

コンクリートの破壊力学に関する研究

その 3 調合因子がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

正会員 村 上 聖*
正会員 岸 谷 孝 一**
正会員 平 居 孝 之***

1. 序 論

コンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響因子に関して、線形破壊力学（以下、LEFM と略称する）に基づいて定性的な説明を試みることは可能である。例えば、そのような試みとして Hillemeier らは、コンクリートの構成要素であるセメントペーストマトリックス、骨材および骨材-マトリックス界面に対してくさび載荷コンパクトテンション (Wedge Loading Compact Tension) 試験体を利用して破壊靱性値を求め、その結果から構成要素個々の破壊靱性は LEFM に基づいて評価することができ、それら要素の複合されたコンクリートの延性(破壊仕事の破壊荷重に対する比)は、特に骨材-マトリックス界面の破壊靱性に強く影響を受けることを示している¹⁾。Zaitsev らは、供試体内部のマイクロクラックの進展条件に LEFM パラメーターである応力拡大係数を用いて、ランダムに配向された潜在欠陥からのひび割れ進展を骨材や他の欠陥との相互干渉を考慮しながらシミュレートし、高強度コンクリートや軽量コンクリートの圧縮破壊過程の特徴について実験結果と良く一致する数値解析結果を得ている²⁾。また、Romualdy らは、繊維補強コンクリートにおいて繊維-マトリックス界面に生じる付着応力が繊維に囲まれたマイクロクラック先端の応力拡大係数を低下させ、その進展抵抗性を見かけ上高める作用に着目し、繊維補強コンクリートの強度が繊維間隔に支配されるとする繊維強化理論を提唱した³⁾。

しかし、LEFM による破壊靱性評価は、特に用いる供試体寸法に強く依存し、通常の中・小型供試体では破壊靱性の大きな材料ほど、真の破壊靱性に対して過小な結果を与え、種々の因子による破壊靱性の改善効果を適切に表示することができない⁴⁾。したがって、コンクリートの主要な構成要素である骨材がコンクリートのひび割

れ抵抗性のメカニズムにどのような役割を果たしているのかについては、骨材のクラックアレスター作用として定性的にある程度の理解がなされているものの、定量的な説明は必ずしも十分であるとはいえない。さらに、脆性マトリックスに対する繊維強化機構の定量化は、繊維補強効果の改善因子を見だし、繊維補強コンクリートのより有効な活用をはかるために必要不可欠の重要な問題である。その試みとして、これまでに繊維補強コンクリートに対して金属に適用されている J 積分評価法を応用し、繊維混入による破壊靱性改善効果の定量化が行われている。しかし、J 積分の実験的評価の場合には、得られる結果が J 積分を評価する点の選定に強く依存し、ひび割れ発生源の精度の良い検出が別に考慮されねばならない重要な要件になることを前報⁵⁾で言及した。

本研究では、その 1 で報告した⁶⁾手法に基づいて、水セメント比、最大骨材寸法、粗骨材混入率などの調合因子がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響ならびに繊維強化機構について定性的な考察を試みる。

2. 実験方法

破壊靱性試験は、切欠きはり供試体の 3 点曲げ載荷(スパン・高さ比=3.0)で行った。使用した供試体寸法は、はりせい×はり幅×はり長さ=100×100×400 mm の 1

表-1 使用材料

セメント	普通ポルトランド
細骨材	大井川産砂 表乾比重=2.62 最大寸法=5mm 粗粒率 =2.85
粗骨材	大井川産砂利 表乾比重=2.65 最大寸法=10mm (粗粒率=6.00) 最大寸法=15mm (粗粒率=6.50) 最大寸法=20mm (粗粒率=6.60)
鋼繊維	市販のせん断フアイバー (ストレート) 寸法=0.5x0.5x30mm

本論文の内容は、昭和 61 年度日本建築学会九州支部研究報告および熊本大学工学部研究報告において発表した。

* 熊本大学 講師・工博

** 日本大学 教授 (東京大学名誉教授)・工博

*** 大分大学 教授・工博

(昭和 62 年 7 月 2 日原稿受理)

表—2 使用調査

シリーズ	調 合		引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 (x10 ⁵ kgf/cm ²)
水セメント比	40%	C : S : G=1:2.14:2.89 (重量比) 粗骨材最大寸法=15mm 材令=28日	35.9	3.61
	50%		30.8	3.31
	60%		28.6	3.07
粗骨材体積率	0.2	水セメント比=50% C : S : G=1:2.14 (重量比) 粗骨材最大寸法=15mm 材令=28日	31.0	2.85
	0.4		30.3	3.36
	0.5		29.6	3.07
粗骨材最大寸法	5mm	水セメント比=50% C : S : G=1:2.14:2.89 (重量比) 材令=28日	32.0	2.34
	10mm		30.2	2.86
	15mm		28.2	3.13
	20mm		27.3	2.75
鋼繊維体積率	0%	水セメント比=50% C : S : G=1:2.14:1.08 (重量比) 粗骨材最大寸法=15mm 材令=28日	31.0	2.85
	0.5%		33.9	2.73
	1.0%		38.2	3.08
	1.5%		47.0	2.52

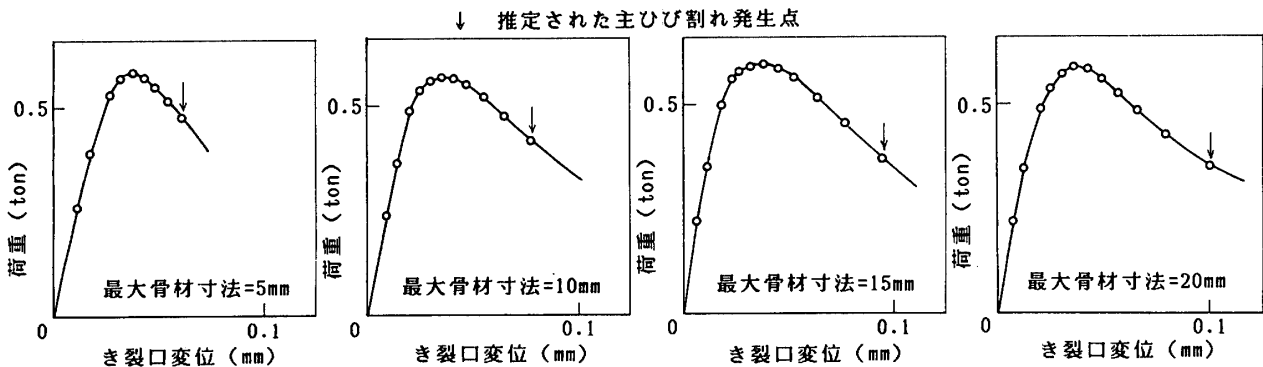
種類である。切欠きは、厚さ=1.0mmのアクリル板を先打ちする方法で入れ、その深さははりせいに対する比で0.3の1種類とした。供試体は、材令28日(20°C水中養生)後湿潤状態で試験に供した。使用材料および調査は表—1, 2に示すとおりであり、各因子ごとにそれぞれ3個ずつ供試体を作製した。荷重と、切欠き端にナイフエッジを介して取り付けられたクリップゲージの変位

(き裂口変位)との関係は、X-Yレコーダーにより自動記録した。

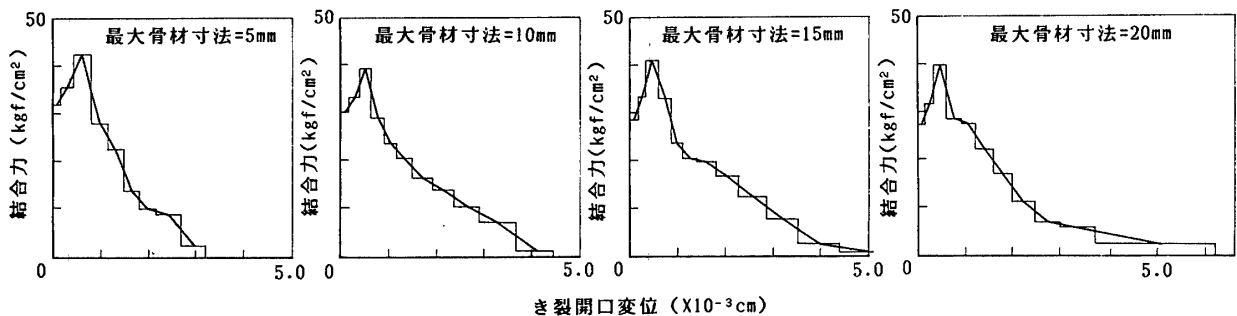
3. 結果および考察

3.1 調査因子がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

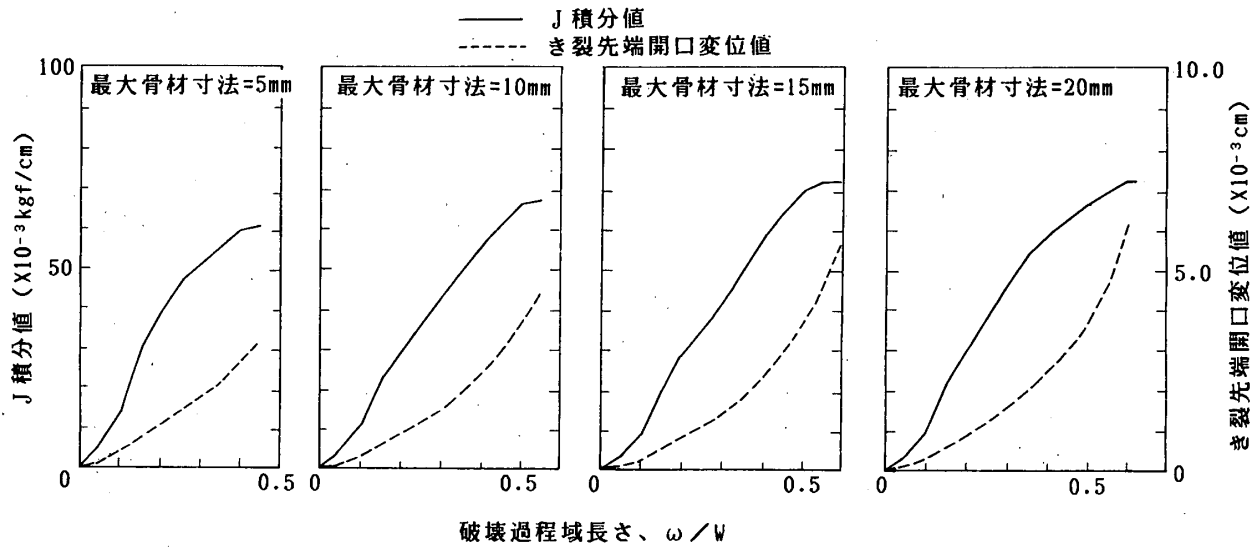
図—1, 2, 3は、本手法によるひび割れ抵抗性の評価過程を調査因子として最大骨材寸法を一例に示したものである。図—1は荷重-き裂口変位曲線の測定値(ただし、



図—1 荷重-き裂口変位曲線の測定値



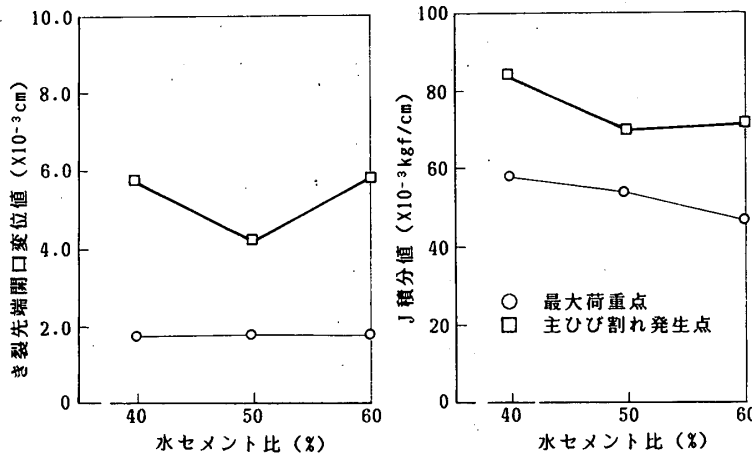
図—2 推定された結合力-き裂開口変位関係



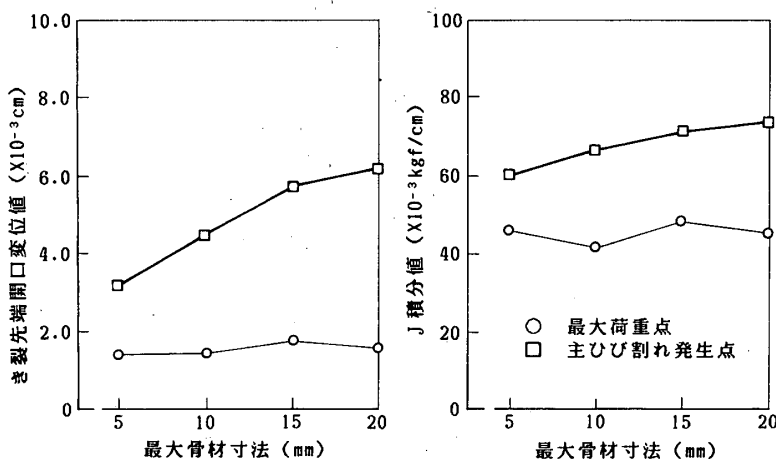
図—3 破壊過程域の進展に伴うJ積分およびき裂先端開口変位の変化

供試体3個の測定値の平均)を、図—2は本手法により推定された結合力-き裂開口変位関係を、また図—3は破壊過程域の進展、 ω/W (ただし、 ω :破壊過程域長さ、 W :はりせい)に伴うJ積分およびき裂先端開口変位値の変化をそれぞれ示す。ここで、結合力-き裂開口変位曲線下の面積はJ積分値を表している、これらの

図から、結合力が作用しなくなる限界のき裂開口変位点に対応するものとして解析的に推定された主ひび割れ発生点で、J積分値は一定の限界値をとることがわかる。したがって、以下の考察では、ひび割れ抵抗性の指標として主ひび割れ発生点で評価されたJ積分およびき裂先端開口変位の値を採用する。ここで、前者は主ひび割れ



図—4 水セメント比がひび割れ抵抗性に及ぼす影響



図—5 最大骨材寸法がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

が単位面積だけ進展するのに必要なエネルギー量であり、後者は材料の局所的な伸び能力を表す指標となる。

まず、水セメント比がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響について考察する。図—4は、水セメント比=40, 50, 60%のプレーンコンクリートに関して主ひび割れ発生点で評価されたJ積分およびき裂先端開口変位の値を示す。この図から、き裂先端開口変位値は大きければつきはあるが、水セメント比の違いによる差に明確な傾向が認められないのに対して、J積分値は水セメント比の減少により増加していることがわかる。このことから、水セメント比の減少による付着強度の増加が骨材-マトリックス界面での付着ひび割れの発生に伴うエネルギー吸収作用を高め、主ひび割れ進展抵抗性に有効に働いていることが推察される。ところで、水セメント比の減少によりマトリックス強度も増加するが、鋼材の例からもわかるように高強度になるほど破壊靱性は低下することから、マトリックス強度の増加は直接コンクリートのひび割れ抵抗性の増加に結び付かないと考えられる。

次に、骨材寸法がコンクリートのひび割

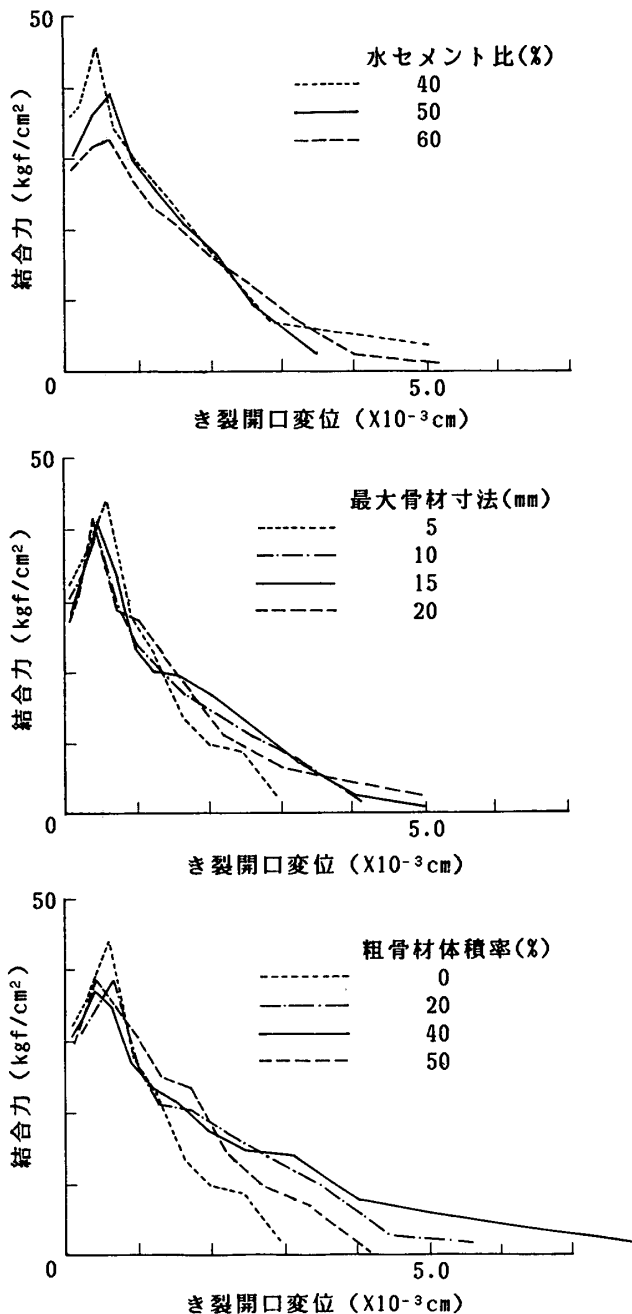


図-6 水セメント比, 最大骨材寸法, 粗骨材体積率に関する結合力-き裂開口変位関係

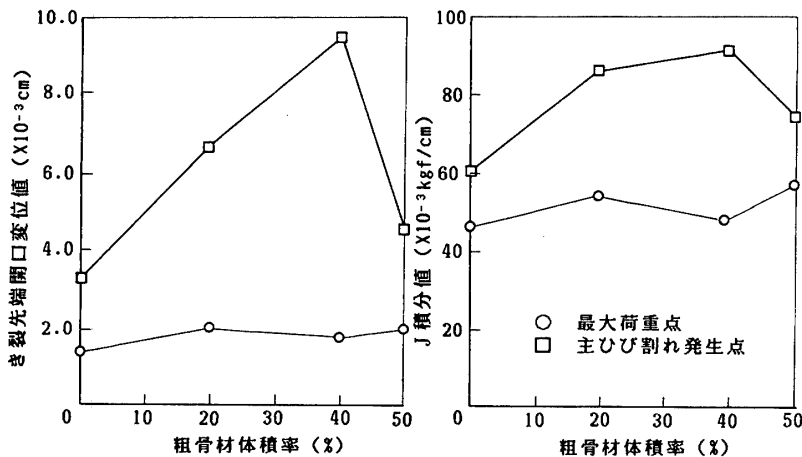


図-7 粗骨材体積率がひび割れ抵抗性に及ぼす影響

れ抵抗性に及ぼす影響について考察する。図-5は、最大骨材寸法=5, 10, 15, 20 mmのプレーンコンクリートに関して主ひび割れ発生点で評価されたJ積分およびき裂先端開口変位の値を示す。この図から、最大骨材寸法が大きくなるほどき裂先端開口変位値は顕著に増加するとともに、J積分値も増加していることがわかる。一方、最大骨材寸法が増加するにつれて付着強度は低下することから、この場合にはひび割れ面に介在している骨材の橋架けによるひび割れ開口抵抗が、主ひび割れ進展抵抗性を高めていることが推察される。このことは、図-6に示す結合力-き裂開口変位曲線の形状からも類推することができ、最大骨材寸法が大きくなるほど、き裂開口変位の増加に伴う結合力の低下が緩やかになっている。

最後に、粗骨材混入量がコンクリートのひび割れ抵抗性に及ぼす影響について考察する。図-7は、粗骨材体積率=0, 20, 40, 50%のプレーンコンクリートに関して主ひび割れ発生点で評価されたJ積分およびき裂先端開口変位の値を示す。この図から、最大骨材寸法の場合と同様の傾向がみられ、粗骨材体積率が増加するほどき裂先端開口変位値が顕著に増加するとともに、J積分値も増加している。ただし、粗骨材の混入量が過度になると、骨材-マトリックス界面の付着ひび割れの橋架けが容易に生じ、主ひび割れに合体しやすくなると考えられるために、J積分およびき裂先端開口変位の値はともに大きく低下している。

以上の結果を総合すると、骨材のクラックアレスター作用には、骨材-マトリックス界面での付着ひび割れ発生に伴うエネルギー吸収作用およびひび割れ面での骨材の橋架け効果によるひび割れ開口抵抗があり、前者に関しては水セメント比が、後者に関しては骨材寸法や粗骨材混入量がそれぞれ強く影響しているものと考えられる。

3.2 繊維強化機構の定量化

図-8は、繊維体積率=0.5, 1.0, 1.5%の鋼繊維補強コンクリート(以下、SFRCと略称する)およびマトリックスと同一調合のプレーンコンクリートに関して測定された荷重-き裂口変位曲線(ただし、供試体3個の測定値の平均)を示す。また、本手法により推定された結合力-き裂開口変位関係を図-9に示す。ここで、結合力-開口変位曲線下の面積はJ積分値を表しているため、鋼繊維の混入により、また混入率が増加するほど、ひび割れ抵抗性が著しく改善されることがわかる。また、プレーンコンクリートマトリックスの限界き裂開口変位値に対応する点で

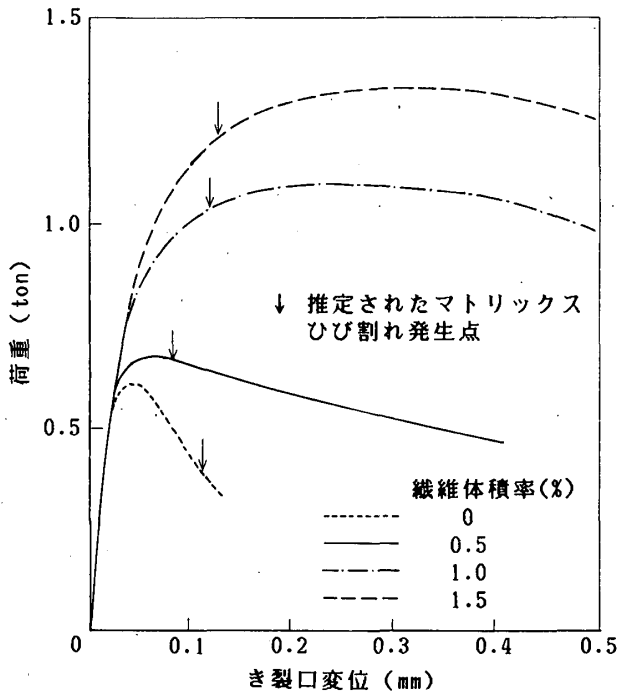


図-8 鋼繊維補強コンクリートの荷重-き裂開口変位曲線の測定値

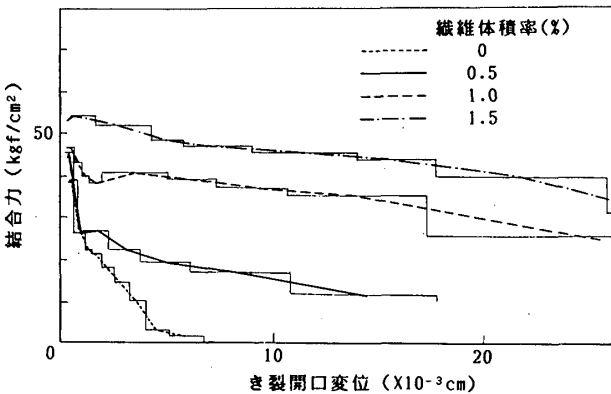


図-9 鋼繊維補強コンクリートの結合力-き裂開口変位関係

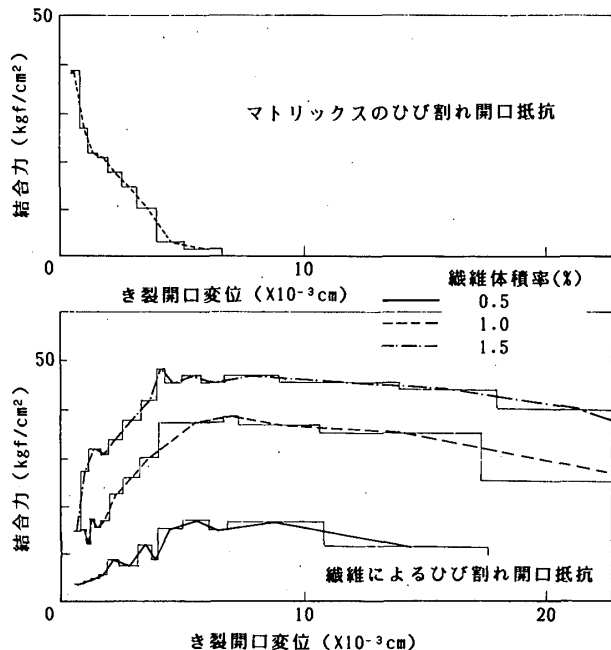


図-10 マトリックスおよび繊維によるひび割れ開口抵抗曲線

SFRCにおいてマトリックスひび割れが発生するものと仮定すれば、図-8に示す荷重-き裂開口変位曲線上の矢印で示す位置でマトリックスひび割れが生じていることになる。

さらに、図-9に示す結合力-き裂開口変位関係において、マトリックスおよび繊維によるひび割れ抵抗性への寄与に線形に加算性があると仮定して、マトリックスおよび繊維によるひび割れ開口抵抗性を分離して示したのが図-10である。ただし、ここでいう繊維によるひび割れ開口抵抗は、繊維-マトリックス界面に生じる付着応力によるマイクロクラック進展のアレスト作用やひび割れ面をつないでいる繊維の引き抜けによるひび割れ開口抵抗などの微視的および巨視的補強効果の混然とした総和量であり、個々の効果を分離して評価することは本手法の及ぶところではないが、この図から、コンクリートのような脆性マトリックスに対する繊維補強機構の特徴をみることができる。すなわち、き裂開口変位の小さいうちはその開口抵抗はほとんどマトリックスにより負担されるが、き裂開口変位が増加するにつれて繊維の負担するひび割れ開口抵抗の比率が急速に増大し、マトリックスひび割れ発生点の近傍でほぼそのピークに達したのち、ひび割れ面をつないでいる繊維の引き抜けや破断により次第にその開口抵抗を失ってゆくことが推察される。また、繊維混入率が増加するほど、繊維によるひび割れ開口抵抗曲線の立ち上がり勾配が大きくなり、それに伴ってピーク点の開口抵抗も上昇することがわかる。

4. 結論

本研究では、破壊靱性試験により実験的に求められる荷重-き裂開口変位曲線から、マイクロクラックの累進的発生を伴う破壊過程域内部の構成法則を推定し、その領域の損傷レベルや破壊靱性を間接的に評価する手法により、骨材のクラックアレスター作用に及ぼす調合因子の影響、ならびにコンクリートのような脆性マトリックスに対する繊維補強機構や繊維混入によるひび割れ抵抗性の改善効果が定量的に説明された。

謝辞

本論文は、筆者の一人が学位論文としてとりまとめた内容の一部であり、御便宜を賜りました熊本大学工学部建築学科三井宜之教授に深く感謝致します。

参考文献

- 1) B. H. Hillemeier, H. K. Hilsdorf : Fracture Mechanics Studies on Concrete Compounds, Cement and Concrete Research, Vol. 7, No. 5, 1977
- 2) Y. B. Zaitsev, F. H. Wittmann : Simulation of Crack Propagation and Failure of Concrete, Materials and Structures (RILEM), Vol. 14, No. 83, 1981
- 3) J. P. Romualdi, G. B. Batson : Mechanics of Crack

- Arrest in Concrete, Proc. ASCE, Vol. 89, No. EM 3, 1963
- 4) 岸谷孝一, 平居孝之, 村上 聖: コンクリートの破壊靱性評価に関する研究-破壊力学モデル解析に基づく間接評価-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 360 号, 昭和 61 年 2 月
 - 5) 岸谷孝一, 村上 聖, 平山善吉, 平居孝之: コンクリートの破壊力学に関する研究-その 2 J 積分評価における直接および間接的方法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 374 号, 昭和 62 年 4 月
 - 6) 岸谷孝一, 村上 聖, 平居孝之: コンクリートの破壊力学に関する研究-その 1 破壊過程域の損傷解析-, 日本建築学会構造系論文報告集, 第 368 号, 昭和 61 年 10 月
 - 7) 岸谷孝一, 平居孝之, 村上 聖: コンクリートのひび割れ抵抗性に関する破壊力学的研究 (その 1 骨材のクラックアレスター作用の定量化), 日本建築学会九州支部研究報告集, 昭和 61 年 3 月
 - 8) 岸谷孝一, 村上 聖, 平居孝之: コンクリートのひび割れ抵抗性に関する破壊力学的研究 (その 2 繊維補強効果の定量化), 日本建築学会九州支部研究報告集, 昭和 61 年 3 月
 - 9) 村上 聖: コンクリートのひび割れ抵抗性の評価に関する研究, 熊本大学工学部研究報告, 第 35 巻, 第 3 号, 昭和 61 年 11 月

SYNOPSIS

UDC : 691.32 : 691.059.22

STUDY ON FRACTURE MECHANICS OF CONCRETE Part 3 Effect due to mix proportion on cracking resistance

by Dr. **KIYOSHI MURAKAMI**, Lecturer, Kumamoto University, Dr. **KOICHI KISHITANI**, Professor, Nihon University, and Dr. **TAKAYUKI HIRAI**, Professor, Oita University, Members of A. I. J.

In this study the constitutive relation and the extent of damage within the fracture process zone of concrete were estimated indirectly by means of a cohesive force model analysis.

As the application the effect of mix proportion of concrete on crack arresting factors due to aggregates, the mechanics of fiber reinforcement and the improvement of cracking resistance in plain concrete were analyzed.