

論文 複数ひび割れを生じる高靱性セメント複合材料のひび割れ分散性の評価

国枝 稔*1・森川 秀人*2・山下 賢司*3・六郷 恵哲*4

要旨：本研究では，高靱性セメント複合材料を用いて長さの異なるはり供試体を作製し，微細なひび割れが分散して生じる領域（荷重や変形レベル）と，主ひび割れが大きく開口する領域でのひび割れ挙動に着目し，曲げ靱性との関係について検討した。分散したひび割れは，最大荷重時付近にて1本の主ひび割れが大きく開口し，破壊が局所化していくことが実験的に明らかとなった。さらに，荷重－変位曲線における最大荷重までの面積が，モーメントスパン内に生じたひび割れ本数と相関があり，この面積の値をモーメントスパンの体積で除した値がひび割れ分散性を評価する指標となり得る可能性が明らかとなった。

キーワード：高靱性セメント複合材料，複数ひび割れ，破壊の局所化

1. はじめに

複数ひび割れを生じる高靱性セメント複合材料の開発ならびに適用に関する研究が活発に行われている¹⁾。複合材料は引張または曲げ応力下にて複数ひび割れを生じる特徴があるが，生じたひび割れの本数や幅，間隔などは，材料の靱性に影響を及ぼすだけでなく，物質透過に対する抵抗性や美観などにも影響を与える。

一般に，高靱性セメント複合材料の引張試験や曲げ試験を実施した場合，微細なひび割れが分散して発生し，その後いずれかのひび割れが大きく開口し，破壊が局所化する。したがって，高靱性セメント複合材料の特徴を生かすためにも，微細なひび割れが発生する領域（荷重レベルや変形レベル）と，その後ひび割れが大きく開口する領域とをそれぞれ把握し，区別して考えることが重要である。微細なひび割れが発生する領域でのひび割れ性状（本数や幅など）に関する研究^{2), 3)}がいくつか行われているが，ひび割れ幅の計測はもとより，本数を計測することも難しい場合が多い。従って，高靱性セメント複合材料に生じる複数ひび割れの本数などを

定量的に評価し，靱性との関係について明確にした研究は少ないのが現状である。

本研究では，高靱性セメント複合材料を用いて長さの異なるはり供試体を作製し，曲げ応力下にて微細なひび割れが分散して生じる領域と，主ひび割れが大きく開口する領域でのひび割れ挙動に着目し，曲げ靱性との関係について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用した高靱性セメント複合材料

高靱性セメント複合材料として，Engineered Cementitious Composites (ECC) と鋼繊維補強コンクリート (SFRC) の2種類を用いた。両材料の配合をそれぞれ表-1, 2に示す。

ECC⁴⁾は長さ12mm，直径0.039mmのPVA繊維を体積混入率で2%混入した配合とし，容量500リットルのオムニミキサーにて練り混ぜた。

SFRCは，長さ30mm，直径0.6mmのインデント付ストレート鋼繊維を体積混入率で1.5%混入した配合を用い，容量100リットルの強制練りパン型ミキサーにて練り混ぜた。

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 助手 工博（正会員）

*2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻（正会員）

*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科（正会員）

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博（正会員）

表－1 ECCの配合

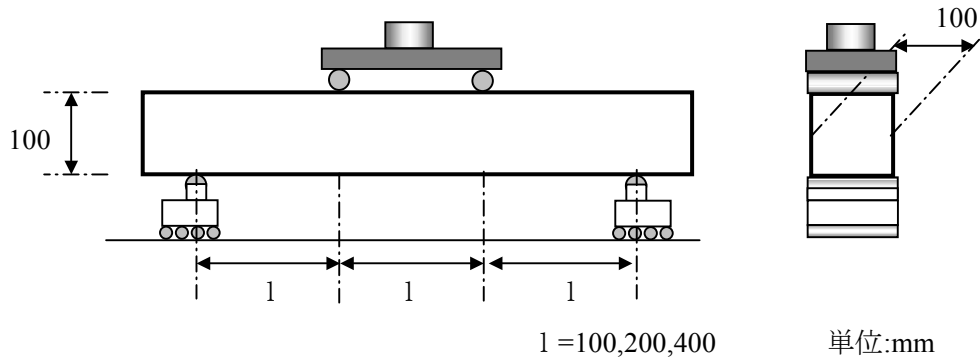
水結合材比	単位水量 (kg/m ³)	砂結合材比	収縮低減剤 (kg/m ³)	繊維混入量 (%)	空気量 (%)
0.46	364	0.84	15	2	10

- *1 セメント：中庸熟ポルトランドセメント
- *2 混和剤：高性能AE減水剤
- *3 結合材の15%をフライアッシュ（JIS II種）に置換
- *4 砂の9%の収縮低減剤を使用

表－2 SFRCの配合

水セメント 比	繊維混入 量(%)	単位量 (kg/m ³)						
		水	セメント* ¹	細骨材	粗骨材	繊維* ²	膨張材	混和剤* ³
0.5	1.5	185	350	914	753	117	20	4.2

- *1 早強ポルトランドセメント（膨張材をセメントに対して置換し混入）
- *2 鋼繊維（長さ30mm，直径0.6mm，インデント付）
- *3 高性能AE減水剤（ポリカルボン酸系）



図－1 荷重試験概要

2.2 供試体の形状と荷重試験方法

図－1 ならびに表－3 に示すように、高さ100mm，幅100mmを一定とし、長さを400mm，800mm，1400mmとした3種類のはりを作製し、それぞれのモーメントスパン長を100mm，200mm ならびに400mmの3等分点曲げ荷重試験を行った（図－1 参照）。試験時には、荷重（容量10kNと100kNのロードセルをそれぞれ使用）と荷重点変位（ストローク25mm，精度1/500mmの変位計を使用）を計測するとともに、供試体下面のモーメントスパン内に検長50mmのパイ型変位計（精度：1/2000mm）を図－2のように配置し、引張側の（開口）変位を計測した。

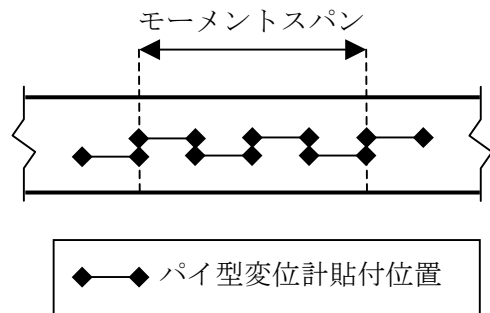
3. 実験結果

3.1 荷重－変位曲線ならびに曲げ強度

各供試体から得られた荷重－変位曲線のうち、

表－3 供試体の種類

材料	シリーズ	供試体長さ (mm) [モーメントスパン長]	本数
ECC	ECC-100	400[100]	4
	ECC-200	800[200]	2
	ECC-400	1400[400]	4
SFRC	SF-100	400[100]	4
	SF-200	800[200]	1
	SF-400	1400[400]	4



図－2 パイ型変位計位置（供試体下面、モーメントスパン200mmの場合）

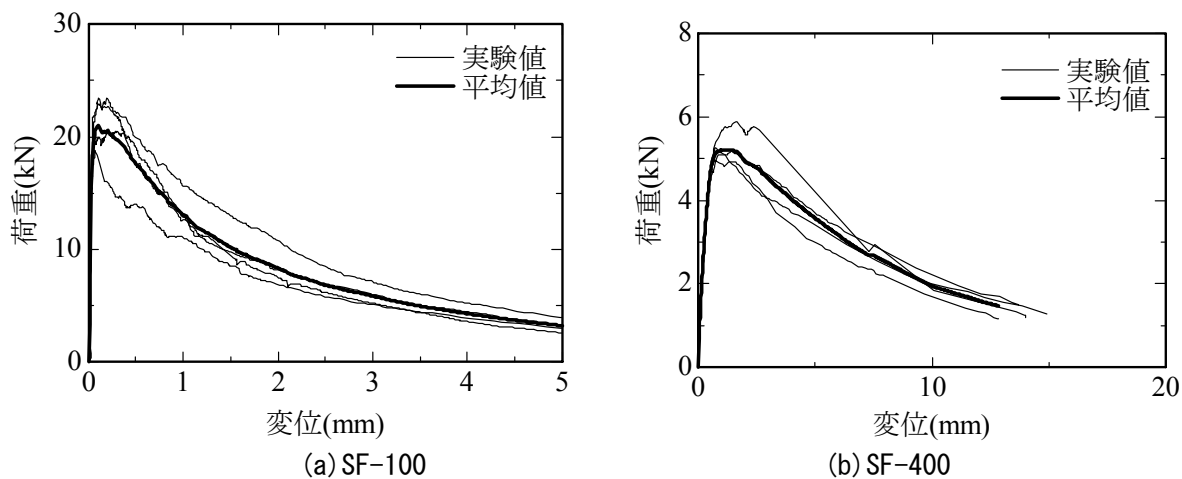


図-3 荷重-変位曲線 (SFRC)

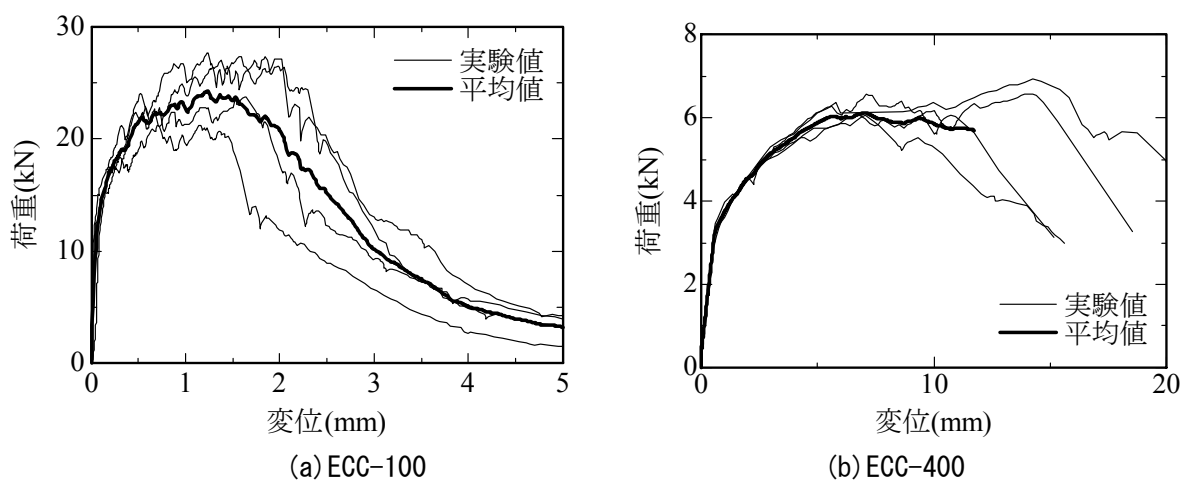


図-4 荷重-変位曲線 (ECC)

モーメントスパン長さ 100mm と 400mm の結果をそれぞれ図-3, 4 に示す。SFRC の場合、いずれの寸法においても、最大荷重以降に荷重が緩やかに低下していく結果となった。一方、ECC では、寸法の違いによらず、初期ひび割れ発生後、荷重が増加し擬似ひずみ硬化挙動を呈している。なお、SFRC および ECC について、いずれの供試体寸法においても、曲げ強度はそれぞれ約 6.3MPa, 7.5MPa であり、モーメントスパンの増大による曲げ強度の寸法効果は認められなかった。

3.2 変位分布

供試体下面に貼り付けたパイ型変位計により計測された変位（以後、開口変位とよぶ）を、該当する供試体の荷重-変位曲線とあわせて図-5 に示す。図中のパイ型変位計の値が、最大荷重付近まで漸増していく理由は、(a)検長内の

ひび割れ部近傍の弾性変形も計測していること、(b)検長内にひび割れが複数本生じていること、(c)いったん生じたひび割れも荷重の増加とともに徐々に開口していくこと、などによるものと考えられる。

図-5(a)に示すように、SFRC では、最大荷重付近から 1 つの変位計の開口変位が大きくなっていくことが計測されている。図-6(a)に示すように、当該供試体の試験終了時のひび割れ写真によると、変位計位置 8 において、主ひび割れが大きく開口しており、主ひび割れが大きく開口することによって、荷重の低下が生じていることが明らかである。一方、ECC の場合、図-5(b)に示すように、複数の変位計により計測された値のうち、1 つが大きくなっていく様子が分かる。なお、主ひび割れの幅がその他に比べて急激に大きくなる時の変位は（図中の●

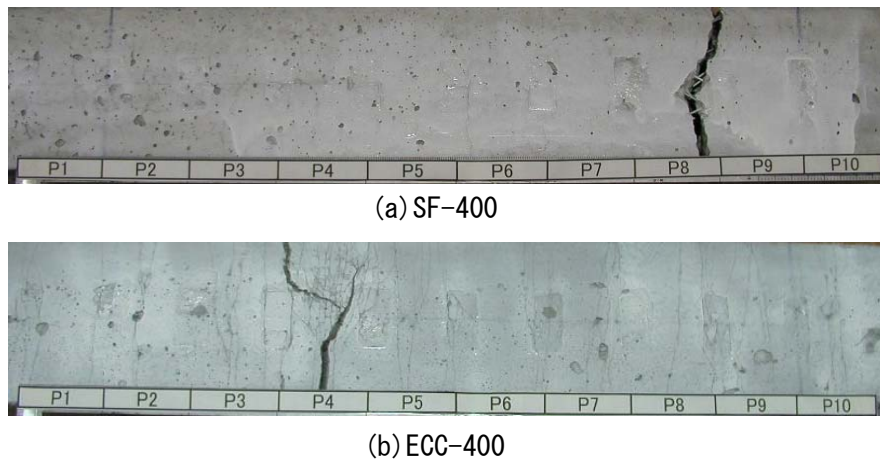
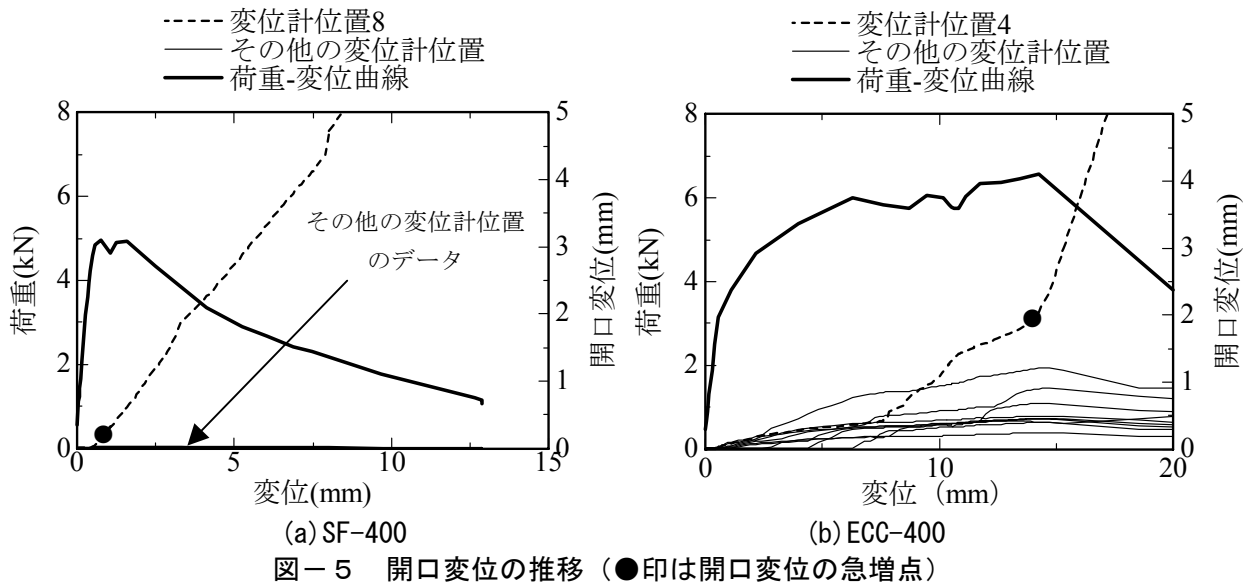
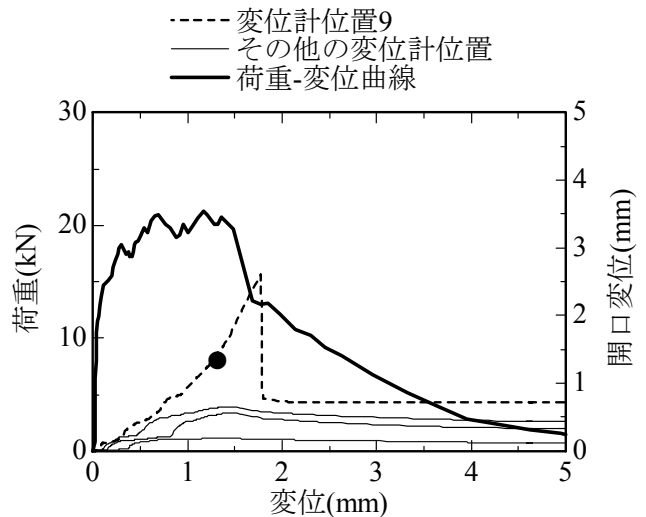


図-6 ひび割れ写真 (試験終了後)

印で示す), 最大荷重時付近であった。なお, ●印の位置は, 主ひび割れの開口に伴って, その他の変位計にて計測された値がそれ以上大きくなり, 逆に小さくなるものもあることも勘案し決定した。図-7にECC-100シリーズの開口変位を示す。モーメントスパン長の短い場合においても, 1つの変位計の値が最大荷重時付近から特に大きくなる傾向にある。なお, 約15kN付近にて, 急激に荷重が小さくなっているのは, 変位計の固定部分が外れたことによるものである。

以上の結果から, ひび割れが分散して生じる領域と, そのうちの1つが局所化している現象を, 実験により計測することができ, その分岐点が最大荷重付近であることが明らかとなった。すなわち, 高靱性セメント複合材料の特徴の1



つである微細ひび割れが分散している状態は最大荷重付近までであり, 利用の際にはこの点を照査することが重要であることを示している。

表－４ 各供試体のひび割れ状況

材料の種類	シリーズ	モーメントスパン長(mm)	モーメントスパン内のひび割れ本数(本)	最大荷重までの面積 $W_{peak}(N \cdot mm)$	消散エネルギー E_v (N/mm^2)	
					供試体毎	平均値
ECC	ECC-100-1	100	14	33800	0.0338	0.0292
	ECC-100-2		19	27900	0.0279	
	ECC-100-3		12	34000	0.0340	
	ECC-100-4		8	21100	0.0211	
	ECC-200-1	200	48	66400	0.0332	0.0237
	ECC-200-2		17	28600	0.0143	
	ECC-400-1	400	48	81600	0.0204	0.0144
	ECC-400-2		30	36400	0.0091	
	ECC-400-3		35	74800	0.0196	
	ECC-400-4		26	34000	0.0085	
SFRC	SF-100-1	100	3	1700	0.0017	0.0027
	SF-100-2		5	5500	0.0055	
	SF-100-3		3	2400	0.0024	
	SF-100-4		4	1000	0.0010	
	SF-200	200	5	2800	0.0014	0.0014
	SF-400-1	400	10	8000	0.0020	0.0012
	SF-400-2		7	2800	0.0007	
	SF-400-3		10	6000	0.0015	
	SF-400-4		6	2800	0.0007	

3.2 ひび割れ性状

表－４ に、各供試体に生じたひび割れ本数をまとめて示す。なお、ひび割れ本数は、供試体下面について、供試体幅の中央部に供試体軸方向に線を引き、この線と交わったひび割れを目視により確認した。なお、モーメントスパン外に生じたひび割れは考慮していない。

ECC の場合、モーメントスパン長の違いによらず、ECC 特有の微細なひび割れが数多く発生し、ECC-100 シリーズで 8～19 本、ECC-400 シリーズで 26～48 本であった。一方、SFRC の場合、SF-100 の供試体では 3～5 本、SF-400 では 6～10 本であった。両材料ともに、モーメントスパンが長くなるほど、ひび割れ本数が多くなり、特に SFRC においてもひび割れ間隔はかなり大きいものの、主ひび割れの他に複数の微細なひび割れが生じていた。

3.3 最大荷重時までの面積とその利用法

図－８ に、ひび割れ本数と、荷重－変位曲線の最大荷重までの面積 W_{peak} を示す。なお、前節において、ECC に生じた複数ひび割れのうち、主ひび割れが開口するのは、最大荷重付近であ

ることを勘案し、荷重－変位曲線の最大荷重までの面積を利用した (図－９ 参照)。これによると、両材料ともひび割れ本数と最大荷重時までの面積に正の相関があることが明らかとなった。このことは、少なくとも最大荷重時までの面積が大きければ、ひび割れが多く発生していることを表していると考えられる。

さらに分散したひび割れがモーメントスパン内に均一に生じていると仮定し、荷重－変位曲線の最大荷重時までの面積をモーメントスパン内の供試体体積で除して正規化した値 (単位体積あたりの消散エネルギー E_v) を表－４ ならびに図－１０ に示す。ECC-100 ならびに SF-100 から得られた値に比べて、ECC-400 ならびに SF-400 から得られた値の方が若干小さくなっている。このことは、モーメントスパンの増加に伴い、単位体積当りに生じたひび割れ本数が相対的に少なくなっていることに相当しており、本研究の範囲内では、ひび割れ分散性の評価指標として利用できる可能性が示された。

今後は、供試体の形状の違いなどに着目した検討を行う予定である。

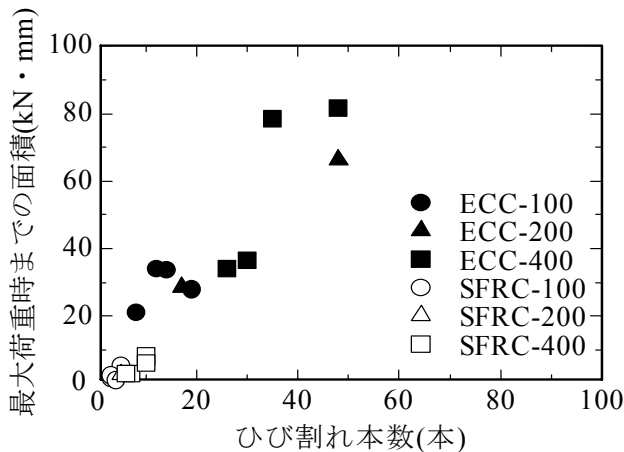


図-8 最大荷重時までの面積とひび割れ本数

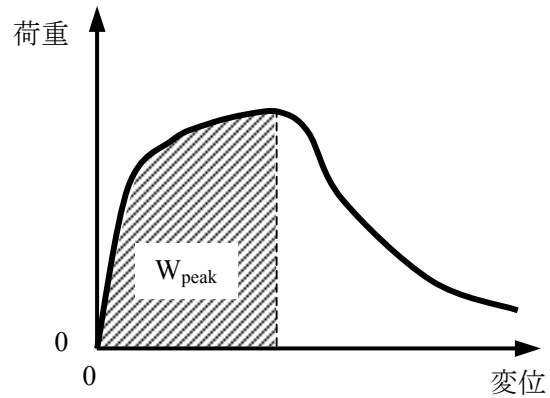


図-9 最大荷重時までの面積の算出方法

4. まとめ

本研究にて得られた結論を以下に示す。

- 1) SFRC では、最大荷重付近から主ひび割れが大きく開口し、荷重の低下が生じた。ECC の場合においても、分散していたひび割れが最大荷重時近傍にて、主ひび割れが大きくなり破壊が局所化する。
- 2) SFRC および ECC に関して、ひび割れ本数と、荷重-変位曲線の最大荷重までの面積に正の相関があることが明らかとなった。このことは、少なくとも最大荷重時までの面積が大きければ、ひび割れが多く発生していることを表していると考えられる。
- 3) 分散したひび割れがモーメントスパン内に均一に生じていると仮定して算定した E_v は、モーメントスパンの増加に伴い小さくなった。このことは単位体積当りに生じたひび割れ本数が相対的に少なくなっていることに相当しており、本研究の範囲内では、 E_v がひび割れ分散性の評価指標として利用できる可能性が示された。

謝辞

本実験の供試体作製に際し、鹿島技術研究所 関田徹志氏、東海コンクリート工業稲熊唯史氏をはじめとする関係諸氏にご協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

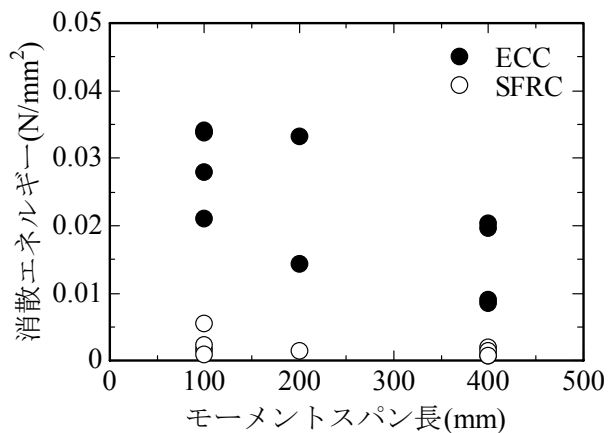


図-10 消散エネルギーとモーメントスパン長

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：高靱性セメント複合材料の性能評価と構造利用研究委員会報告書，2002
- 2) Y. Uchida, S.C. Lim and K. Rokugo: Observation of Multiple Cracking Process and Microstructure of ECC, Proc. of the JCI International Workshop on DFRCC, pp.181-188, 2002
- 3) K. Otsuka, H. Mihashi, M. Kiyota and S. Mori: Observation of Multiple Cracking on Micro and Meso Level, Proc. of the JCI International Workshop on DFRCC, pp.189-198, 2002
- 4) 関田徹志，平石剛紀，永井覚，丸田誠：実機練り混ぜによる自己充填型 ECC の性能に関する実験的検討，JCI 高靱性セメント複合材料に関するシンポジウム論文集，pp.125-132，2003