

コンクリートのひびわ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)

正会員 岸谷 孝一* 〇同 村上 聖** 同 平居 孝之***

1. 序論

コンクリートのような脆性材料に対する繊維強化の発想は相当古くから知られていたが、現在のように繊維補強コンクリートの実用化が急速に進められたのは1963年にRomualdiらにより提唱された繊維強化理論に負うところが大きい。彼らは、線形破壊力学に基づいて繊維マトリックス界面に生じる付着応力度が繊維に取り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、その進展抵抗性を高める作用を見だし、さらに繊維間の間隔を減じるとその効果が大きくなり、またその内部に含まれる欠陥寸法も必然的に小さくなることから、鋼繊維補強コンクリートのひびわれ強度が著しく改善されるとする繊維間隔理論を提案した。

しかし、延性材料をマトリックスとする繊維強化複合材料に比べて繊維補強コンクリートの強度が期待される程には改善されないこと、また脆性マトリックスに対する繊維補強のメリットがひびわれ発生後の靱性の改善にあることなどを考慮すれば、Romualdiらによるマイクロクラックに対する繊維強化機構の線形破壊力学的扱いには限界があり、それよりも連続ひびわれの進展抵抗性に対する繊維補強効果のメカニズムを非線形力学的に取り扱う方が、繊維の混入によるひびわれ抵抗性の改善効果を適切に表示することができると考えられる。

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、その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結果が評価点の選定に強く依存し、ひびわれ発生点の検出が別に検討されねばならない重要な課題になる。従って、コンクリートのような非均質複合脆性材料の場合そのひびわれ進展過程は一樣でないことから、ひびわれ発生点を検出するための測定技術や精度上の問題も含めて今後その適用性が議論されるものと考えられる。本稿では、その1と同様に破壊過程域内部の損傷解析に基づく間接的評価により、繊維補強効果のメカニズムの定量化を試みる。

2 実験方法

破壊靱性試験は、寸法100×100×400mmの切欠き曲げ供試体の中点曲げ載荷(スパン高さ比=3.0)で行った。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0.1, 0.3, 0.5の3種類とした。荷重とき裂口変位との関係及び荷重と載荷点変位との関係は、X-Yレコーダーにより自動記録した。供試体は、材令28日(20水中養生)後湿潤状態で試験に供した。ただし、載荷点変位の計測には、載荷点下の供試体両側面に変位測定用のアングル状切片を接着するために、材令21日後供試体は空気中で自然乾燥した。使用材料及び調査は表1と表2に示す通りで、鋼繊維体積率は0.5, 1.0, 1.5%の3水準とした。供試体は、JCI規準案に従って同一条件ごとに各3本ずつ作製した。

3 解析及び実験結果

図1は、Riceの簡便式を用いる半解析的な直接的評価と本解析に基づく間接的評価によって得られたJ積分値と載荷点変位との関係を示す。間接的評価では、荷重-載荷点変位曲線に関する測定値と計算値との一致からJ積分値が間接的に評価された。同図からJ値-載荷点変位曲線に関して直接的評価と間接的評価との間に妥当な一致が得られているが、直接的評価の場合それではJ値をどの点で評価するのが適切であるのかの判断は、別に検討されねばならない重要な課題になる。一方、破壊過程域の損傷解析に基づく間接的評価では、その領域内部の損傷レベルと関連させて評価点の選定を合理的に行える特長をもつ。

図2は、繊維体積率1.0%の鋼繊維補強コンクリートに関して測定された荷重-き裂口変位曲線と計算値との比較を示す。図3は、相対切欠き深さ=0.3の供試体に関する測定値との一致から解析的に推定された破壊過程域内部の構成法則を示す。図3は、相対切欠き深さ0.3の供試体に関する測定値との一致から解析的に推定された破壊過程域内部の構成法則を示す。また、

同図中には同一調合のブレンコンクリートについて評価された構成法則も併記している。測定値との一致を調べた選点は、図2において○印で示し、また各選点で評価されたJ値及びCOD値を同図中に併記している。今、図3において結合力-COD曲線下の面積はJ値を表すが、鋼繊維の混入によりひびわれ抵抗性が著しく改善されることは一目瞭然である。また、ブレンコンクリートマトリックスにおいて結合力の作用する限界の開口変位点で、鋼繊維補強コンクリート中にマトリックスひびわれが発生すると考えると、図2で↓印で示すように最大荷重の約85%位の荷重点でマトリックスにひびわれが生じていることになり、これは実験事実と妥当に一致している。

ここで、図3に示す結合力-COD関係においてマトリックスと繊維のひびわれ抵抗性への寄与に線形加算性があると仮定して、マトリックス及び繊維それぞれが単独に負担するひびわれ開口抵抗を分離して示すと図4のようになる。この図から次のようなことが推察される。ひずみレベルの微小な開口変位の範囲では、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、開口変位が増加されるにつれて繊維の負担する開口抵抗の比率が急速に増大しマトリックスひびわれ発生点ではほぼそのピークに達したのち、ひびわれ面をブリッジする繊維の引き抜けや局部的な破断により次第にその開口抵抗力を低下させてゆく。

図5は、各種繊維体積率に対して測定された荷重-き裂口変位曲線の平均値を示す。また、測定値との一致から逆解法により推定された破壊過程域内部の構成法則を図6に示す。測定値との一致を調べた選点は図5において○、△、□印で示す。図7は前述のように

表1 使用材料

セメント	普通ポルトランドセメント
細骨材	大井川産川砂 表乾比重 2.62 最大寸法 5.0mm F.M. 2.85
粗骨材	大井川産砂利 表乾比重 2.65 最大寸法 15.0mm F.M. 6.50
鋼繊維	市販のせん断ファイバー 寸法 0.5×0.5×30mm

マトリックスと繊維のそれぞれが単独に負担するひびわれ開口抵抗を分離して示したものである。この図から、繊維体積率が増加する程、繊維の負担する開口抵抗曲線の立ち上がり勾配が増加していること、また繊維体積率にかかわらずマトリックスひびわれ発生点で繊維の負担する開口抵抗がそのピークに達していること、さらにそれ以後繊維の引き抜けなどにより繊維の開口変位量が著しく増大し、靱性や延性が顕著に改善されることなどの重要な知見が得られる。

以上の結果から、本手法により繊維補強コンクリートにおける著しいひびわれ抵抗性の改善効果を定量的に把握することが可能であると考えられる。さらに、モデルによるシミュレーション解析を通じて繊維補強効果の改善因子を同定することができるが、これに関しては別の機会に譲る。

謝辞

熊本大学三井宣之教授に御助力をいただいたことをここに厚く感謝致します。

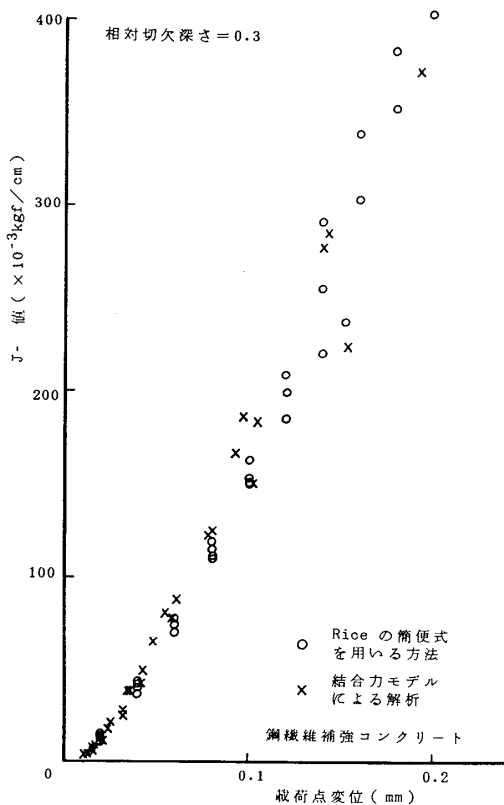


図1 Rice式を用いる直接的評価と本手法による間接的評価の比較検討

表2 使用調査

シリーズ	調査		直接引張強度 (kgf/cm ²)	静弾性係数 ($\times 10^5$ kgf/cm ²)
A	水セメント比 50% 砂体積率 0.35 砂利体積率 0.30 材令 21日(20℃水中) +7日(空气中)	繊維体積率 1.0%	38.9	3.41
B	水セメント比 50% 砂体積率 0.3 砂利体積率 0.4 材令 28日(20℃水中)	繊維体積率 1.0%	36.5	3.17
C	水セメント比 50% 砂体積率 0.4 砂利体積率 = 0.2 材令 28日(20℃水中)	繊維体積率 0.5%	33.9	2.73
		繊維体積率 1.0%	38.2	3.08
		繊維体積率 1.5%	47.0	2.52

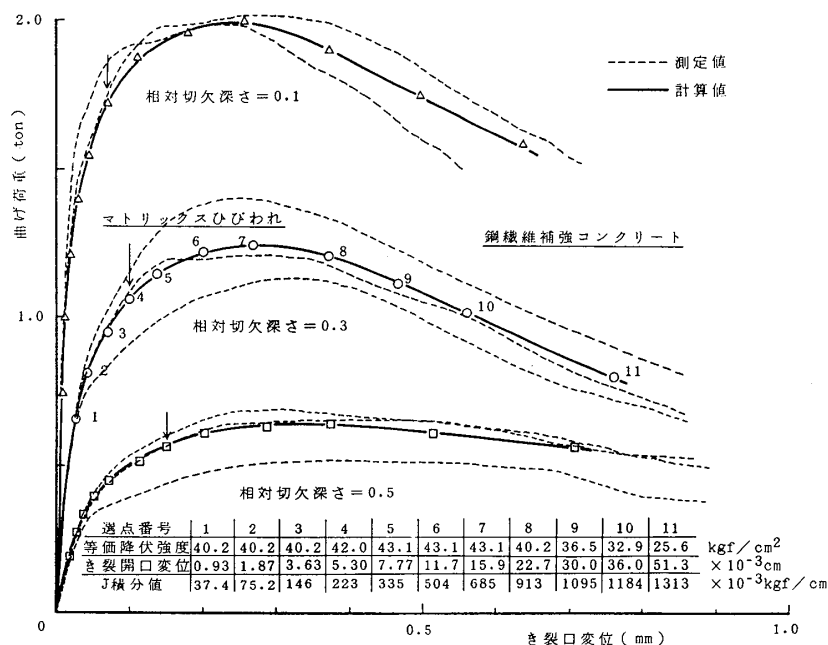


図2 荷重-き裂口変位曲線に関する測定値と計算値の比較

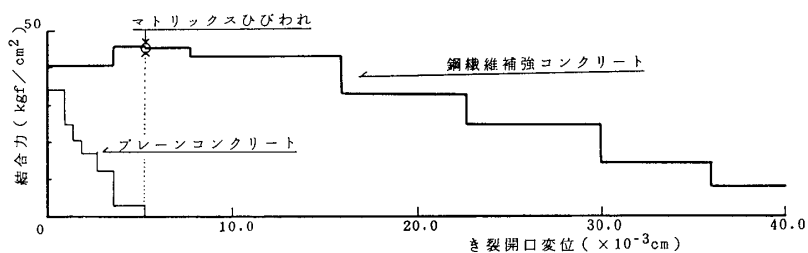


図3 推定された結合力-COD関係

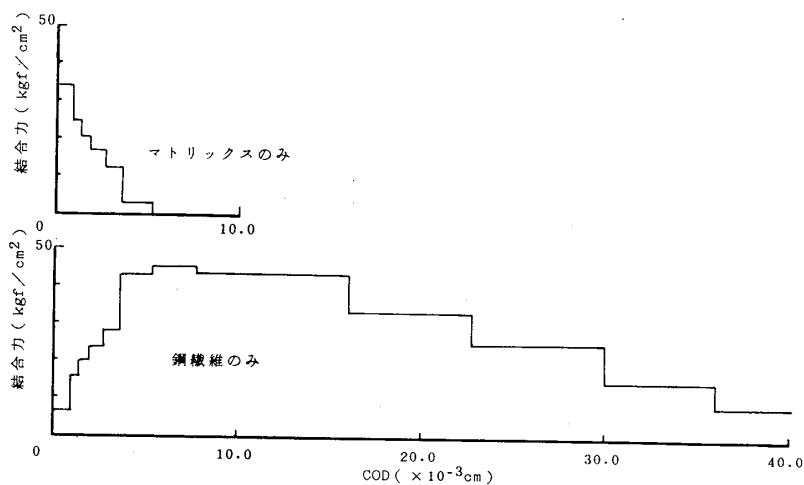


図4 マトリックス及び繊維のひびわれ開口抵抗

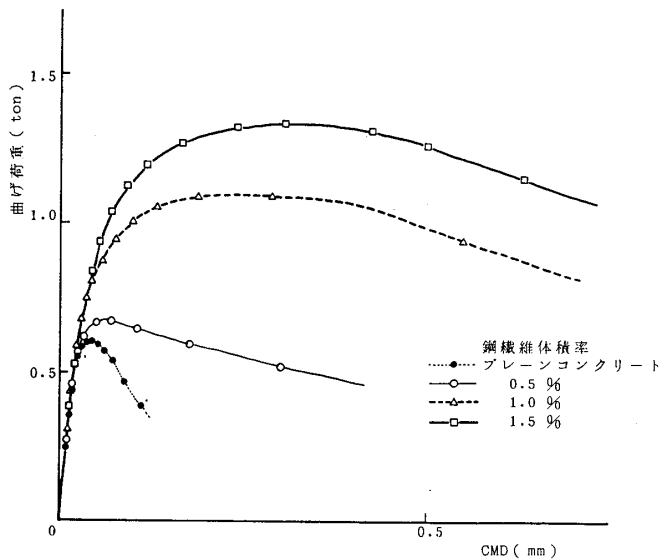


図5 各種繊維体積率に対する荷重-き裂口変位曲線

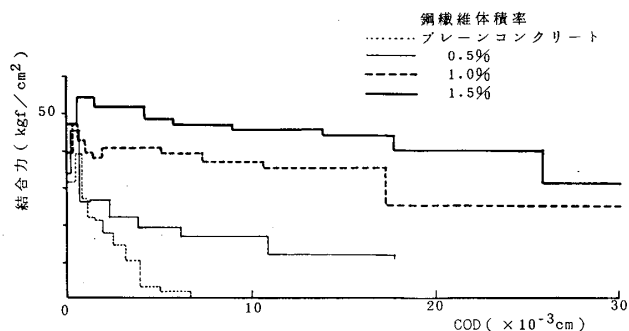


図6 各種繊維体積率に対する結合力-COD関係

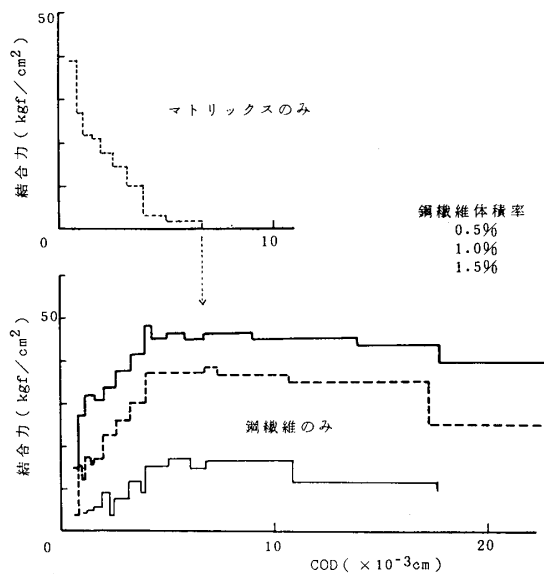


図7 各種繊維体積率に対する繊維のひびわれ開口抵抗

*東京大学教授、工博 **熊本大学助手、工修 ***大分大学教授、工博