

論文 高靱性セメント系複合材料のひび割れ追従性の評価

撫養啓祐^{*1}・国枝 稔^{*2}・Ahmed Kamal^{*3}・中村 光^{*4}

要旨：複数ひび割れを生じるひずみ硬化型セメント系複合材料（SHCC）を既設コンクリート構造物の補修等に用いる場合には、母材となるコンクリート中のひび割れへの追従性が重要である。本研究では、エポキシなどの表面被覆材のひび割れ追従性試験を参考に、SHCCのひび割れ追従性試験の方法を提案した。その結果、一軸引張試験による変形能に比べて、ひび割れ追従性試験による変形能が極端に小さくなることが明らかとなった。

キーワード：ひずみ硬化型セメント系材料, SHCC, ひび割れ追従性, ゼロスパン, 補修

1. はじめに

ひずみ硬化型セメント系複合材料（Strain Hardening Cementitious Composites, SHCC）は、引張力の作用下において、終局強度が、ひび割れ発生時の応力よりも高くなるとともに、複数の微細なひび割れを生じる。したがって、コンクリート構造物の構造性能の向上だけでなく、ひび割れ幅低減がもたらす耐久性の大幅な向上が期待できる。従来のセメント系補修材料に代わる新たな材料として、既設コンクリート構造物の表面補修などへの適用が試みられている¹⁾。具体的には、図-1に示すように、母材コンクリート中のひび割れが、SHCC層では複数本に分散しており、コンクリート構造物内部への物質の侵入を抑制し、また表面に生じるひび割れの幅が微細であることから、美観の低下を抑制するなどの効果が期待できる。

一般に、コンクリート構造物用の表面補修に用いられるエポキシ樹脂等の表面被覆材では、ひび割れ追従性が重要な性能として要求されており、そのための試験方法（ゼロスパン試験）が土木学会規準（JSCE-K-532）に規定されている。ひび割れ追従性とは、母材となるコンクリートのひび割れ近傍において、補修材料の局所

破壊に対する抵抗性を示すものである。ここで、母材コンクリートと先述のSHCCでは、ひび割れ発生後の変形性能が極端に異なるため、両者の複合部材においては、SHCCにひび割れ追従性が要求されるといえる。

本研究では、SHCCのひび割れ追従性評価方法の提案を目的とし、ゼロスパン試験における各種要因が試験結果に及ぼす影響について、実験的に検討した。

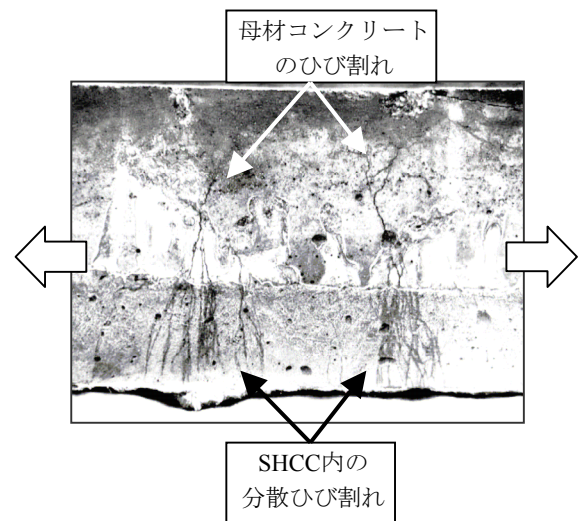


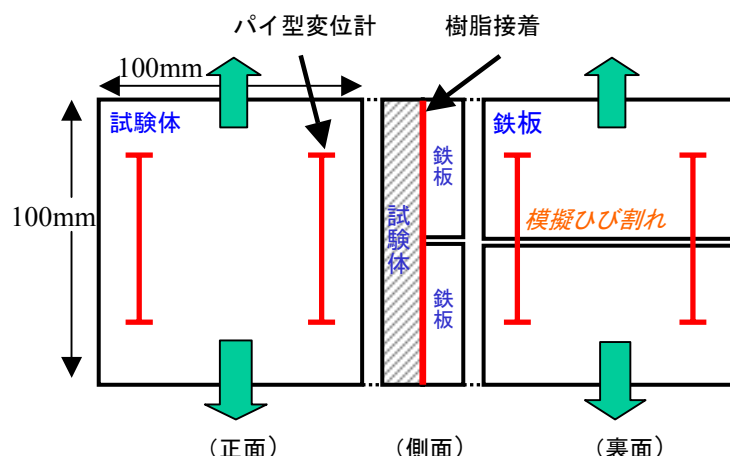
図-1 SHCCのひび割れ分散効果のイメージ

*1 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

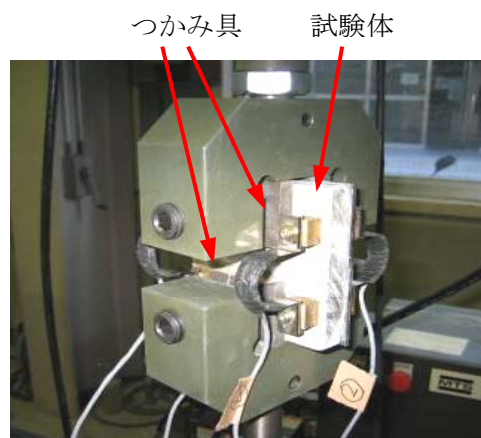
*2 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻助教授 博士(工学)（正会員）

*3 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻（正会員）

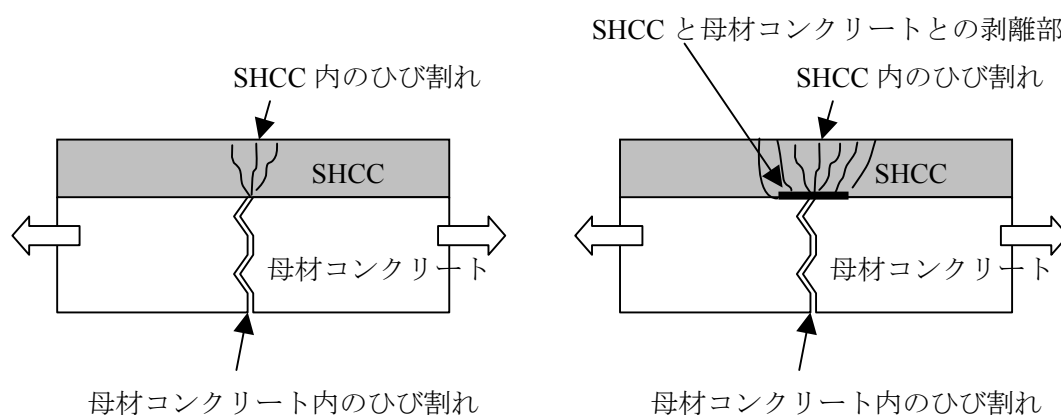
*4 名古屋大学 大学院工学研究科社会基盤工学専攻教授 博士(工学)（正会員）



図－２ 供試体概要図



写真－１ 供試体取付け状況



図－３ SHCC と母材コンクリートの付着がひび割れ追従性に及ぼす影響（左図：良好な付着の場合，右図：ひび割れ近傍に剥離が生じた場合）

2. ひび割れ追従性試験の概要と特徴

SHCC のひび割れ追従性評価方法の開発を目的とし，図－２，写真－１に示すようなゼロスパン試験を実施した。100×100mm の SHCC に，50×100mm の鉄板 2 枚を，ある隙間を設けてエポキシ樹脂で接着し，その隙間に対して直角方向に引っ張る試験方法である。なお，表面被覆材のひび割れ追従性試験では，モルタル板を用いて，母材コンクリートを模擬しているが，本研究では鉄板により補修時の境界条件を再現した。すなわち，鉄板を母材コンクリート，鉄板間の隙間がひび割れ幅としてモデル化されている。なお，実際の適用等を勘案すると，母材はコンクリート（またはモルタル）及び実際に想定されるひび割れ幅で試験を行うことが望まし

いが，試験体作製の煩雑さ，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。特に，境界条件については，SHCC および母材コンクリートの付着を想定した場合，ひび割れ部近傍で両者の剥離が懸念される。この剥離は，図－３に示すように，SHCC 内のひび割れ発生領域を拡大させるため，みかけの変形能が過大に評価される。既往の研究でも，SHCC と母材コンクリートの剥離を積極的に利用した補修方法が検討されているが²⁾，本研究では SHCC の材料特性としてのひび割れ追従性の評価を目的としており，剥離の影響を削除する方法を採用した。本研究では，図－２に示される供試体について，模擬ひび割れ幅，鉄板厚および SHCC 厚の 3 つの因子に着目して，これらが SHCC のひび割れ追従

表－１ 使用した SHCC の配合³⁾

水結合材比 W/B	単位水量 (kg/m ³)	砂結合材比 S/B	収縮低減材 (kg/m ³)	繊維混入量 (%)	目標空気量 (%)
0.46	364	0.64	15	2.0	10

性試験結果に与える影響を把握し、SHCC を対象としたひび割れ追従性評価方法を提案する。

3. 実験概要

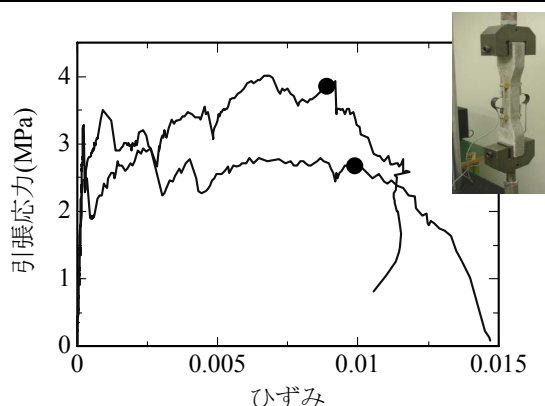
3.1 使用材料

使用した SHCC は、閑田らによって使用されている Engineered Cementitious Composites(ECC) とし、水セメント比を 46%，PVA 繊維（直径:0.04mm，長さ:12mm，弾性係数:40GPa，引張破断強度:1690MPa）を体積比で 2.0%混入した配合である³⁾。表－１に、使用した SHCC の配合を示す。

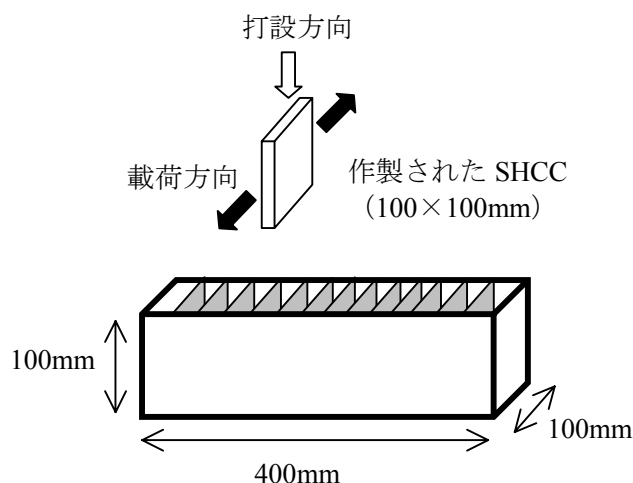
材齢 50 日での、圧縮強度は 49.9 MPa，弾性係数 18.6GPa であった。また、試験区間の断面が 30×30mm のダンベル型供試体による引張試験結果を図－４に示す。引張強度および荷重が急激に低下し始めるひずみ（●印）の平均値は、それぞれ 3.5 MPa と 0.9%（検長：100mm）であった。

3.2 供試体の種類

供試体の作製は、図－５に示すように、100×100×400mm の曲げ型枠内に鉄板を配置し、SHCC を充填した。なお、SHCC の厚さは 10，15，20mm の３種類とした。脱型後の SHCC について、図－２に示されたように、その片面に大きさ 100×50mm で、厚さが 1，3，5mm の鉄板を 0，1，5mm の隙間を空けてエポキシ樹脂で接着した。この時にできた隙間を、模擬ひび割れ幅とした。5mm の模擬ひび割れ幅は実際のひび割れ幅に比べて大きすぎるが、模擬ひび割れ幅とひび割れ追従性の関係を明確にするために設定した。エポキシ樹脂は出来るだけ薄く、均一になるように留意しながら塗布し、載荷時の引張方向と打設方向が垂直になるように供試体を作製した。



図－４ 使用した SHCC の応力－ひずみ曲線



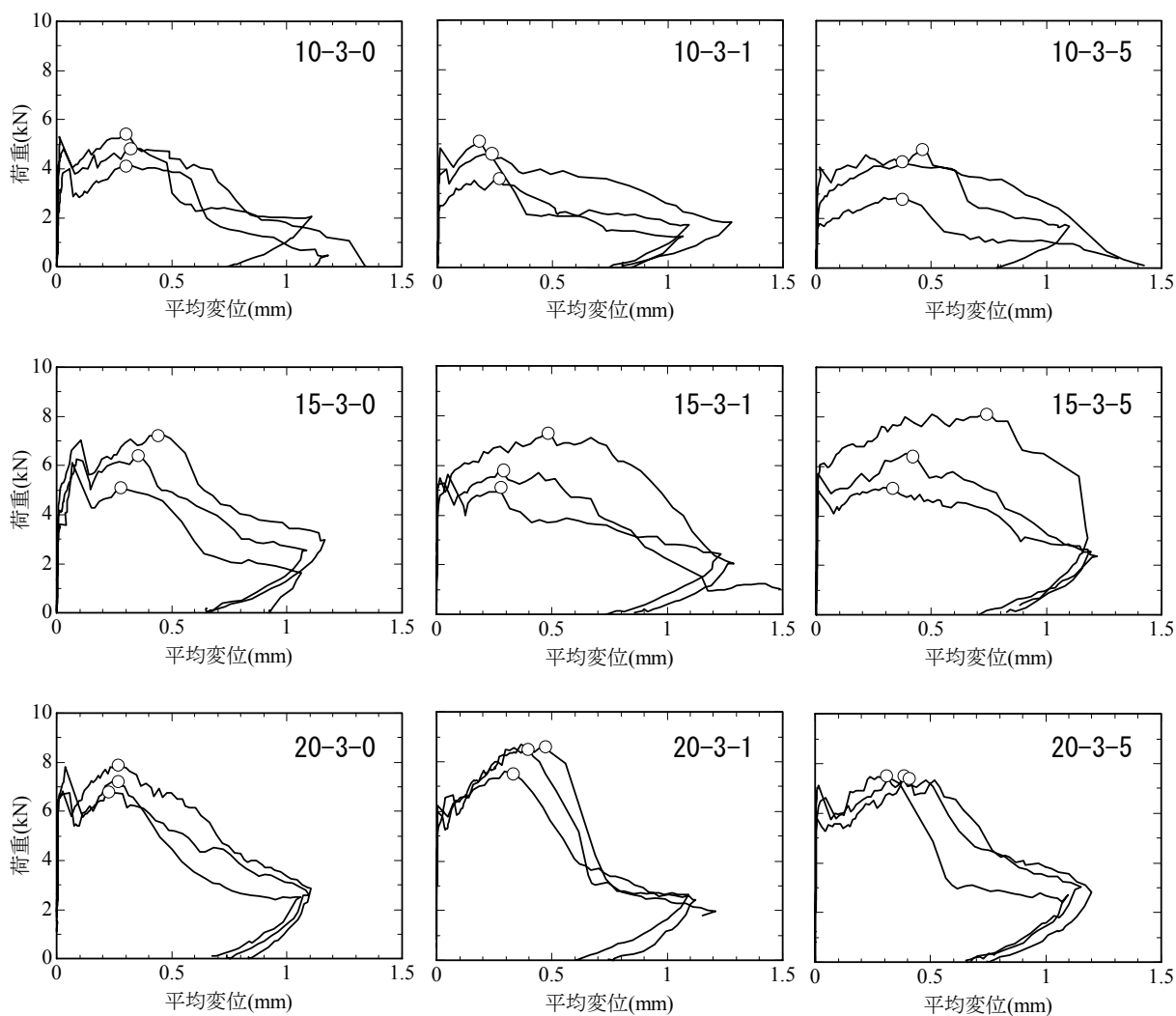
図－５ 供試体の作製方法の概要

表－２ 実験パラメータ

SHCC 厚 (mm)	鉄板厚 (mm)	模擬ひび割れ幅 (mm)
10, 15, 20	1, 3, 5	0, 1, 5

写真－１に示すように、供試体の両端をつかみ具で固定し、載荷速度 0.5mm/min を目安に載荷を行った。変位計の容量が 2 mm であるため、最大変位が 2mm になった時点で載荷を終了した。

載荷試験は、SHCC の材齢が 28 日～30 日の間に実施した。なお、鉄板の接着は、試験の前日に行った。表－２に示すように、試験は、模擬ひび割れ幅、鉄板厚および SHCC 厚の 3 つの条



図－6 荷重－平均変位の関係（鉄板厚 3mm の場合の例）

件の組み合わせによる 27 シリーズについて行った。試験は、1 シリーズにつき 3 体ずつ行い、供試体 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。

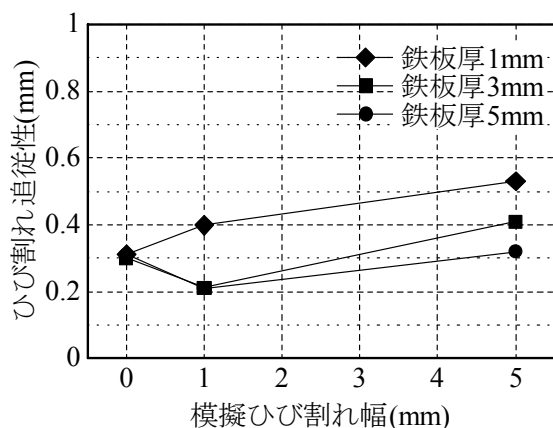
4. 実験結果

4.1 計測結果の例

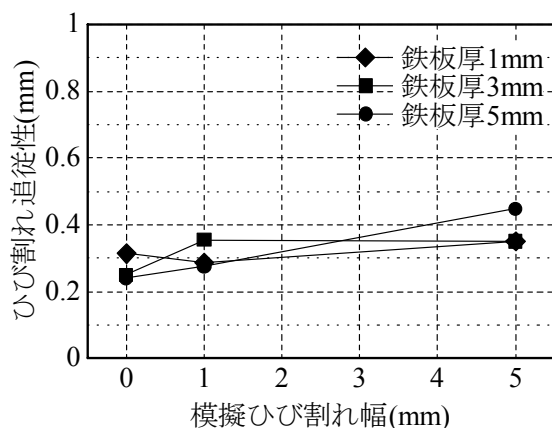
図－6 に得られた荷重－変位関係のうち、鉄板厚 3mm の結果を例示する。なお、図中の記号は試験条件を表したもので、“SHCC 厚－鉄板厚－模擬ひび割れ幅”，を意味している。グラフの中にはその条件下で行われた 3 体の結果を表しており、荷重はロードセルにより計測された値、

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、グラフ中のマル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、当該供試体のひび割れ追従性と定義した。なお、一部に初期ひび割れ発生荷重が最大値になったものがあつたが、模擬ひび割れ部にて 2 枚の鉄板どうしを接合した接着剤の影響と考えられたため、初期ひび割れ発生荷重を除く最大値を採用した。

図－6 によると、いずれの条件においても、初期ひび割れ発生後に、荷重が増加する、いわゆるひずみ硬化挙動が認められる。また、接着層（エポキシ樹脂）の剥離も本実験の範囲内では確認されなかった。



(a) SHCC 厚 10mm



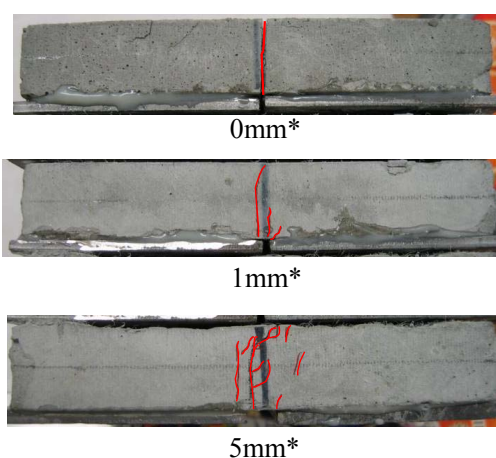
(b) SHCC 厚 20mm

図－7 ひび割れ追従性と模擬ひび割れ幅の関係（3体の平均値）

4.2 模擬ひび割れ幅に関する考察

図－7に、SHCC 厚が 10mm および 20mm に関して、模擬ひび割れ幅別のひび割れ追従性を示す。いずれの SHCC 厚においても、模擬ひび割れ幅が小さくなるほど、評価されるひび割れ追従性が小さくなる傾向にあり、模擬ひび割れ幅が 5mm の場合 0.3～0.5mm、模擬ひび割れ幅が 0mm の場合 0.2～0.3mm の範囲内にあった。これは、SHCC のひび割れ発生後の変形は、ひび割れの本数およびそれらの幅に依存し、模擬ひび割れ幅が小さいほど、ひび割れ発生領域が小さくなるためであると考えられる。また、SHCC 厚が 20mm の方が、鉄板厚の違いによる影響が小さい傾向にあった。写真－2に、模擬ひび割れ幅が異なる場合の、ひび割れ発生状況（SHCC 厚：15mm）を示す。これによれば、模擬ひび割れ幅が 5mm の場合には複数本生じているひび割れが、0mm の場合には一本しか生じていないことがわかる。SHCC 厚が 10mm および 20mm の場合でも、同様の傾向であった。

ここで、本研究で用いた SHCC は、図－4に示されるように、通常の一軸引張条件下ではひずみ硬化型材料であり、検長 50mm であることを勘案すると、検長内で約 0.5mm の伸びが計測される SHCC であることがわかる。一方、本研究で検討しているゼロスパンのひび割れ追従性試験によれば、ほとんどのケースで 0.5mm 以下となっており、鉄板の拘束によってもたらされ



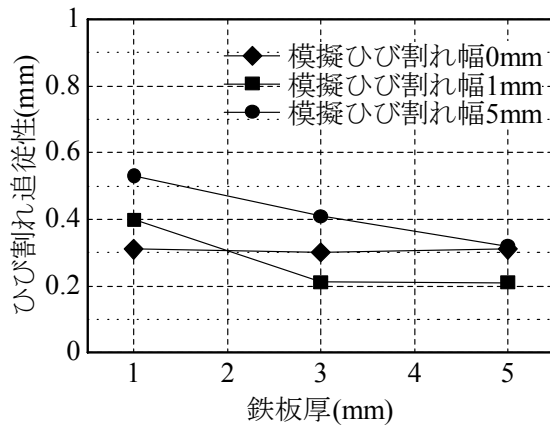
*載荷前の模擬ひび割れ幅

写真－2 模擬ひび割れ幅に依存したひび割れ発生状況（SHCC 厚：15mm）

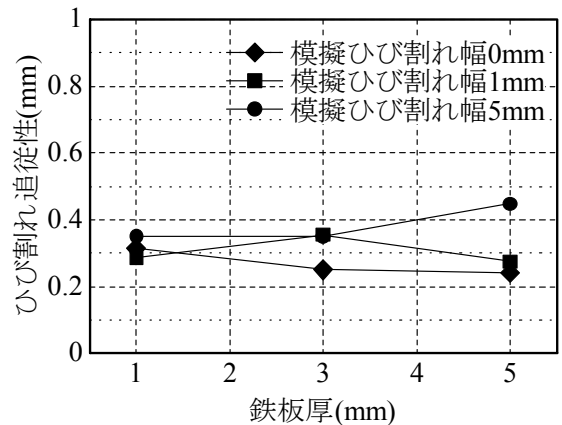
る特殊な境界条件が、部材としての変形能を低減させていることがわかる。以上より、模擬ひび割れ幅 0mm の結果が最も小さくなる点、実際のひび割れ幅に関して 1mm 程度以下を想定している点、および供試体の作製の勘弁さ、から模擬ひび割れ幅 0mm での条件で評価を行うことが望ましいと推察される。

4.3 鉄板厚に関する考察

図－8に、SHCC 厚が 10mm および 20mm に関して、鉄板厚さ別のひび割れ追従性を示す。これによると、SHCC 厚が 10mm の場合は、鉄板厚が大きくなるほどひび割れ追従性がやや小さくなるが、SHCC 厚が 20mm の場合は、鉄板厚が大きくなるほどひび割れ追従性がやや大き



(a) SHCC 厚 10mm



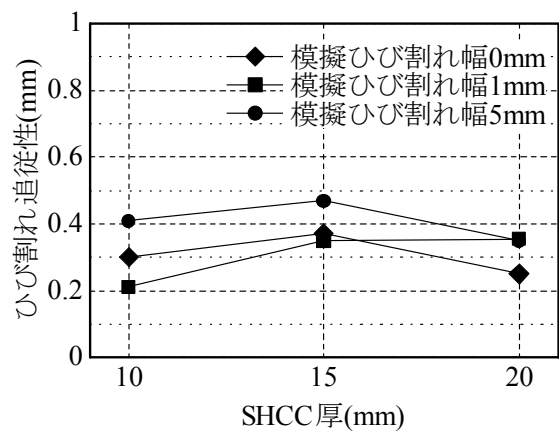
(b) SHCC 厚 20mm

図－8 ひび割れ追従性と鉄板厚の関係（3体の平均値）

くなる。これは、鉄板厚および鉄板の剛性、SHCC厚とSHCCの剛性により、供試体が偏心している可能性が考えられる。しかし、鉄板厚が3mm程度以上であれば、SHCC厚の違いによらず、同程度のひび割れ追従性が得られていることから、本研究で対象としたSHCCであれば、3mm以上の鉄板厚が適当であると考えられる。

4.4 SHCC厚に関する考察

図－9に、鉄板厚3mmに関して、SHCC厚を変化させた場合のひび割れ追従性の結果を示す。本実験の範囲内では、SHCC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。



図－9 ひび割れ追従性とSHCC厚の関係（3体の平均値）

較検討する予定である。

5. まとめ

SHCCを対象に、鉄板を用いたゼロスパンのひび割れ追従性試験を実施し、以下の知見を得た。

- (1) 本研究の範囲内では、試験体厚さの違い、鉄板厚さの違いがひび割れ追従性に及ぼす影響は小さく、模擬ひび割れ幅の影響が大きい結果となった。模擬ひび割れ幅が小さくなるほど、ひび割れ追従性も小さくなった。
- (2) 提案した試験により評価されたひび割れ追従性は、一軸引張試験の変形性能よりも小さくなる。これは、本実験において、模擬ひび割れ近傍にひび割れが集中して発生し、ひび割れ発生領域が小さくなったためである。

今後は、変形能の異なるSHCCについても比

参考文献

- 1) 六郷恵哲ほか: 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会, pp.133-140, 2003
- 2) Lim, Y.M. and Li, V.C.: Durable Repair of Aged Infrastructures using Trapping Mechanism of Engineered Cementitious Composites, Cement and Concrete Composites, Vol. 19, No. 4, pp. 171-185, 1997
- 3) 関田徹志ほか: 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