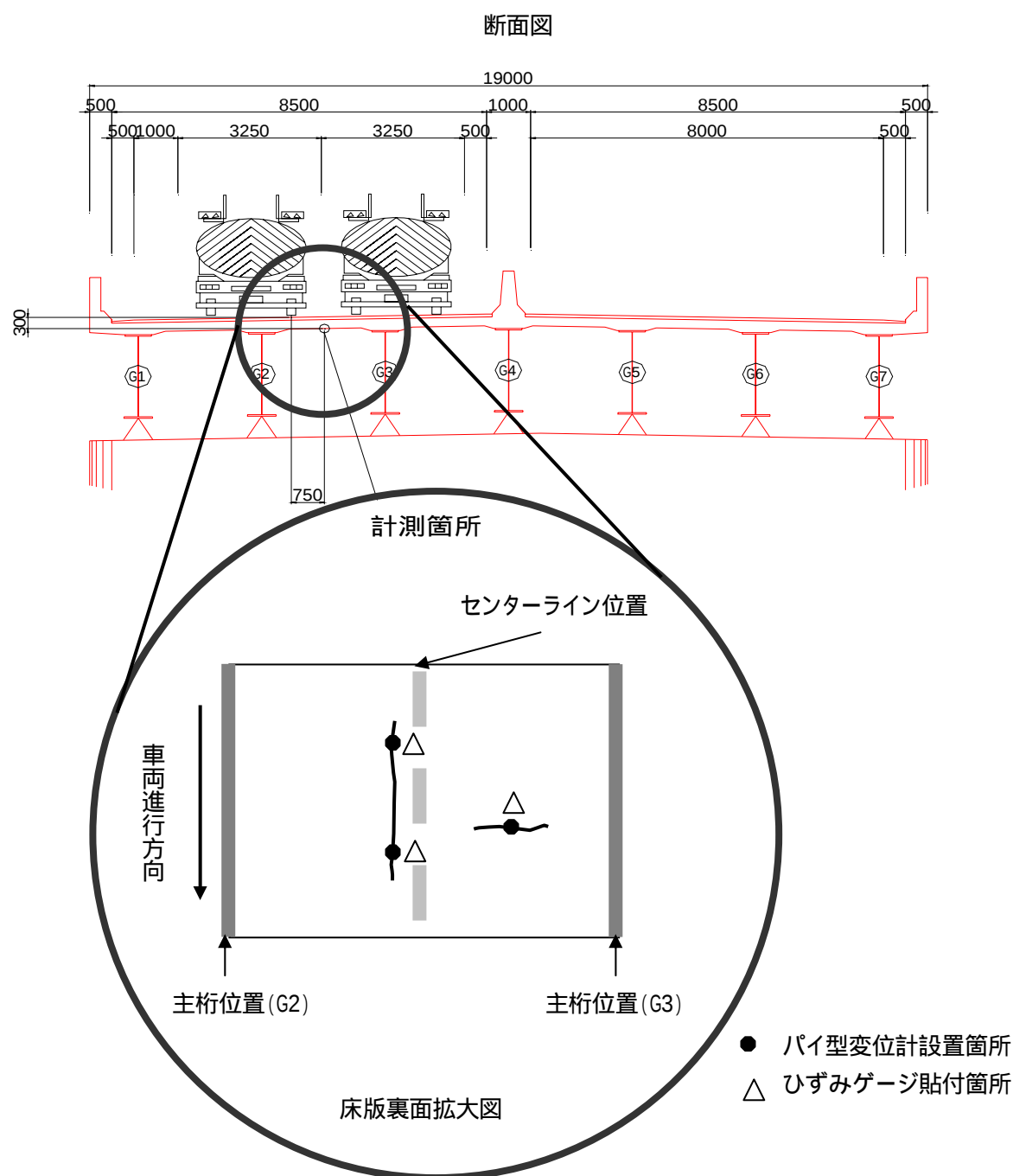


図 - 2.1 計測位置と車両走行位置の関係



図 - 2.2 設置したパイ型変位計の様子

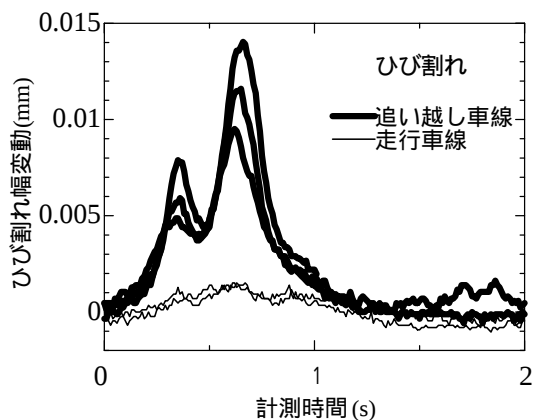


図 - 2.3 走行車両（散水車）

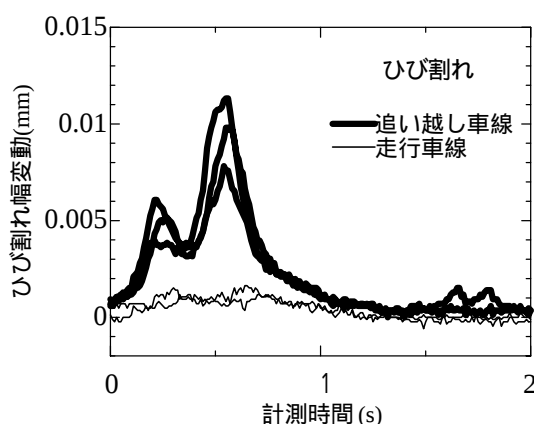
ひび割れ以外にはほとんどひび割れは存在せず、現段階では健全な RC 床版であることが伺える。床版下面に橋軸方向に生じたひび割れ(計 3 本、それぞれひび割れ、ひび割れ、ひび割れと呼ぶ)を対象とし、ひび割れとは橋軸方向、ひび割れは橋軸直角方向に生じており、ひび割れにはエフロレシンスが生じていた(図 - 2.2 参照)。ひび割れ幅は、いずれも 0.1 ~ 0.15mm の範囲にあった。

参考文献 1 では、通常の交通により変動するひび割れ幅を計測しているが、今回は荷重を明確にするために、図 - 2.3 に示すような散水車(満水状態 21.9 トン)を時速 60km で走行させた際の変動幅を計測した。なお、図 - 2.1 からわかるように、対象とするひび割れ幅は、追越車線、走行車線の影響を受ける為(ひび割れは、ほぼセンターライン直下にある)、追越車線を 3 回、走行車線を 2 回走行した際のひび割れ幅変動を計測した。

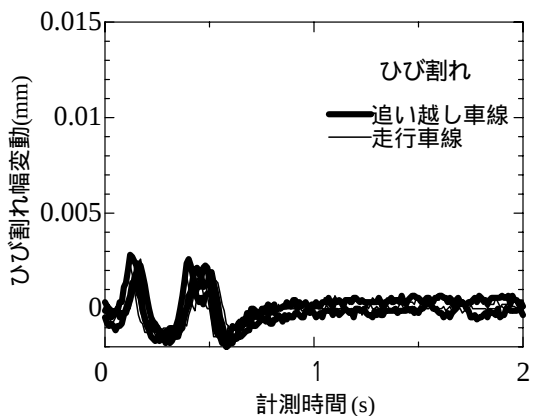
すべての計測では、対象とするひび割れをまたぐ位置に検長 50mm のパイ型変位計(精度 1/2000mm)を取り付け、100Hz のサンプリングで計測を行った。



(a) ひび割れ



(b) ひび割れ



(c) ひび割れ

図 - 2.4 ひび割れ幅変動の計測例

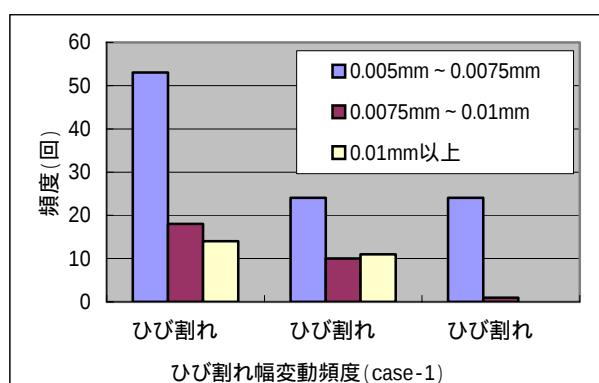
2.2 計測結果

(1) 計測波形の特徴と再現性

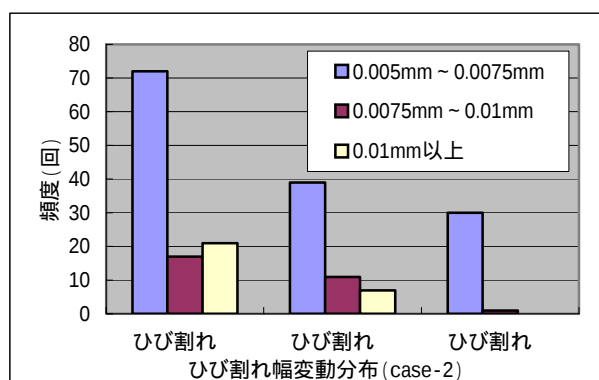
対象とした3本のひび割れの動的ひび割れ幅変動の計測例を図-2.4に示す。なお、ひび割れが現状のままでまったく開口、閉口していなければ、この値は0を示し、荷重の作用によりひび割れが開口すればプラス側に開口量が示される。今回対象としたひび割れでは、追越車線を走行した場合に、特に大きなひび割れ幅変動が計測された。例えば、ひび割れについて、最大の動的ひび割れ幅の変動は0.014mmであることが読み取れる。なお、各計測データのうち、1つ目の波形は前輪の、2つ目の波形は後輪の作用を表していると考えられる。ひび割れに関しては、走行する車線が同じであれば、おおよそ同じような形状をしており、その再現性が確認された。また、図-2.4(c)に示されるように、活荷重の影響を受け難いひび割れが存在することが明らかとなった。

(2) 頻度分布

参考までに、先のひび割れを対象とし、24時間の継続計測をした際に得られたひび割れ幅変動に関して、0.005～0.0075mm、0.0075～0.01mm、0.01mm以上の各レンジでの頻度分布を図-2.5に示す。なお、両図は2日分の計測結果である。ひび割れ幅変動の頻度分布を計測することにより、表面保護工適用後に作用する頻度を推定し、設計時あるいは材料選定時に考慮することが可能となる。



(a)24時間の計測例(その1)



(b)24時間の計測例(その2)

図-2.5 ひび割れ幅変動の頻度分布

2.3 まとめ

ここでは、道路橋のRC床版に生じる動的なひび割れ幅変動を計測し、その大きさや周波数、頻度等について算定した。これらの値を蓄積することで、表面保護工の設計に生かすことが可能となると考えられる。

謝辞

本計測の実施に当たり、名古屋高速道路公社保全施設部保全課の関係各位にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

<2章の参考文献>

- 1) 国枝稔, 撫養啓祐, 中村光: 表面被覆材のひび割れ追従性評価のための動的ひび割れ幅変動の計測, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, pp.1573-1578, 2005
- 2) 撫養啓祐, 国枝稔, 西田信吉, 中村光: RC構造物のひび割れ幅変動同定のための実構造物載荷実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, 2006(投稿中)

3. 栈橋構造物の RC 床版を対象とした計測

3.1 計測概要

本研究では，A 港にある栈橋の RC 床版（RC 床版厚：300mm，舗装厚：100mm，床版支間長 4.5m）下面に生じた図 - 3.1 に示されるひび割れを対象とした．対象としたひび割れの幅は，0.6～0.7mm であった．

図 - 3.2 に示すようなひび割れの中央部および端部の計 3 ヶ所に，ひび割れに直角に検長 50mm のパイ型変位計（感度 1/2000mm）を取り付け，RC 床版上を 3 軸のトラックをひび割れの長手方向に対して直角に走行させた．トラックの諸元（軸位置）を図 - 3.2 に示す．なお，荷重の違いを検討するため，空車時（10t）と積載時（30t）の 2 種類の載荷条件を選定した．ひび割れ幅変動の計測時のサンプリング数は 100Hz とした．

(1) 動的載荷

動的な載荷条件における車両進入位置を図 - 3.3 に示す．トラックの車両中心が図 - 3.3 の A，B，C の位置となるように走行させた．走行時の移動速度は，10t，30t のいずれの荷重についても，それぞれ 20km，40km，60km の 3 種類とした．以上のように，進入位置の違い（3 種類），移動速度の違い（3 種類）および荷重の違い（2 種類）に着目した計 18 回の動的なひび割れ幅変動を計測した（表 - 3.1 参照）．なお，各ケースにつき，1 回の計測を行った．

(2) 静的載荷

静的な載荷条件における車両進入位置を図 - 3.4 に示す．動的載荷の場合と同様に，図の A，B，C の位置が車両中心となるように位置を変えて，静的な載荷試験を行った（表 - 3.1 参照）．図 - 3.4 に示すように，10t と 30t について，計測開始後に車両をゆっくりと進行させ，所定の位置(i)，(ii)，(iii)に前輪を停止させた際に計測されたひび割れ幅を，静的載荷におけるひび割れ幅変動と定義した．以上のように，進入位置の違い（3 種類），停止位置の違い（3 種類）および荷重の違い（2 種類）に着目した計 18 回の静的なひび割れ幅変動を計測した．なお，各ケースにつき，1 回の計測を行った．



図 - 3.1 計測対象ひび割れ

3.2 動的載荷試験の結果

(1) 概要

図 - 3.5，3.6 に，動的載荷により計測されたひび割れ幅変動を示す．なお，ひび割れが現状のまままったく開口，閉口していなければ，この値は 0 を示し，載荷によってひび割れが開口すればプラス側に開口量が示される．本計測では，車両が走り出す前に計測を開始し，車両が計測対象床版を通過するまで計測したが，本図では，時間軸をシフトして示している．また図中の記号は，車両進入位置 - ひび割れ計測位置 - 移動速度となっている．

図より，移動速度や荷重の大きさの違いによらず，前輪の影響によると思われるひび割れ変動が計測され，次に後輪の影響と思われるひび割れ幅変動が生じている．特に，後輪は 2 軸であることもひび割れ幅変動の計測結果から確認できる．このことは，道路橋で計測された結果¹⁾とも一致している．さらに，図 - 3.5，3.6 より，30t の場合は，後輪が作用した時の変動幅の方が，前輪が作用した時のそれよりも大きく，逆に 10t の場合においては，後輪が作用した時のひび割れ幅変動の方が，前輪が

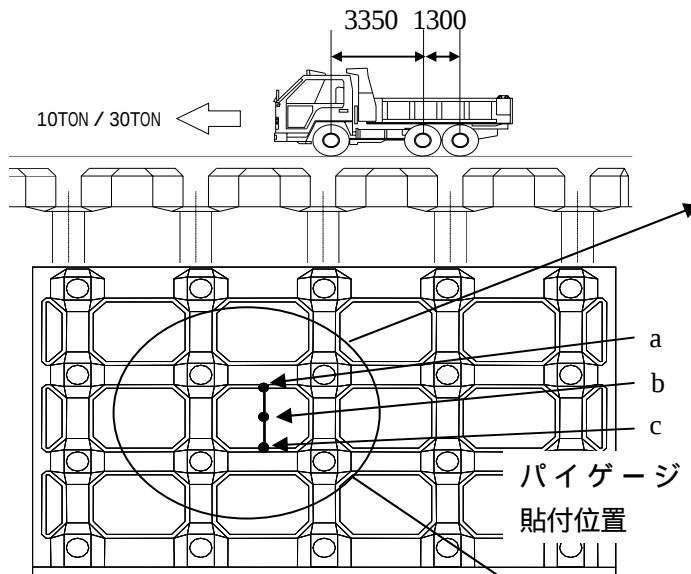


図 - 3.2 計測概要図

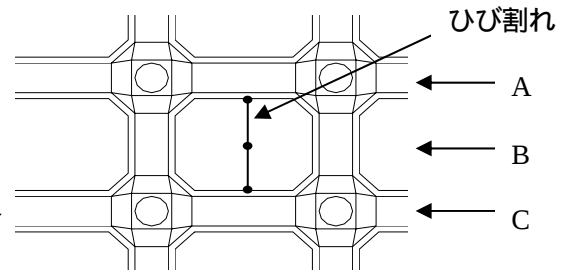


図 - 3.3 動的载荷での車両進入位置

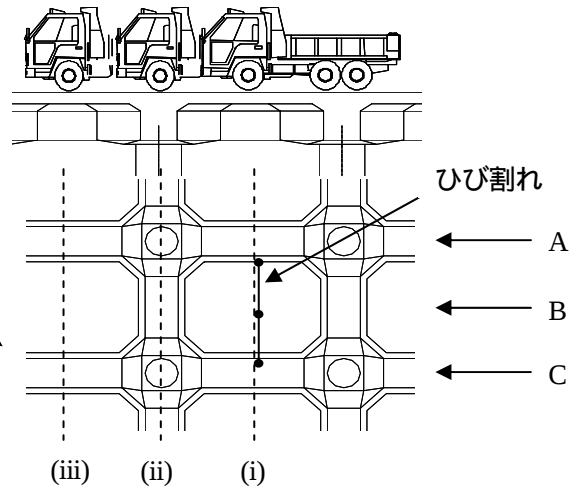


図 - 3.4 静的载荷での車両進入位置と停止位置

作用した時のそれと同程度以下となった。これは、30tでは、車両後部に土砂を積載したため、後輪による荷重が前輪のそれに比べて相対的に大きくなったことと良く対応している。

(2) 荷重の大きさの違いによる影響

30t と 10t の場合を比べると、例えば、床版中心を走行させた B のケースでは 図 - 3.5、3.6 の B-b-40km に示すように、30t でのひび割れ幅変動（後輪による）が 0.007mm 程度であるのに対して、10t のひび割れ幅変動（後輪による）が 0.002mm 程度となっており、30t におけるひび割れ幅変動が、10t のそれに比べて約 3 倍となっている。移動速度が異なる場合においても、同様の傾向が伺えることから、ひび割れ幅変動は、载荷荷重の影響を直接的に受けることが確認された。

(3) 移動速度の違いによる影響

移動速度が異なる場合の影響に着目すると、図 - 3.5、3.6 より、移動速度が大きくなってもひび割れ幅変動値の値はほとんど変化しない。しかし、前輪が通過した際に生じる変動（1 つ目のピーク）と後輪が通過した際に生じる変動（2 つめのピーク）

表 - 1 実験因子

	荷重 (t)	移動速度 (km)	進入位置及び計測位置	停止位置
動的 载荷	10, 30	20, 40, 60	A - a	-
			B - b	
			C - c	
静的 载荷	10, 30	-	A - a	(i), (ii), (iii)
			B - b	
			C - c	

表 - 2 時間間隔

荷重(t)	移動速度(km)	進入位置		
		A	B	C
10	20	0.5	0.5	0.5
	40	0.3	0.4	0.3
	60	0.2	0.2	0.2
30	20	0.5	0.5	0.5
	40	0.4	0.3	0.3
	60	0.2	0.2	0.2

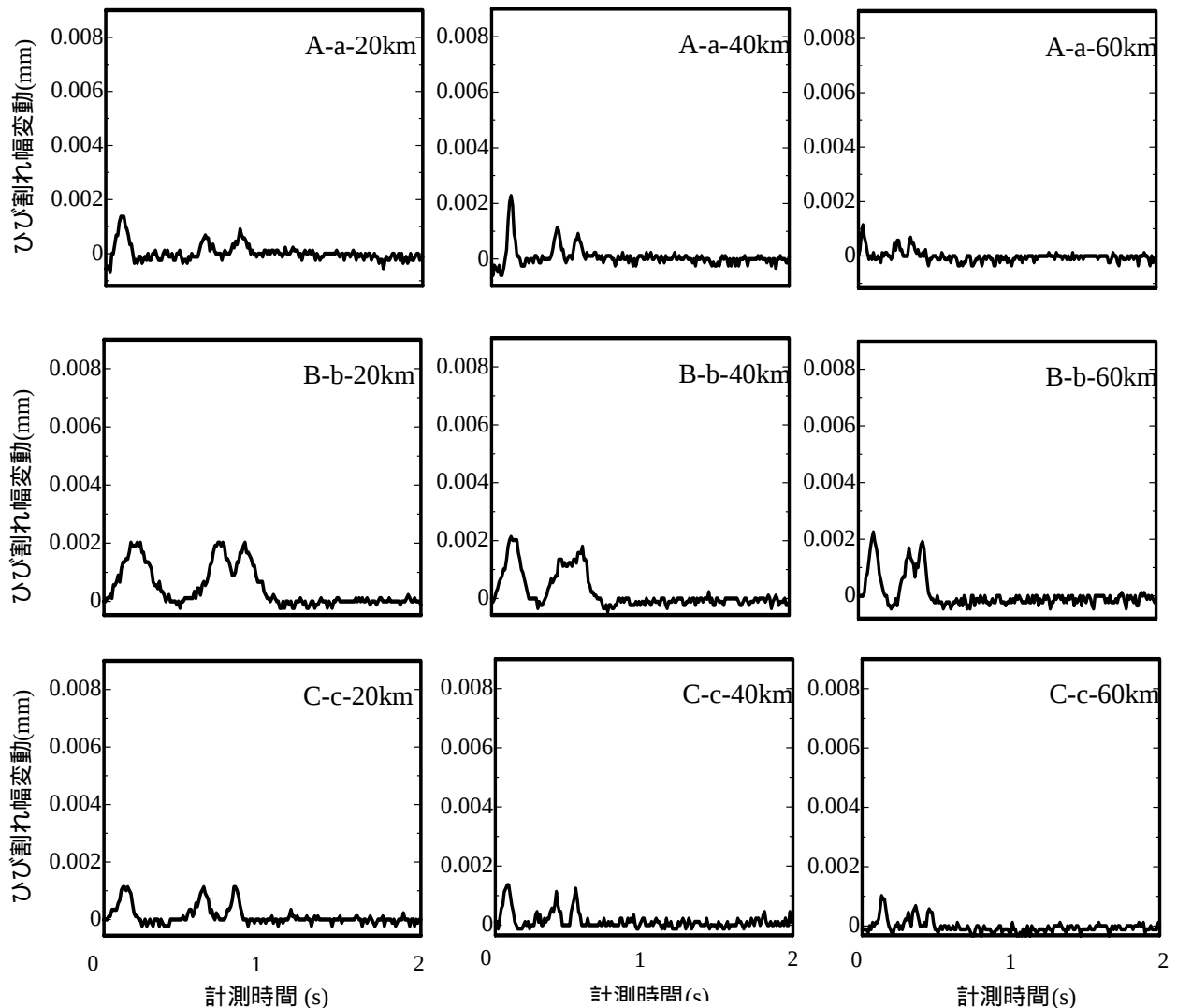


図 - 3.5 動的荷重計測波形 (10t)

ク)の時間間隔が異なっている．表 - 3.2 に，20km，40km，60km で走行した際の，前輪のピーク位置と後輪の最初のピーク位置の時間間隔を示す．これによると 20km で 0.5sec，40km で 0.3～0.4sec，60km で 0.2sec となっており，移動速度が速いほど両ピークが発生する時間間隔が短くなることが確認できる．また，荷重の違いや走行位置の違いが時間間隔に及ぼす影響は小さい結果となった．

(4) 走行位置の違いによる影響

走行位置の違いが，動的ひび割れ幅変動に及ぼす影響については，床版中央を走行させる B のケースが最も変動幅が大きい結果であった．端部のひび割れ (a 及び c) は桁近くに存在するため，荷重の作用による変形が小さいためと思われる．すなわち，車両走行位置がひび割れ幅変動に及ぼす影響が大きいことが推察される．

3.3 静的荷重試験の結果

静的荷重の計測例を図 - 3.7 に示す．図中の記号は，車両進入位置 - ひび割れ計測位置である．図 - 3.7 の計測波形は，図 - 3.4 に示されるように (i)，(ii)，(iii) の各停止位置に順次停止させた場合のひび割れ幅変動を，継続的に計測したものであり，図中に示されたフラットな部分 (停止状態) の値が，静的荷重におけるひび割れ幅変動である．また，(i) の停止位置が前輪ひび割れ直上に，(ii) の停止位置

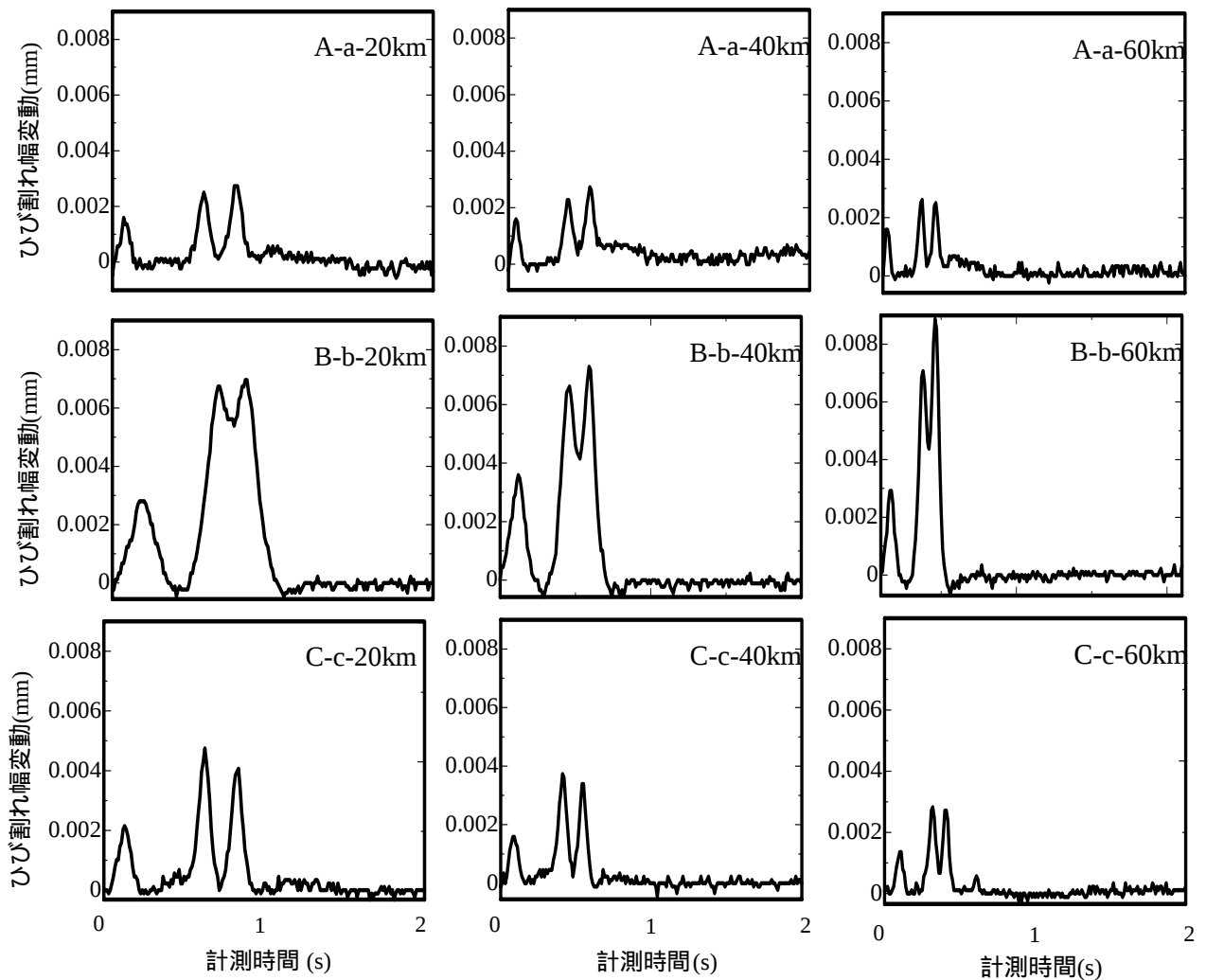


図 - 3.6 動的載荷計測波形 (30t)

が後輪ひび割れ直上に、(iii)の停止位置が完全通過(無荷重)に相当するものである。これらの図より、動的載荷の場合と同様、30tの場合のひび割れ幅変動は、10tの場合のそれに比べて約3倍程度であり、またRC床版中央部に載荷させた場合の変動幅が最も大きい結果となった。また、動的載荷と静的載荷のそれぞれのひび割れ幅変動の値は、前輪による変動、後輪による変動ともに、ほぼ同程度であることが明らかとなった。一般には、活荷重作用下においては、衝撃による影響を考慮する(例えば、衝撃係数)ことになっているが、本実験の範囲内では、その影響は認められなかった。

3.4 まとめ

本研究では、表面被覆材の動的ひび割れ追従性評価を行うにあたり、その入力値を明確にするために、実橋梁に生じたひび割れを対象に既知の荷重、移動速度に対するひび割れ幅変動を計測した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) ひび割れ幅変動の振幅値は、荷重の大きさの影響を受け、周波数は移動速度の影響を大きく受けることが明らかとなった。また、振幅値は載荷位置の違いの影響を受けることも明らかとなった。
- (2) 本研究の範囲内では、動的載荷と静的載荷の違いが、ひび割れ幅変動の振幅値に及ぼす影響は明確ではなかった。ただし、衝撃による影響については、その他の条件下においてさらに検証する必要がある。

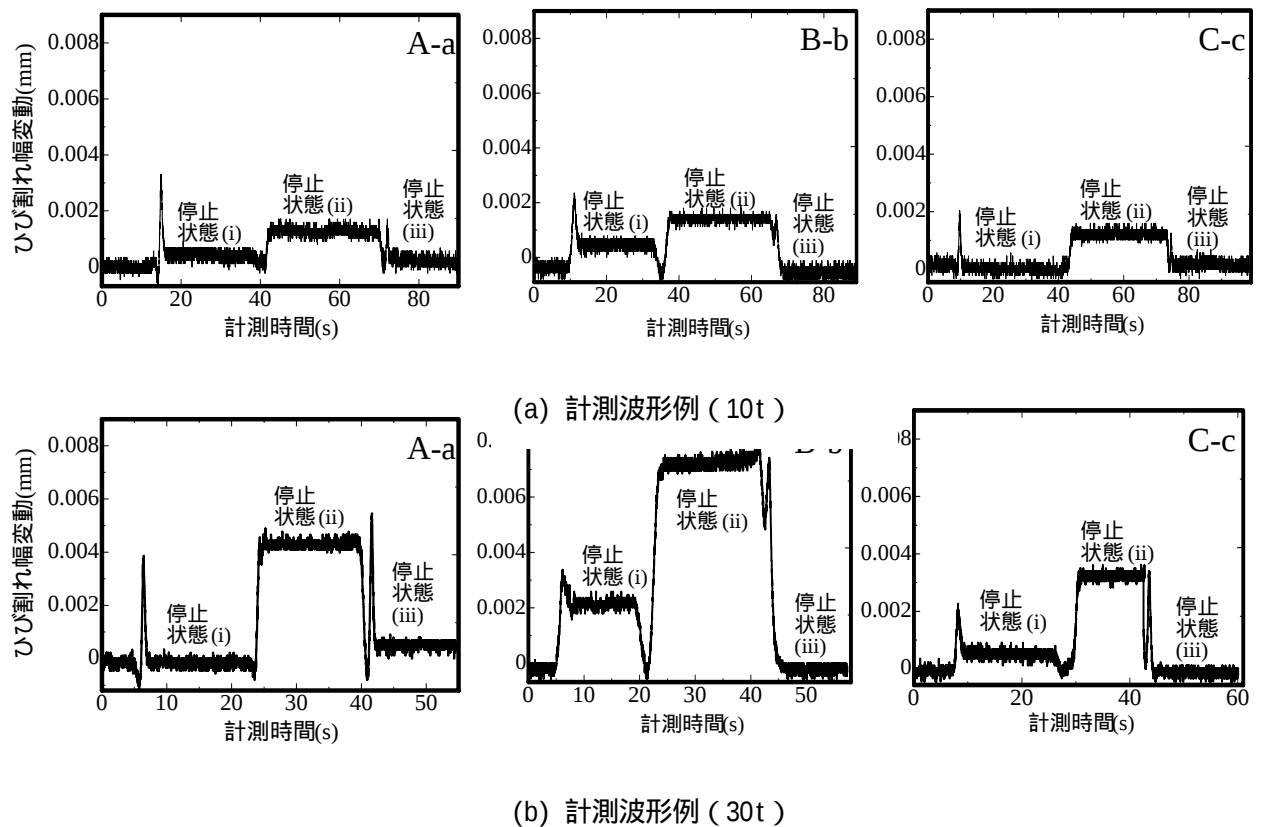


図 - 3.7 静的載荷計測波形例

謝辞

本計測は、(独)港湾空港技術研究所 LCM センター長 横田弘博士に多大なるご協力をいただいた。ここに記して謝意を表す。

< 4 章の参考文献 >

- 1) 国枝稔，撫養啓祐，中村光：表面被覆材の動的ひび割れ追従性評価のための動的ひび割れ幅変動の計測，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.1573-1578，2005
- 2) 成瀬雅也，田中宏昌，関雅樹，丹間泰朗：コンクリート表面被覆材の長期ひび割れ追従性試験について，Vol.23，No.1，pp.433-438，2001
- 3) 撫養啓祐，国枝稔，上田尚史，中村光：動的ひび割れ追従性評価のためのひび割れ幅変動と推定活荷重の関係，土木学会第 60 回年次学術講演会，5-063，pp.125-126，2005

4. 重力式コンクリート擁壁のひび割れ幅変動の計測

4.1 計測概要

本計測は、アルカリ骨材反応により劣化した重力式コンクリート擁壁のひび割れを対象として計測を行った。この擁壁は、表面ひび割れの再発を防ぐことのみを目的として、ひび割れ部における引張変形能の大きな ECC を用いて表面補修が施された（六郷ら，2003）が、施工後半程度で微細なひび割れが表面に生じた。ここでは、このひび割れの原因の一つとして、気温の変動に依存した擁壁の変形によるものと推定し、気温変動と表面のひび割れ幅変動との関係について考察する。

図 - 4.1 に計測に用いた亀裂変位計（検長 100mm，感度 1/1500mm）を、図 - 4.2 に計測対象となった 12 ケ所のひび割れの位置を、図 - 4.3 に計測対象とした擁壁を示す。本計測では、アルカリ骨材反応により劣化した擁壁のうち、無補修面、モルタル補修面、にそれぞれ 3 ケ所、ECC 補修面に 6 ケ所、の計 12 ケ所のひび割れを対象とし、計測には亀裂変位計を使用した。また 変位計はひび割れに対し直角に設置した。期間は 2005 年 9、10、11 月、2006 年 1 月に 7 日間ずつ、30 分間隔でデータの収集を行い、温度による亀裂変位計自身の変動は補正した。ま

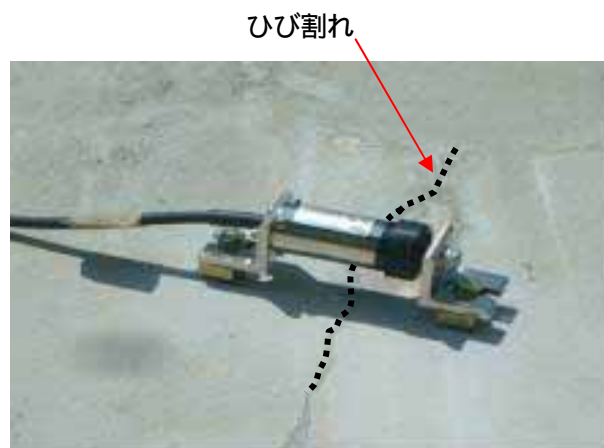


図 - 4.1 亀裂変位計

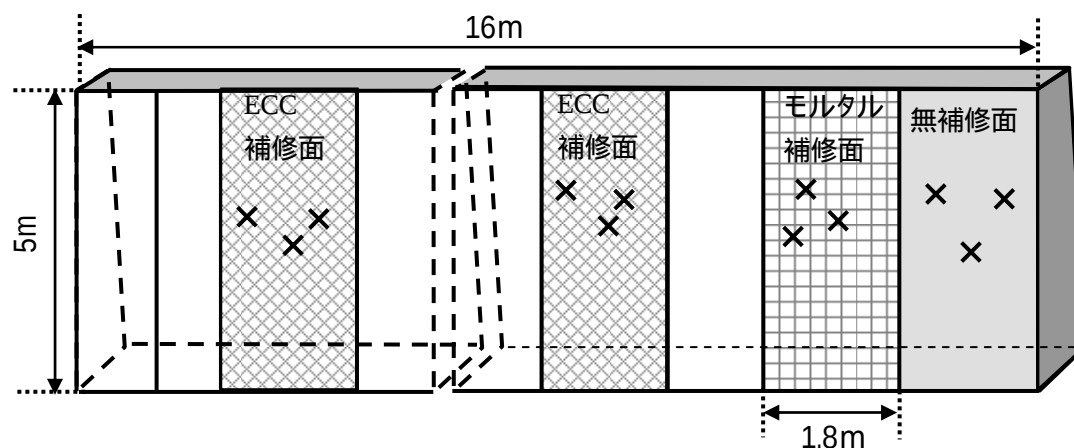


図 - 4.2 計測ひび割れ配置図



図 - 4.3 計測対象とした重力式コンクリート擁壁

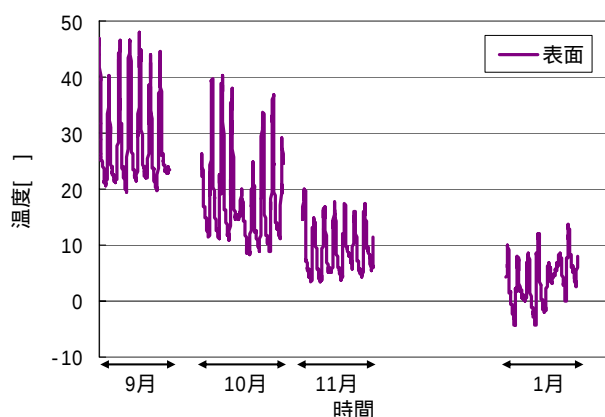


図 - 4.4 表面の温度変動

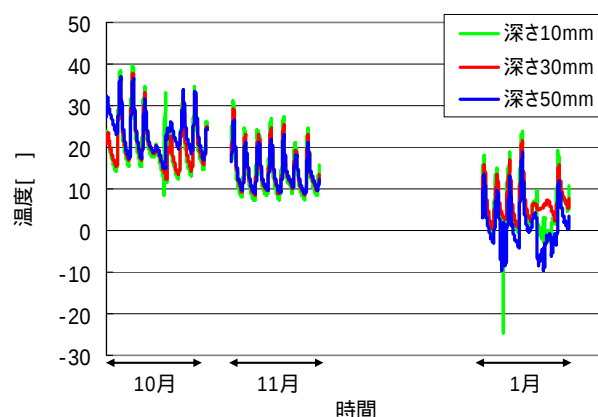


図 - 4.5 深さ別の温度変動

た、熱電対によって擁壁表面と、表面から深さ 10mm, 30mm, 50mm の点における温度も同時に計測した。

4.2 計測結果

(1) 温度に関する考察

表面温度の 9~1 月にかけての変化を図 - 4.4 に、擁壁表面から深さ 10mm, 30mm, 50mm における 10, 11, 1 月の温度変動を図 - 4.5 に示す。図 - 4.5 に 9 月分のデータがないのは、10 月から計測を開始したためである。図中のひび割れの番号は図 - 4.2 の測定位置の番号にそれぞれ対応している。時間が 0 の点を基準として正はひび割れの開口を、負はひび割れの閉口を表している。

気温については、最低気温は、9~1 月にかけて低くなっており、また、一日の変動幅もやや小さくなる傾向にある。また、図 - 4.4 と図 - 4.5 を比較して見ると、多少ではあるが、補修材内部の方が温度の変動幅が小さいことが分かる。

(2) 無補修面とモルタル面に関する考察

各位置にて計測されたひび割れ幅変動を、図 - 4.6~4.10 に示す。ひび割れ幅変動に関して、ひび割れ 2, 8 の全体、さらに、ひび割れ 4, 7, 9 の 1 月のデータに異常が見られるが、他のデータと比較して信頼性が低いため、これらは、変位計の故障等による不具合が生じており、考察には加えないものとする。また、他の図と比較するために同スケールで示したため、図 - 4.8 に示されていないデータを含めた ECC1 補修面の計測データを、参考のため図 - 4.10 に示す。例えば 9 月において、無補修面では、温度が約 45 になった時に変位が約 -0.02mm となっており、温度が約 20 になった時に変位が約 0.07mm となっている。このことから、日変動によって温度が上がるとひび割れは閉じ、温度が下がるとひび割れは開いていることが分かる。また、他の月においても同様の傾向が表れており、ひび割れ以外の部分が膨張、収縮していることによるものと推察される。秋から冬にかけて、ひび割れ幅がやや大きくなることも認められる。モルタル補修面は、図 - 4.1 に示すように、既にひび割れが生じており、無補修面と同様の変動となることが推察されたが、日変動によって温度が上がるとひび割れが閉じ、温度が下がるとひび割れが開き、特に 9 月から 1 月にかけて開く傾向が見られる。

(3) ECC 補修面に関する考察

図 - 4.8, 4.9 に示すように、ECC 補修面では、ひび割れ幅の季節変動はほとんど見られない。日変動で見ても、無補修面とモルタル補修面での変位の変動幅は、ほとんどが 0.07mm 以上あるのに対して、ECC 補修面の変位幅は 0.04mm 以内に収まっており、変位の変動が半分程度に収まっていることが分かる。

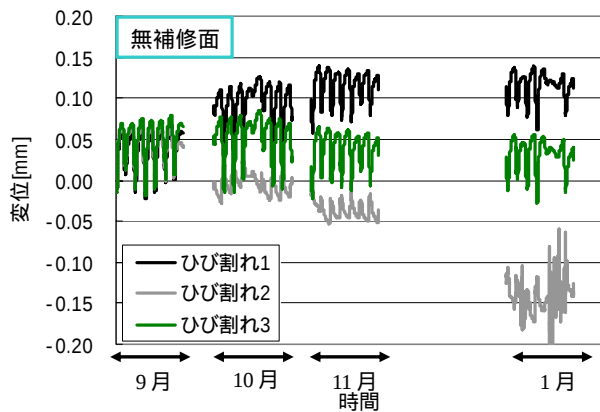


図 - 4.6 無補修面におけるひび割れ幅変動

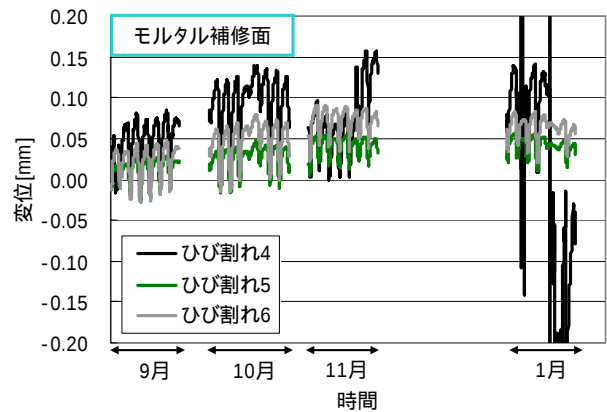


図 - 4.7 モルタル補修面におけるひび割れ幅変動

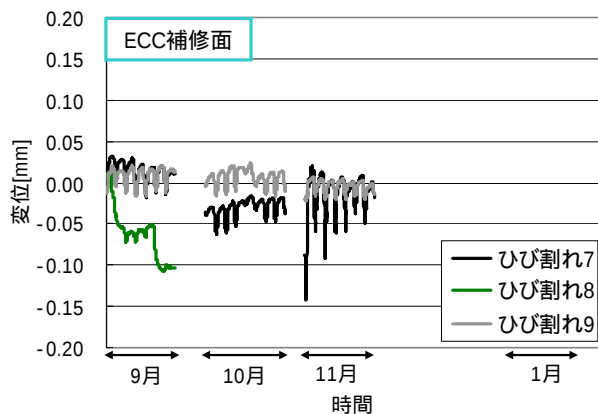


図 - 4.8 ECC1 補修面におけるひび割れ幅変動

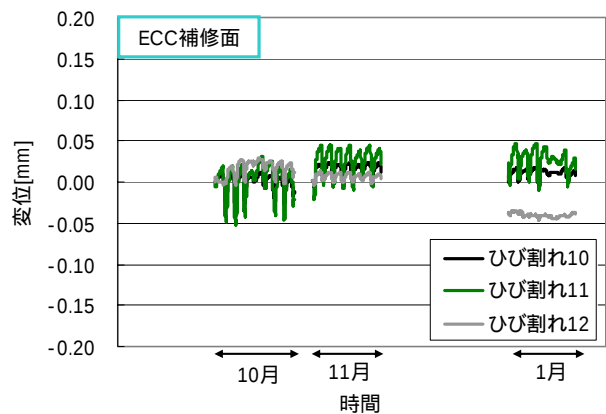


図 - 4.9 ECC2 補修面におけるひび割れ幅変動

4.3 まとめ

全体を通して、温度が上がるとひび割れは閉じ、温度が下がるとひび割れは開くという結果が出た。無補修面、モルタル補修面、ECC 補修面での変動幅の違いから、ECC によってひび割れ幅の変動が日変動でも季節変動でも抑えられていることが分かり、ECC による効果が確認できたといえる。また、ひび割れ追従性試験の観点からは、無補修面において最大 0.09mm 程度の変動幅であることから、この程度以上のひび割れ追従性が要求されるということが分かる。

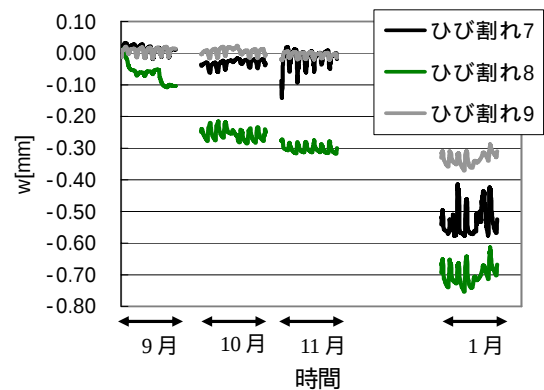


図 - 4.10 ECC1 補修面における全データ

5. 高靱性セメント複合材料を用いたひび割れ追従性試験

5.1 試験概要

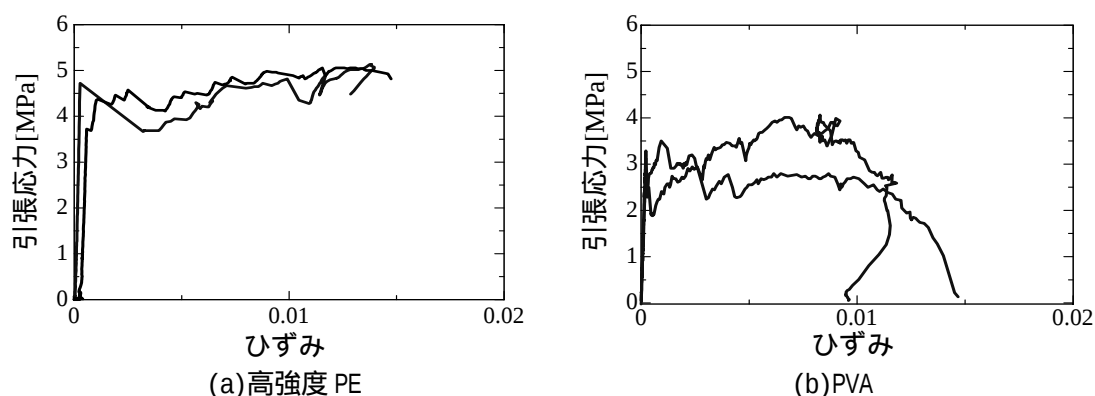
(1) 使用材料

高靱性セメント複合材料として、代表的な 2 種類の高靱性セメント複合材料（以下、ECCと呼ぶ）を用いた試験体による引張試験を行った。表 - 5.1 に使用した材料の配合を示す。使用した材料は、高強度ポリエチレン（高強度PE）を体積混入率で 1.5%，同様にビニロン（PVA）を 2.0%含有したECCである¹⁾。図 - 5.1 に、これら 2 種類のECCのダンベル型試験体による一軸引張試験結果を示す。なお、高強度PEについては、今回試験を行っていないが、同一配合による結果を参考に示す²⁾。これによると、いずれのECCも検長 100mmにおいて、およそ 1%程度の伸び性能を有していることが分かる。また、複数ひび割れも生じており、ひずみ硬化型の材料であった。

表-5.1 示方配合

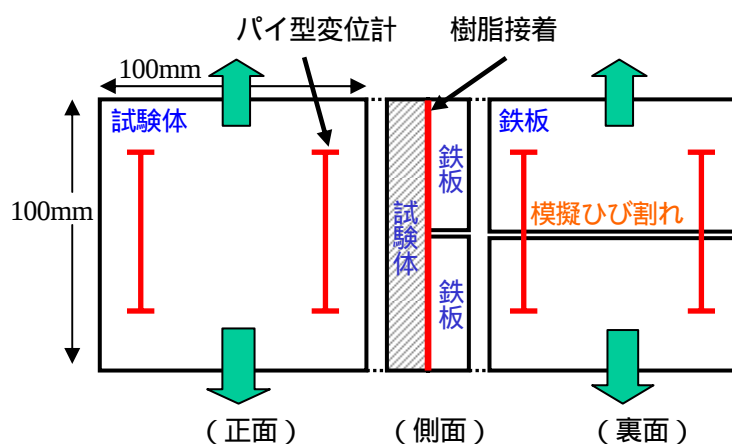
使用繊維	体積混入率 %	水セメント比 %	単用量 (kg/m ³)					
			水	セメント	細骨材	増粘材	減水剤	繊維
高強度 PE	1.5	30	342	1264	395	0.9	37.92	14.7
PVA*	2.0	46	364	791	514	-	-	19.6

*増粘剤：バイオサッカライド系，混和剤：高性能 AE 減水剤，を使用。ただし，添加量は不明。



(2) 作製した試験体

図 - 5.2 にひび割れ追従性の試験体の概要を示す。試験体には、断面が 100×100mm で厚さが 10，15，20mm の 3 種類を用い，その片面に大きさ 100×50mm で，厚さが 1，3，5mm の鉄板を 0，1，5mm 間隔で樹脂接着することにより 模擬ひび割れとした。なお，鉄板は同じ厚さの物を組み合わせて使用した。通常の適用を考える



と、コンクリート及びそのひび割れ幅で試験を行うことが望ましいが、試験体作製の繁雑さ、及び境界条件の明確化を目的に鉄板の接着を基本とした。

(3) 試験方法

図 - 5.3 に示すように、試験体の両端をつかみ具で固定し、縦型に試験体を設置して、徐々に強制変位を与えた。なお、変位計の容量が 2mm であるため、最大変位が 2mm を超えないように変位を制御した。

試験は、試験体厚さ、鉄板厚さ、模擬ひび割れ幅、3 つの条件の組合せによる 27 シリーズの下で、それぞれの ECC について行った。1 シリーズにつき 3 体ずつ行い、試験体 1 体につき、鉄板および試験体の表面にそれぞれ 2 個ずつ、合計 4 個のパイ型変位計（検長 50mm、精度 1/2000mm）により変位を計測し、ロードセル（50kN）により荷重を計測した。4 個のパイ型変位計は、模擬ひび割れの中心をまたぐようにして設置した。



図 - 5.3 試験体取り付け状況

5.2 試験結果と考察

(1) 試験体厚さに関する考察

図 - 5.4 及び 5.5 に、高強度 PE 及び PVA の試験体厚さのみが異なる 3 シリーズの荷重 - 変位関係を示す。なお、図上の記号は、試験条件を表したもので、試験体厚さ - 鉄板厚さ - 模擬ひび割れ間隔を意味している。グラフ中にはその条件の下で行われた 3 体の試験結果を表しており、荷重はロードセルにより計測された値、変位は 1 体につき 4 個設置されたパイ型変位計の平均値を示したものである。なお、グラフ中の○印は最大荷重時と定義された点を示しており、グラフの最大荷重時における変位を、その試験体のひび割れ追従性と定義した。

図 - 5.4 及び 5.5 より、試験体厚さ 10mm の結果はばらつきが少なく、逆に、試験体厚さ 20mm ではばらつきが大きくなった。これは、試験体が厚くなると、繊維の分布に偏りが生じたり、気泡が多く混入していることなどが考えられる。また、試験体厚さ 20mm の方が最大荷重が大きくなっているが、試験体厚さ 10mm の 2 倍には必ずしもなっていない。試験体厚さが薄い場合には、繊維の配向性が 2 次元的になっており、強度が高くなっているものと推察される。

(2) 鉄板厚さに関する考察

図 - 5.8 及び 5.9 に、高強度 PE 及び PVA の鉄板厚さのみが異なる 3 シリーズについて荷重 - 変位関係を示す。模擬ひび割れ幅が 0mm の場合において、鉄板厚さ 1mm よりも 5mm の方が最大荷重が大きいという傾向が見られる。これは供試体作製時に鉄板間に接着剤が侵入したものと考えられるが、図中の○印の位置をひび割れ追従性と評価すれば、その他の試験体についてはほぼ同程度のひび割れ追従性が得られている。以上より、今回の実験の範囲内では、鉄板厚の違いがひび割れ追従性に及ぼす影響は、明確ではなかった。

(3) 模擬ひび割れ幅に関する考察

図 - 5.10 及び 5.11 に、高強度 PE 及び PVA について、模擬ひび割れ幅のみが異なる 2 シリーズについて荷重 - 変位関係を示す。模擬ひび割れ幅が 0mm の場合には、試験体がほとんど伸びることなく最大荷重に達し、後に急激な荷重の低下が見られるものがある。この原因としては、前述のとおり、

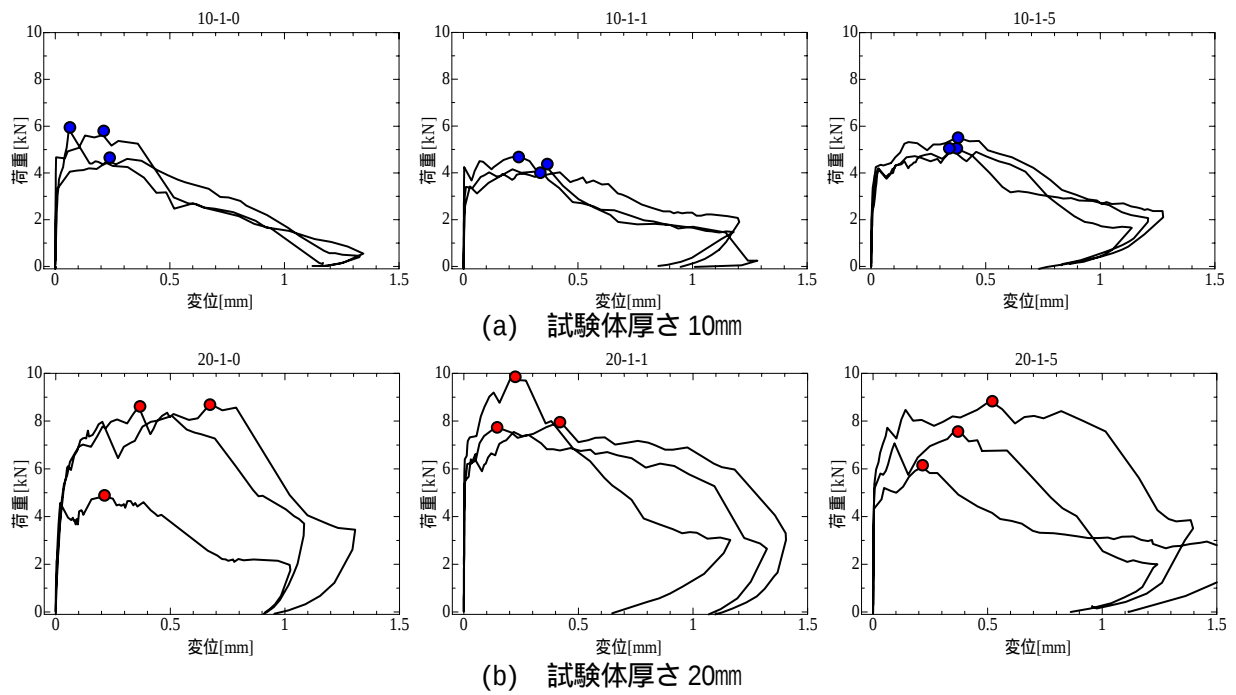


図 - 5.4 高強度 PE 試験体厚さ別荷重 - 変位関係図

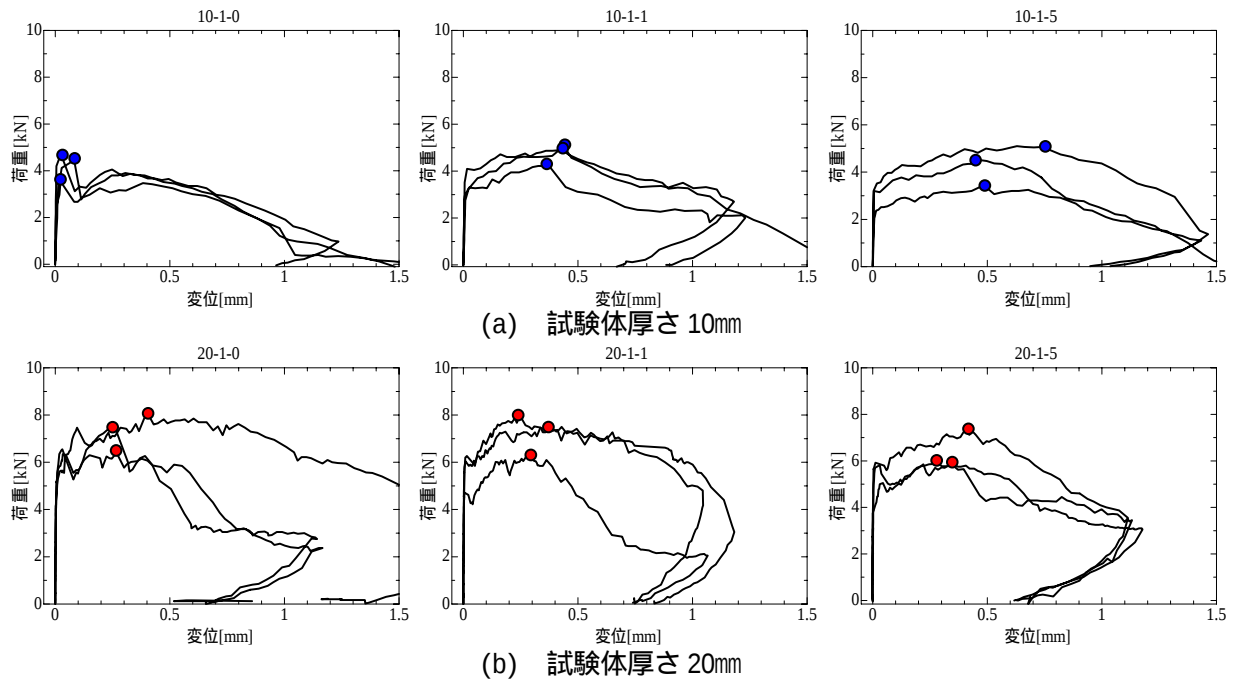
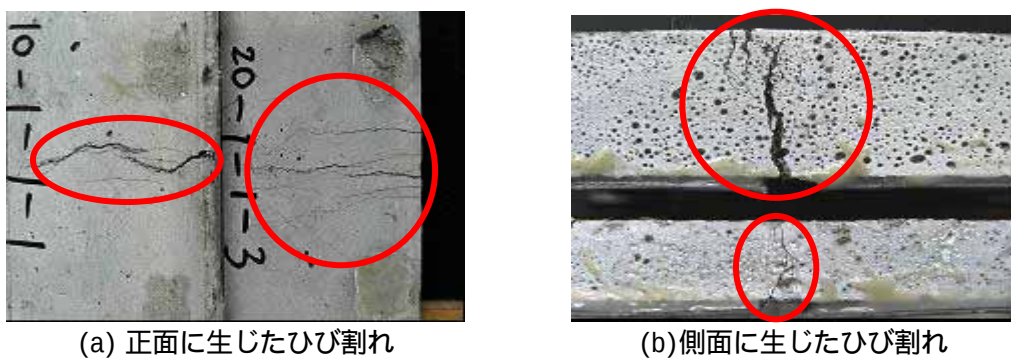


図 - 5.5 PVA 試験体厚さ別荷重 - 変位関係図



PVA[10-1-1 (左) と 20-1-1 (右)] 高強度 PE[10-1-5 (下) と 20-1-5 (上)]

図 - 5.6 厚さのみが異なる試験体のひび割れの様子

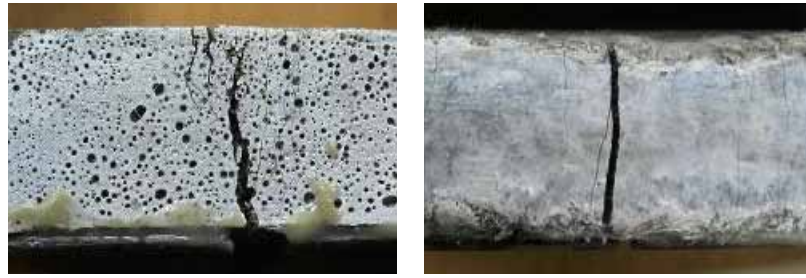
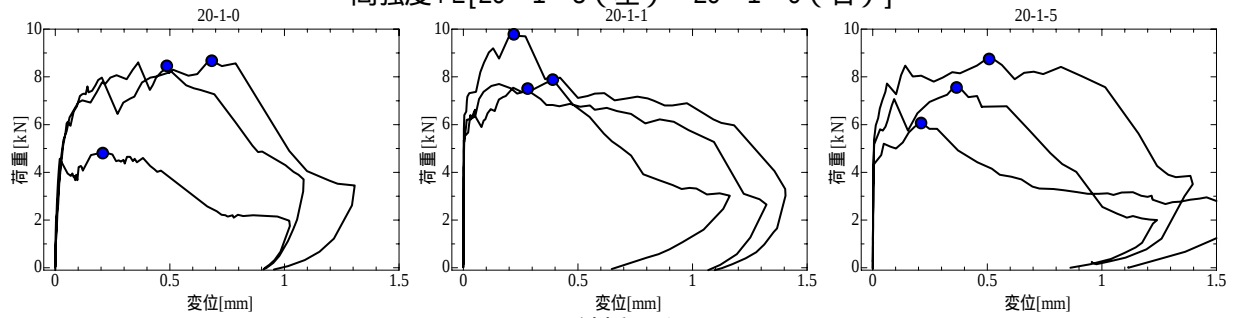
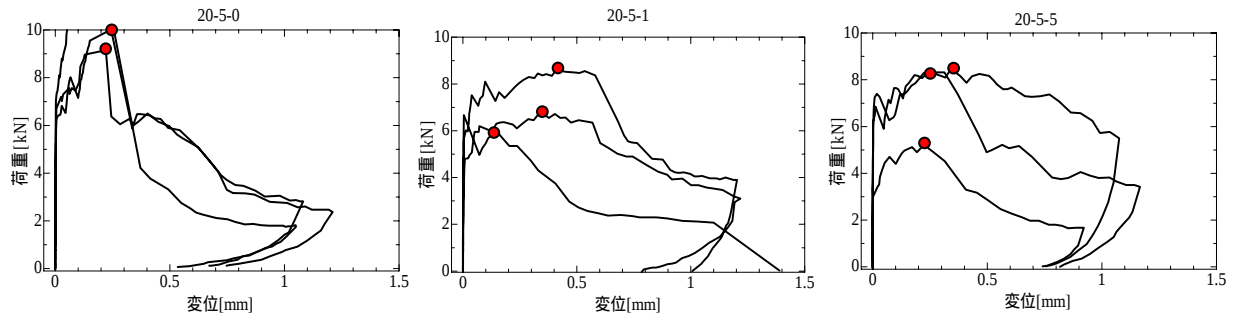


図 - 5.7 模擬ひび割れ幅のみが異なる試験体のひび割れの様子

高強度 PE[20 - 1 - 5 (左) 20 - 1 - 0 (右)]

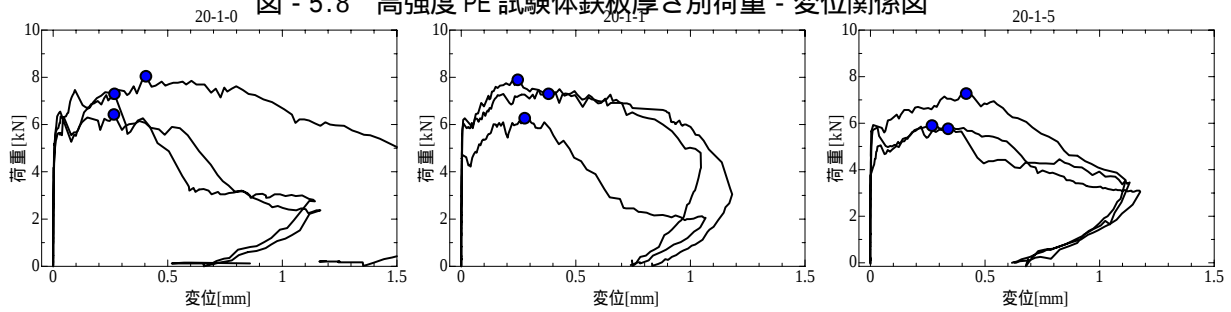


(a) 鉄板厚さ 1mm

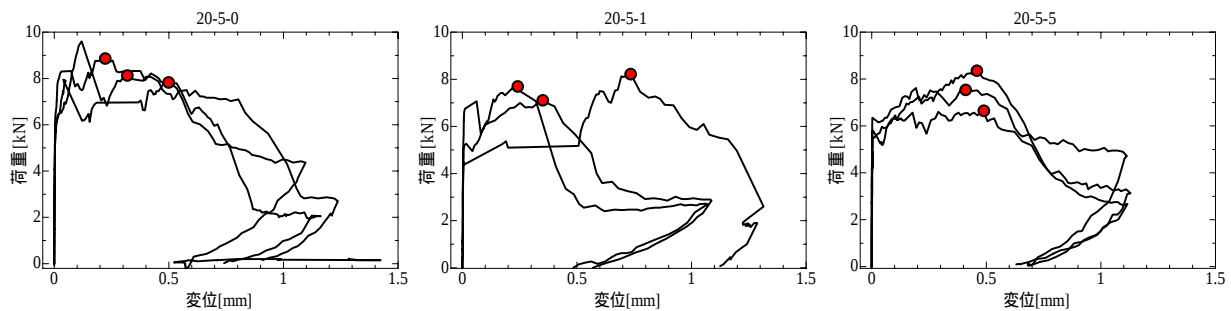


(b) 鉄板厚さ 5mm

図 - 5.8 高強度 PE 試験体鉄板厚さ別荷重 - 変位関係図



(a) 鉄板厚さ 1mm



(b) 鉄板厚さ 5mm

図 - 5.9 PVA 試験体鉄板厚さ別荷重 - 変位関係図

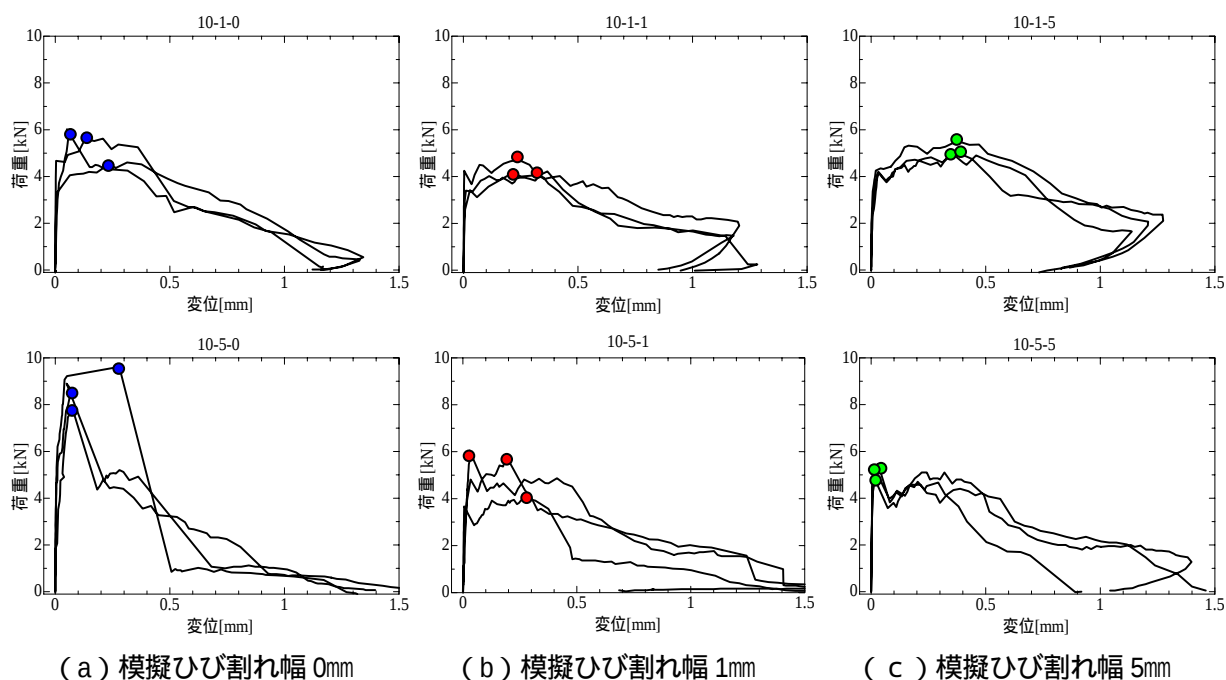


図 - 5.10 高強度 PE 試験体模擬ひび割れ幅別荷重 - 変位関係図

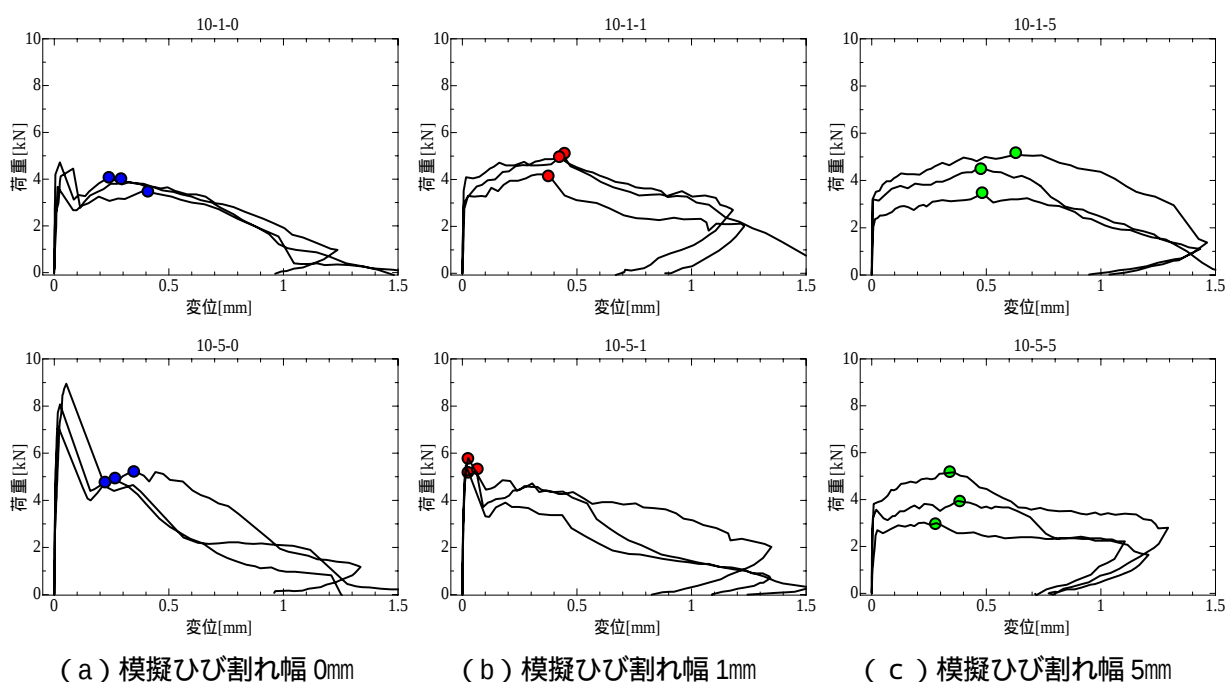


図 - 5.11 PVA 試験体模擬ひび割れ幅別荷重 - 変位関係図

鉄板を試験体に接着する際に接着剤が鉄板の間に入り込み、試験の際に荷重を負担している可能性が考えられる。いずれの ECC においても、模擬ひび割れ幅が大きくなるほど、ひび割れ追従性がやや大きくなることから分かる。これは、模擬ひび割れ幅が大きくなると、その近傍のひび割れ発生領域が大きくなることによるものであり、図 - 5.12 に示すように、模擬ひび割れ幅が大きい方が、ひび割れ本数が多くなっている。

(4) 材料の違いに関する考察

図 - 5.13 に、2 種類の ECC の、鉄板厚さ 1mm の場合の荷重 - 変位関係を示す。高強度 PE よりも

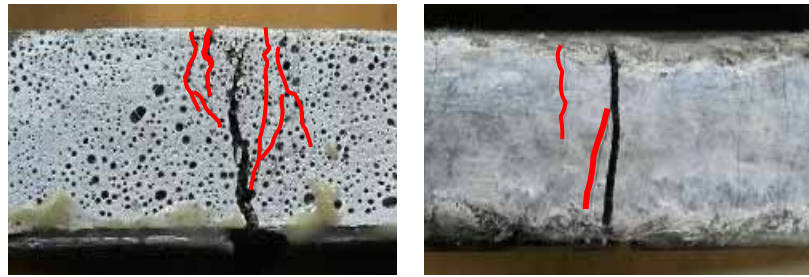


図 - 5.12 模擬ひび割れ幅のみが異なる試験体のひび割れの様子
高強度 PE[20 - 1 - 5 (左) 20 - 1 - 0 (右)]

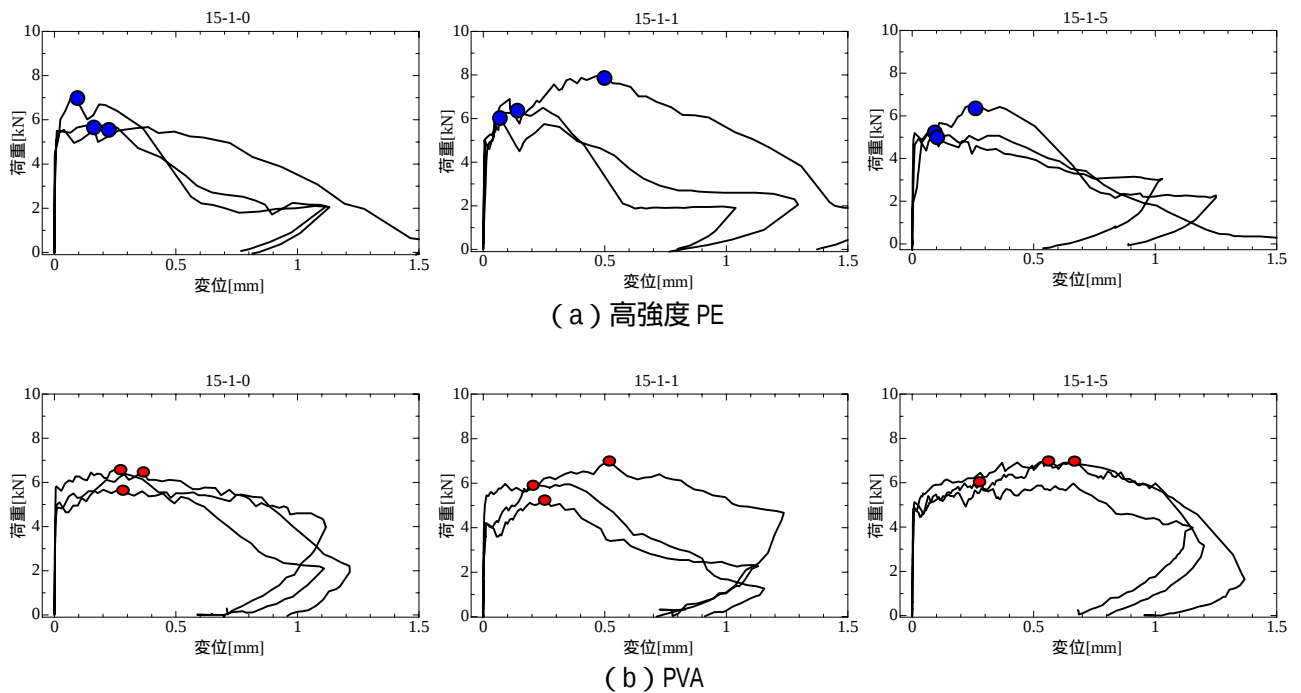


図 - 5.13 材料別荷重 - 変位関係図

PVA 試験体の方がばらつきが小さく、安定した結果が出ている。最大荷重に至った後も、PVA の方が荷重の低減が小さく、靱性が大きいと言える。この理由は、PVA の方が高強度 PE よりも繊維の体積混入率が高く、ひび割れ分散性に優れていたためと考えられる。

5.3 まとめ

各試験体から得られた結果のまとめとして、図 - 5.14 から 5.16 に試験体厚さ別のひび割れ追従性、模擬ひび割れ幅別のひび割れ追従性、鉄板厚さ別のひび割れ追従性、についてのグラフを示す。各グラフにおける凡例は、それぞれ、鉄板厚さ - 模擬ひび割れ幅、試験体厚さ - 模擬ひび割れ幅、試験体厚さ - 鉄板厚さを意味している。これらの結果も含め、本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 今回の実験の範囲内では、試験体厚さの違いがひび割れ追従性に及ぼす影響は、明確ではなかった。
- 2) 今回の実験の範囲内では、鉄板厚さの違いがひび割れ追従性に及ぼす影響は、明確ではなかった。
- 3) いずれの ECC においても、模擬ひび割れ幅が大きくなるほど、ひび割れ追従性がやや大きくなる。模擬ひび割れ幅が大きくなると、その近傍のひび割れ発生領域が大きくなることによるものである。

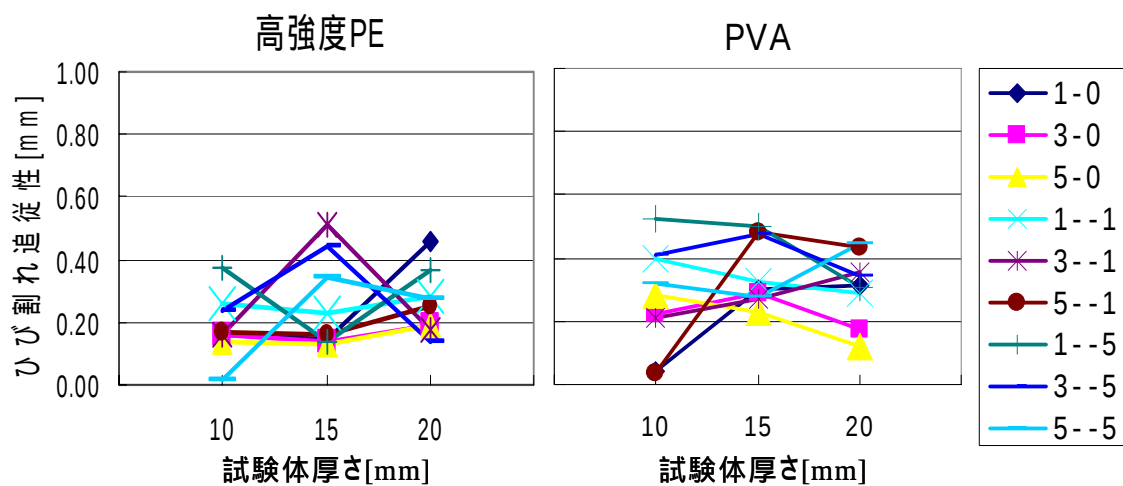


図 - 5.14 試験体厚さ別ひび割れ追従性

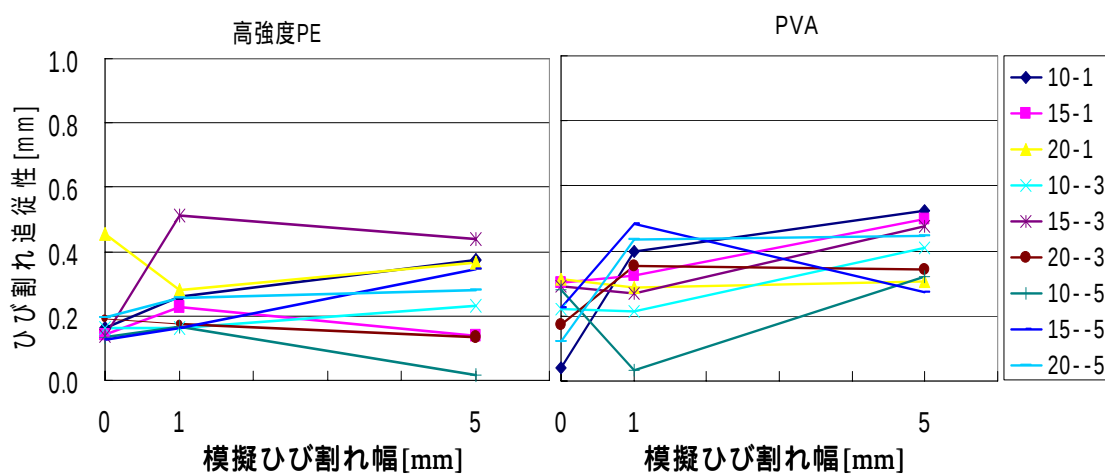


図 - 5.15 模擬ひび割れ幅別ひび割れ追従性

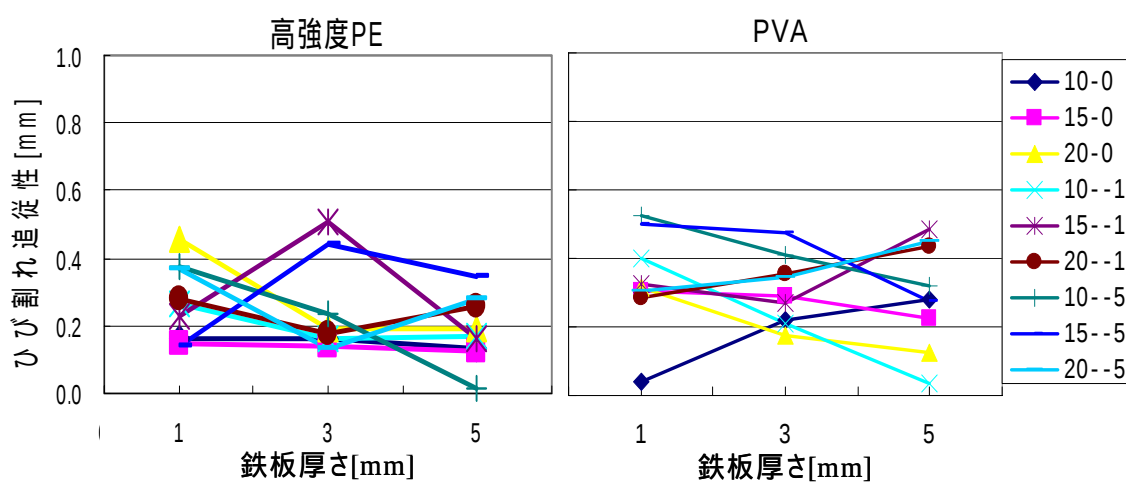


図 - 5.16 鉄板厚さ別ひび割れ追従性

- 4) 最大荷重に至った後も ,高強度 PE より PVA の方が荷重の低減が小さく ,靱性が大きいといえる .
これは , PVA の方が高強度 PE よりも繊維の体積混入率が高く , ひび割れ分散性に優れているためである .
- 5) ダンベル型試験では , 最大荷重時の変位が 1mm (検長 100mm で 1%) であるが , ひび割れ追従性試験ではそれ以下になる場合が多い .

< 5 章の参考文献 >

- 1) 閑田徹志ら : 曲げ試験を用いた高靱性複合材料 ECC の引張力学性能管理に関する実験的検討 , 鹿島技術研究所年報 , 第 52 号 , pp.131 - 132 , 2004
- 2) 国枝稔ら : 高靱性セメント複合材料を用いた補修部材のひび割れ分散性に関する解析的検討 , 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集 , 日本コンクリート工学協会 , pp.47 - 54 , 2003

6. まとめ

本研究開発では、高靱性セメント複合材料の表面保護工を開発するにあたり、特にひび割れ追従性に着目した設計方法を図 - 6.1 のように提案した。なお、今後の課題として以下があり、引き続き検討を行っていく予定である。

- ・ ひび割れ幅変動の計測データベースの充実
- ・ 種類の異なる材料へのひび割れ追従性試験（動的，静的）の適用性の確認

ひび割れ追従性を考慮した高靱性セメント系表面保護工

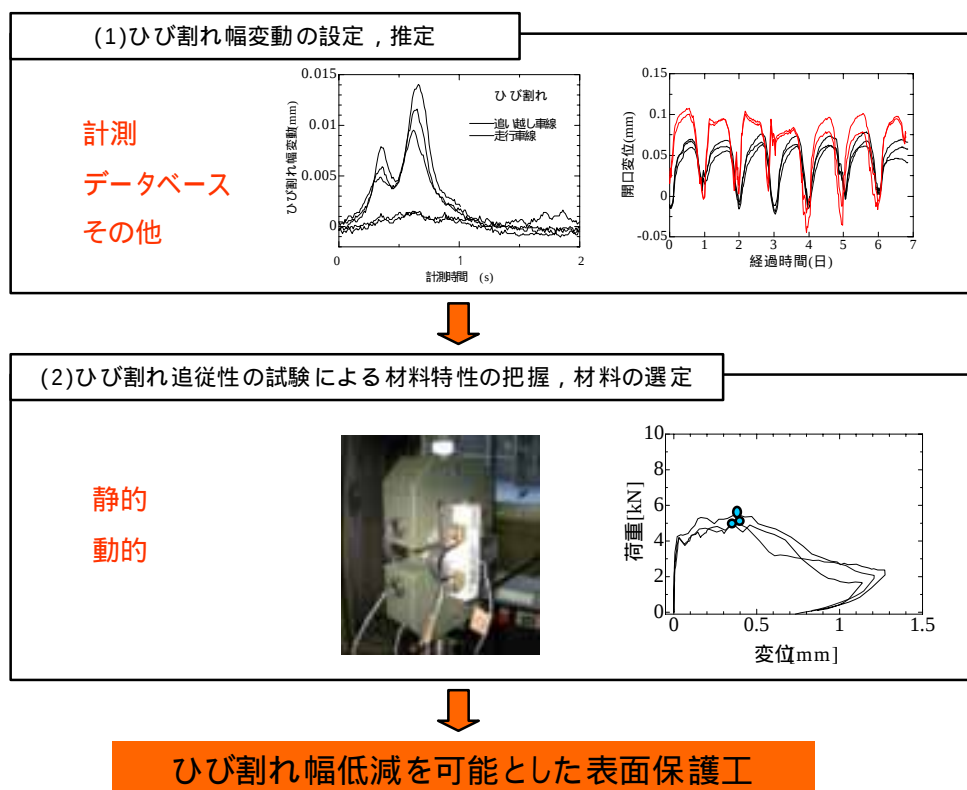


図 - 6.1 本研究開発での提案