

論文

[1205] セメント系複合材料設計への破壊力学の応用

正会員 三橋博三（東北大学工学部）

1. はじめに

セメント硬化体の脆さや圧縮強度に比べて極立って小さな引張強度の改善のために、無機系及び有機系の各種繊維を用いて強度及び靱性の向上が図られている。とりわけ、これまで広く用いられてきたアスベスト繊維の使用が規制されるようになってきた事と、種々の新しい合成繊維の開発等が相俟って、近年は新素材を用いたセメント系複合材料の研究が数多くなされている。これらの研究の結果、繊維補強コンクリートの強度増大に関与する因子についてはある程度わかってきたが、破壊力学に基づいた繊維強化複合機構の考察 [1~3] など理論的背景となるべき研究成果は乏しく、繊維とマトリックスの特性が、個々の応用に対して最適な特性を材料に付与する設計方法論を確立する段階には必ずしも至っていない。

本報では、セメント系複合材料の高強度化・高靱性化機構について考察すると共に、破壊プロセスゾーンの力学的特性即ち引張軟化特性が全体の力学的挙動に及ぼす影響を明かにする。更に幾つかのセメント系複合材料の引張軟化特性を実験により求め、複合材料の設計指標について考察を加える。

2. セメント系複合材料の高強度化・高靱性化機構

セメント硬化体は引張強度が低く脆性的な破壊を生ずる為に、繊維その他の新しい材料を混入する事によって高強度化・高靱性化が図られてきた。複合化による破壊靱性向上の主な機構として、図1に示すように、(a) 介在物によるひび割れ伝播阻止及びび逸れ、(b) 微細ひび割れ分布による応力集中の緩和、(c) 介在物のブリッジング、の3つが挙げられる。(a)の機構は、ひび割れが介在物の周りをジグザグに折れ曲って進む結果、ひび割れ伝播に必要なエネルギーが散逸し靱性が向上するというものである。(b)の機構は、適切なサイズの微細ひび割れを人工的に分散混入できれば、材料開発に応用できる。(c)の機構は繊維補強を考える際に最も支配的な因子となるもので、繊維の配向や引き抜け・破断の有無などの影響が複合材料の靱性を決定づける。

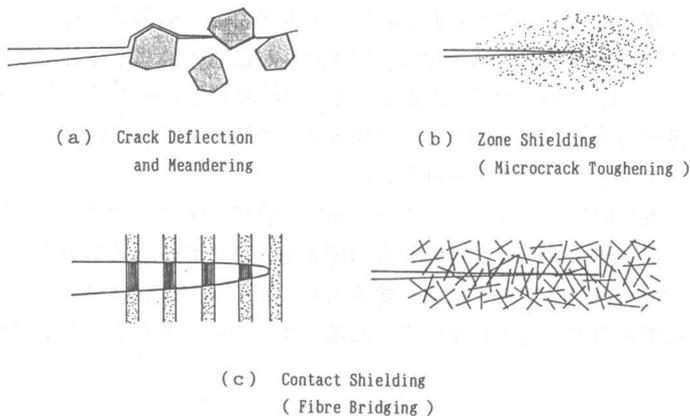


図1 複合化による破壊靱性向上のメカニズム

3. 引張軟化特性と曲げを受ける試験体の荷重変形曲線の関係

引張応力を受けるセメント硬化体のひび割れ先端近傍には、破壊プロセスゾーンと呼ばれる微細ひび割れが集積した非線形領域が形成され、この領域の力学的特性がセメント硬化体全体の変形挙動に大きな影響を及ぼすことが最近の研究でわかってきた〔4〕。

破壊プロセスゾーンに引張軟化特性を組み込んだ有限要素法解析により、引張軟化特性が曲げを受ける試験体の荷重変形曲線に及ぼす影響について検討した。解析対象は図2に示す100mm×100mmの正方形板中央部に50mmの切り欠きを有する試験体で、引張軟化特性を4シリーズ選びパラメトリックスタディを行った。尚、RILEMでは、非線形破壊力学パラメータとして、単位面積のひび割れ進展を引き起こすのに必要なエネルギー量として定義される破壊エネルギー G_F を評価する推奨試験法を提案している〔5〕が、この G_F は引張軟化特性曲線と2つの軸で囲まれる面積にも等しい。解析の結果得られた荷重変形曲線は図3に示す通りである。

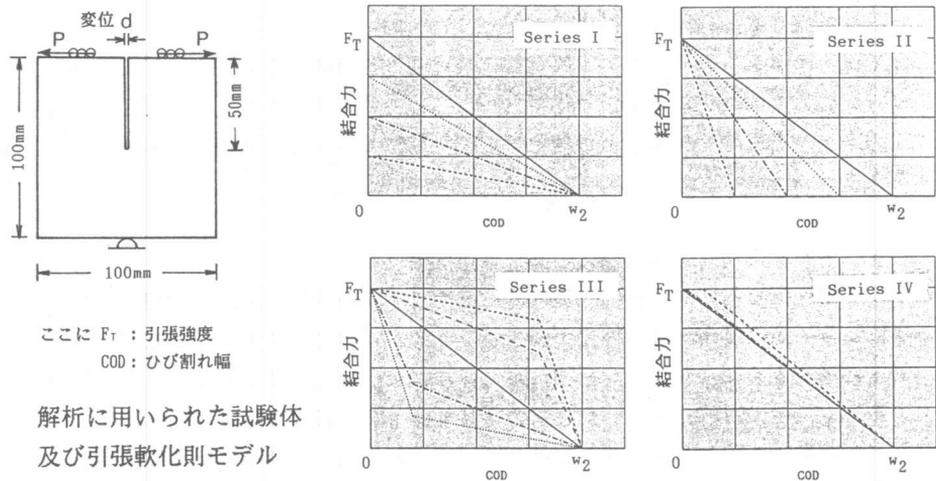


図2 解析に用いられた試験体及び引張軟化則モデル

シリーズIの結果より、引張強度を増大できれば荷重の最大値もほぼ同様の割合で増大するのに対し、限界ひび割れ幅が一定であれば引張強度の増大と共にピーク後脆性化する。それに対してシリーズIIの結果より、引張強度が一定で限界ひび割れ幅が増大する場合には、最大荷重の増大傾向は見られるものの増加割合はわずかである。シリーズIIIでは、引張軟化特性が上に凸の場合と下に凸の場合とで、それらが荷重変形特性に及ぼす影響が顕著に異なることについて明確に理解される。シリーズIVでは、引張強度 F_T に達した直後の材料特性のダクティリティが荷重変形特性に及ぼす影響の敏感性を調べたもので、この結果で見える限りにおいては、このダクティリティが極立った影響を及ぼすものとは考えられない。

以上4つのシリーズの解析結果から言えることは、曲げを受ける場合の材料設計の第1義的な目標を最大荷重の増加に置くのであれば、引張強度の増大を図る事が最も効率が良く、エネルギー吸収性能を重視するのであれば、限界ひび割れ幅を大きくするかあるいは引張軟化特性が上に凸となるような太った特性を付与する事によって、破壊エネルギーを大きくする事が必要であるということである。

4. 材料の複合化と引張軟化特性

繊維混入複合セメント硬化体の強度特性と引張り軟化特性を評価するために、2種類の実験を

行った。実験Ⅰでは $40 \times 40 \times 160$ (mm)の角柱を用い、曲げ及び圧縮強度を評価した。実験Ⅱでは、 $100 \times 100 \times 50$ (mm)の平板中央部に幅2mm、長さ50mmの切り欠きを設け、楔挿入による割裂試験（以下単に割裂試験とよぶ）を行い、破壊エネルギー G_F 及び六郷ら提案の新J積分法〔6〕による引張軟化特性を評価した。

双方の実験で用いた調合及び混入物は同一であり、マトリックスは、早強ポルトランドセメントを用いた水セメント比45%の7号珪砂モルタルである。このプレーンモルタルの他に複合化混入物として、ビニロン（長さ6mm）及びPan系カーボン（長さ6mm）の各短繊維とマイカフレーク（径の分布は $211 \sim 1188 \mu\text{m}$ ）を用いて1.5Vol%を混入し、合計4つのタイプの複合化セメント硬化体の実験を行った。尚、ここで用いたマイカフレークとはカナダ産のややバイオタイトに近いフロゴバイトで、特有の劈開性を有し、薄片状にはがす事ができる雲母の一種である。また、ビニロン及びカーボン繊維混入モルタルには流動化剤をセメント重量の4%混入した。試験体数は各タイプについて3体である。練り混ぜには5ℓのオムニキサーを用い、打設後約24時間湿空養生して脱型し、更に、約24時間の蒸気養生（ 47°C ）を行った。その後水中養生（ 20°C ）を行い、材令7日で表乾状態のまま強度試験を行った。

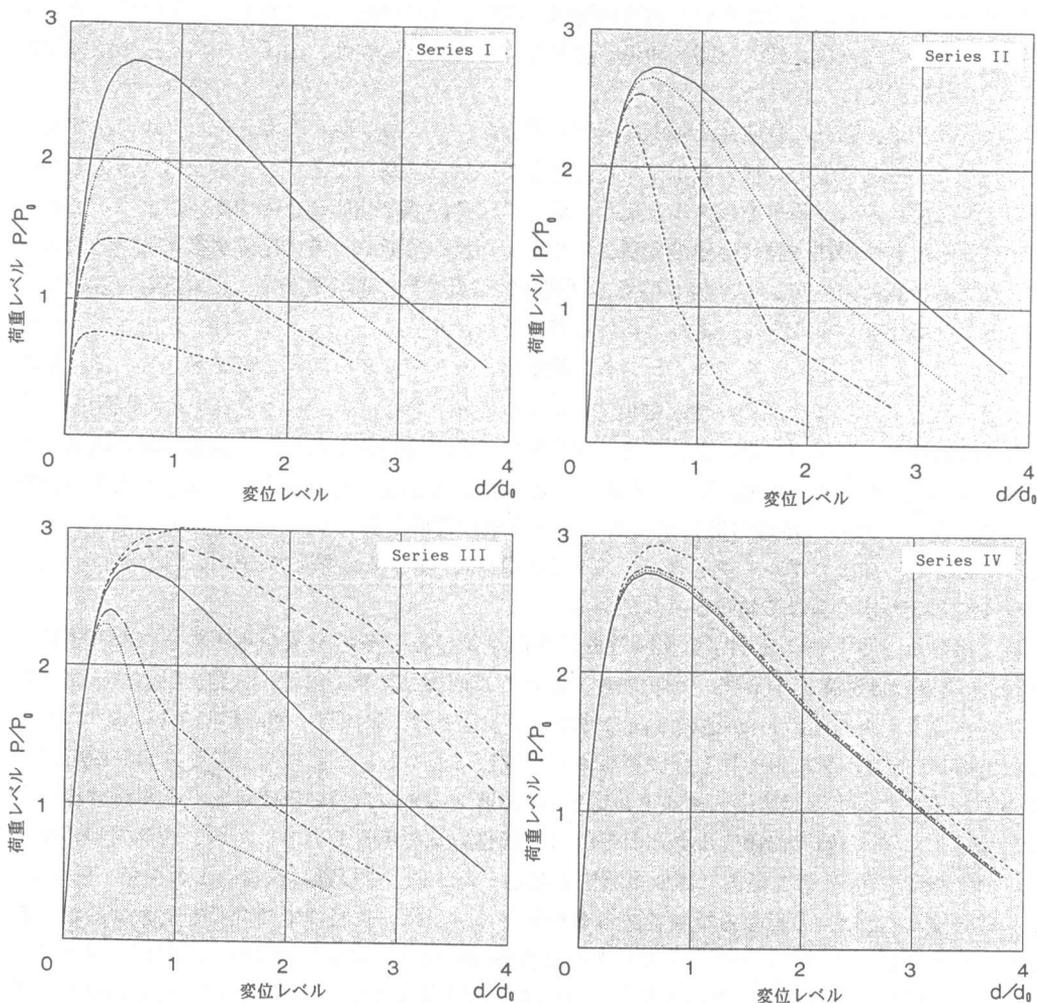


図3 荷重変形曲線の解析結果

表1 セメント系複合材料の強度特性及び破壊力学パラメータ

	曲げ強度 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	切り欠き平板 P _{max} (kgf)	G _F (kgf/cm)	J _c (kgf/cm)	F _T (kgf/cm)
普通モルタル	82.8	538	98.7	0.054	0.052	23.6
マイカフレーク 混入モルタル	89.0	560	96.7	0.046	0.046	30.2
ビニロン繊維 混入モルタル	62.2	401	96.6	0.704	0.648	25.1
カーボン繊維 混入モルタル	74.2	394	119.0	0.806	0.780	22.8

40×40×160(mm)の角柱を用いた強度試験は、JIS R 5201に規定されたセメント強度の物理試験方法に準じて行った。100×100×50(mm)の平板による割裂試験は、油圧サーボ式疲労試験機を用いて変位制御により行った。

強度試験結果、割裂試験結果を表1に示す。表より、マイカフレーク混入モルタルの曲げ及び圧縮強度は双方共に他の3種のモルタルと比較して極立って高いこと、カーボン繊維混入モルタルの圧縮強度は他の3種のモルタルと比べて低いのにその曲げ強度は比較的高いこと、ビニロン繊維混入モルタルの曲げ強度は他の3種のモルタルと比べて低く、その圧縮強度も低いこと等が示された。それに対して、切り欠き平板の割裂試験結果では、最大荷重P_{max}の最も大きいものはカーボン繊維混入モルタルであり、続いて普通モルタル、そしてそれより僅かに小さいレベルで、マイカフレーク混入モルタルとビニロン繊維混入モルタルがほぼ同じ値を示している。ビニロン繊維混入モルタルの場合は曲げ強度とP_{max}の双方が最も弱いという意味での相関関係が見られるのに対し、マイカフレーク混入モルタルではそれが全然見られない。割裂試験の破壊エネルギーG_Fは、カーボン繊維混入モルタル及びビニロン繊維混入モルタルで極立って大きい値を示しており、これらの繊維の混入がエネルギー吸収性能の上昇に大きく寄与している事を示している。一方、マイカフレークと普通モルタルのG_Fは、前2者のその10分の1以下と小さく、強度特性とは大きく異なる傾向を示している。

新J積分法[6]による引張軟化特性曲線を図4にまた、その結果から求められた引張強度F_TとJ積分の限界値J。(即ち、軟化曲線で囲まれた面積)を表1に示す。図、表より、マイカフレーク混入モルタルのF_Tが他の3種のモルタルよりも顕著に大きい値を示しているのに対し、Jの値は普通モルタルのそれとほぼ等しい点が注目に値する。それに対してビニロン繊維混入モルタル及びカーボン繊維混入モルタルのF_Tは普通モルタルの値にほぼ等しく、引張強度の増大はないのにJの値は普通モルタルのその約15倍以上を示している。即ち、切り欠きのない梁の曲げ強度はF_Tの値と極めて高い相関性を有しているが、ひび割れ伝播のエネルギー基準Jは引張強度F_Tとは全く異なる特性である事がわかる。引張軟化特性でこれらと比較すると、普通モルタル及びマイカフレーク混入モルタルは引張破壊強度に達した後に結合力が鋭く低下するのに対し、ビニロン繊維混入モルタル及びカーボン繊維混入モルタルの場合は、同等の応力レベルに低下するには約10倍あるいはそれ以上のひび割れ幅まで変形が増大する必要があることがわ

かる。とりわけカーボン繊維混入モルタルの場合には、ビニロン繊維混入モルタルよりもはるかに太ったふくらみをもった曲線形を示している点が大きな特徴である。

マイカフレークは薄片状の板であり、応力集中域に分布した無数のマイクロクラックが図1.bに示すような機構によって応力の緩和を引き起こし、その結果曲げ強度あるいは見かけの引張強度 F_T が高い値を示した。しかしながら、一旦ひび割れが伝播を開始するとそれを阻止する効果は期待できないために、その後の靱性は得られなかったものと考えられる。一方、ビニールあるいはカーボン繊維は図1.cに示すような機構によってひび割れ発生後の開口を拘束するために、ひび割れ幅の増大に伴う結合力の低下が緩やかとなったものと考えられる。

5. セメント系複合材料の開発と引張軟化特性の役割

複合材料は、本来要求に適合した特性とその分布を有する材料として設計できるところに特徴があるものの、セメント系複合材料の設計を可能ならしめる理論や方法は未だ十分に議論されておらず、とりわけ短繊維補強セメント硬化体では試行錯誤によるデータの集積の段階にあると言えよう。従って、現在までに経験的にわかっている、いろいろな複合効果を説明できるような理論の構築が極めて重要である。

通常、複合材料を構成する素材そのものの特性等をインプットに、複合材料として固化されたものの諸特性をアウトプットとして捉えられ、インプットされた各々の要素がアウトプットに対

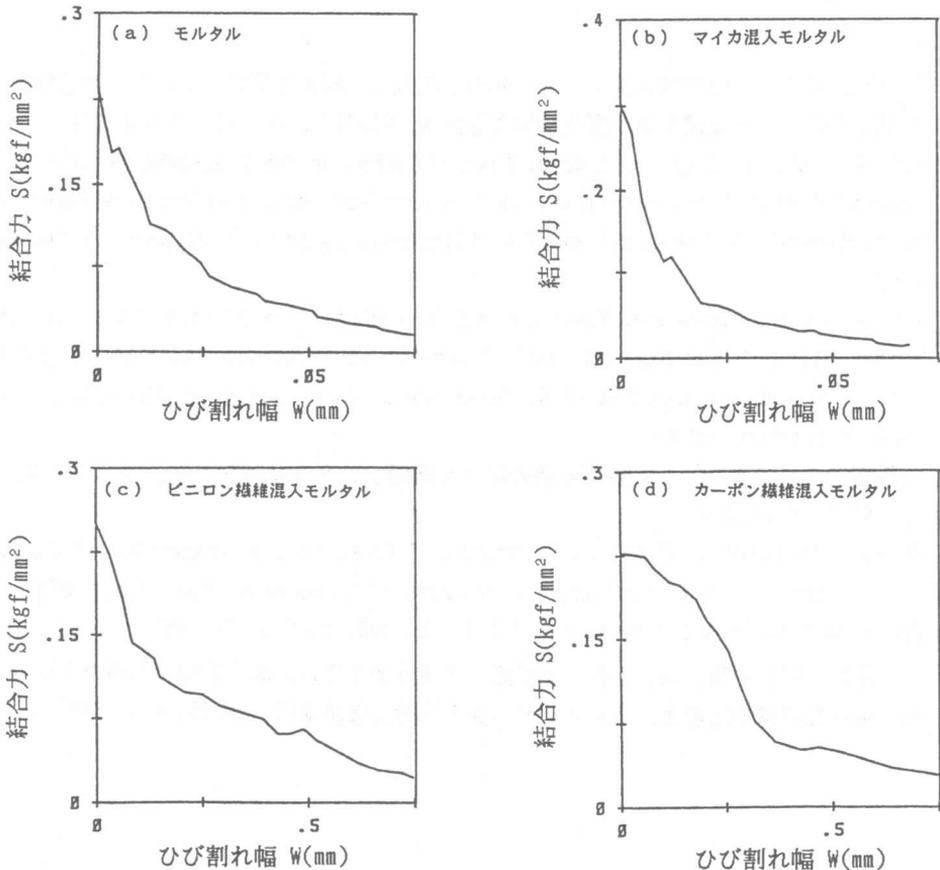


図4 新J積分法による引張軟化特性曲線

してどのような機構で作用するかはやや大まかに捉えられているに過ぎない。そこで、前述の破壊力学的手法を用いて、この巨大なブラックボックスをもっと小さなブラックボックスの集合体に分解し、インプット要素へのフィードバックをより容易なものにする必要がある。複合材料の要素各々の素材としての特性や、界面特性も含めた要素間の相互作用特性と引張軟化特性とは、より直接的に関係づける事ができる。従ってより多くの要因が絡んでくる試験体全体の強度特性よりも、引張軟化特性の方がその複合材料の複合効果を評価するには適していると考えられる。

6. おわりに

複合材料としての特性を支配する要因は数多く、しかもそれらが複雑に絡合って作用する。このような材料の設計方法を確立するためには、単に試行錯誤的に実験を繰り返すのではなく、ここで示したような引張軟化特性の評価を中心として、材料素材の開発・改良へのフィードバックとシミュレーションによる部材としての特性の検討とを行う様な材料設計システムの開発が、必要である。

謝辞

本研究は、1988～89年度文部省科学研究費補助金、試験研究 (No. 63850125) によるもので、原稿整理に御協力頂いた東北大学工学部教務技官 桐越一紀氏に深謝します。

参考文献

- [1] 村上聖、他4名：繊維補強コンクリートの破壊力学に関する研究—その1 各種繊維による補強効果—、日本建築学会構造系論文報告集、第404号、pp.1-6、1989年10月
- [2] V.C. Li and J.W. Robert : A Novel Testing Technique for Post-peak Tensile Behaviour of Cementitious Materials, in Fracture Toughness and Fracture Energy (ed. by H. Mihashi, H. Takahashi and F.H. Wittmann), pp.183-195, Balkema, Rotterdam, 1989
- [3] V.C. Li et al : Toughened Behaviour and Mechanisms of Synthetic Fibre Reinforced Normal Strength and High Strength Concrete, Fibre Reinforced Cements and Concretes. Recent Developments (R.N. Swamy and B. Barr, eds.), pp.420-433, Elsevier Applied Science, 1989.9
- [4] 三橋博三：コンクリートの破壊力学の現状と展望、コンクリート工学、Vol.25、No.2、pp.14-25、1987年2月
- [5] 50-FMC Committee on Fracture Mechanics of Concrete : Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by Means of Three-point Bend Tests on Notched Beams, Materials and Structures, Vol.18, No.106, pp.285-290, 1985
- [6] 六郷恵哲、岩佐正徳、瀬古繁喜、小柳冷：J積分法を用いた曲げ試験によるコンクリートの引張軟化曲線の定量化、第43回セメント技術大会講演集、pp.398-403、1989