繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON BENDING FRACTURE BEHAVIOR
OF FIBER REINFORCED CONCRETE

平岩 陸*, 谷川 恭雄**, 朴 相 俊***

Takashi HIRAIWA, Yasuo TANIGAWA and SangJun PARK

In fiber reinforced concrete, fibers are added to improve the brittle fracture of plain concrete. However, the relationship between the fracture behavior of fiber reinforced concrete and the property of fiber is not necessarily grasped. In this paper, in order to investigate the bending fracture behavior of fiber reinforced concrete, an analytical study is carried out by visco-elasto-plastic suspension element method (VEPSEM). The fiber element simulated as static elasto-plastic element in earlier VEPSEM is modelled as dynamic element in this analysis. It is shown that the analytical results obtained by using this dynamic fiber element can comparatively express the experimental ones. The maximum load becomes high and the descending portion of load-deflection curve becomes ductile. The cause of these results can be explained from the internal cracks occurred by bridging effect of fiber.

Keywords : fiber reinforced concrete, dynamic fiber element, bending test, non-continuum model, dynamic analysis, visco-elasto-plastic suspension element method
繊維補強コンクリート、動的繊維要素、曲げ試験、非連続体モデル、動的解析、粘弾塑性サスペンション要素法

1. まえがき

繊維補強コンクリートは、コンクリート特有の脆性的な破壊性状を改善し、靱性的な破壊性状を付与することを目的として、コンクリートに各種の繊維を混入した複合材料である。代表的な繊維として鋼繊維¹⁾が挙げられ、広く用いられているが、他にもガラス繊維、炭素繊維、アラミド繊維、ビニロン繊維、ポリプロピレン繊維などがあり、現在も様々な繊維の開発および適用が行われている。しかし、新しく開発された繊維を混入したコンクリートが、どのような性質を持つかについては、引張試験や曲げ試験などの実験を行って検証するしかないのが現状である。これは、繊維の性質と、それを混入した繊維補強コンクリートの性質の関連が明確になっていないためである。このため、この関連を理論的に考察する試みが並行して行われている²⁻⁵⁾。

一般には、繊維混入による脆性的な破壊性状の改善は、コンクリートに発生したひび割れの拡大を繊維が防止する架橋効果によるものと説明されており、様々なモデルが提案されている。しかし、この架橋効果は、繊維およびマトリックスの力学性質だけではなく、繊維とマトリックスの付着性状によって影響を受ける。さらに繊維の分散状況およびひび割れとの位置関係によっても変化するため、繊維混入の効果を繊維補強コンクリート全体の力学性状として

評価することは困難である。これらの理由により、繊維補強コンクリートの力学的性質を繊維の性質から評価できるモデルは現状では存在しない。

筆者らは既に、コンクリートの破壊解析手法として、非連続体モデルを用いる点および動的な解析を行う点に特徴のある粘弾塑性サスペンション要素法 (VEPSEM) を提案し、コンクリートの破壊シミュレーションを行い、本解析手法の適用性を検討してきた^{6,7)}。既報⁷⁾では、VEPSEMにおける解析モデルに、特定の2節点間の変形の増大を静的に拘束する単純な繊維要素を導入することによって、繊維補強コンクリートの直接引張試験のシミュレーションを行った。しかし、この方法では、曲げ解析など大変形が生じる場合に安定した結果が得られないという問題点があった。この問題を改善するには、繊維補強コンクリートの繊維要素を、より実現象に近いモデルとして、動的な弾塑性要素とする必要があった。本論文は、繊維を模擬するために動的な弾塑性要素を導入した解析手法により、繊維補強コンクリートの曲げ破壊解析を行った結果を示すものである。

2. 解析方法

解析方法の詳細については、既報^{6,7)}を参照されたい。

ここでは、本解析に導入した動的な弾塑性要素について説明す

* 豊田工業高等専門学校建築学科 助手・博士(工学)

** 名城大学理工学部建築学科 教授・工博

*** 東京理科大学総合研究所火災科学センター
COE 研究員・博士(工学)Research Assoc., Dept. of Architecture, Toyota National College of Tech., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Science and Tech., Meijo Univ., Dr. Eng.
COE-Researcher, Center for Fire Science and Tech., Tokyo Univ. of Science,
Dr. Eng.

図-1 繊維要素の概念図

図-2 繊維要素の構成則

図-3 650Bモデル

表-1 モルタルの入力データ

$\tan\phi$	F_t	E	η	ν	d	H	D
0.3	3.0	19.6	0.3	0.05	5.0	100	300

[Notes] $\tan\phi$: Coefficient of internal friction, F_t : Pure tensile strength (MPa), E : Elastic modulus (GPa), η : Viscosity (MPa·s), ν : Shear loading rate (cm/s), d : Diameter of nodal point (mm), H : Height of specimen (mm), D : Width of specimen (mm)

る。図-1は、本解析における繊維の構成モデルの概念図を示したものである。この図に示すように、解析モデルは節点とモルタル要素から構成されており、構成則に従いモルタル要素が消失することでコンクリートのひび割れを表現している。本研究では、このような節点間を動的な弾塑性要素により結ぶことで繊維補強を考慮した。この弾塑性要素は、図-2に示すバイリニア型の応力-ひずみ関係の力学性状を持つ。すなわち、要素のひずみ ϵ_s が降伏ひずみ ϵ_y より小さい範囲では、要素は弾性であり、 ϵ_s が ϵ_y を超えれば、要素は降伏し、それ以降は、ひずみが增大しても抵抗応力は降伏応力 σ_y の一定値となる。この要素による抵抗力が、ひび割れの発生後、つまりモルタル要素が消失した後にも生じ続けることによって、本要素は繊維による架橋効果を模擬している。既報⁷⁾と異なる点は、この繊維要素が運動方程式に組み込まれ、動的な変形挙動を表現できる点である。なお、コンクリートと繊維の引抜き性状を検討した文献⁸⁾および筆者らの実験¹⁰⁾によれば、繊維が引き抜かれる場合、最大応力後に応力が低下することや、引抜きに対して配向角の影響が存在することが指摘されているが、今回の解析では単純化のため最も単純なバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いた。このため、本解析では、繊維のコンクリートからの抜出しおよびひび割れに対する繊維の配向角の影響は考慮していないことになる。

繊維要素は、基本として弾性係数 E_s 210GPa、降伏応力 σ_y 300MPaの一般の鋼材を想定している。実際の解析においては、これに断面積を乗ずることによって計算を行っている。本解析において、繊維補強の効果がある程度現れる範囲で、断面積を設定したところ 2mm^2

程度となり、一般の繊維よりも太いものとなったが、本解析は2次元解析であるため、このような実現象との差が生じたものと考えられる。また、本解析においては、繊維断面積に繊維長さを乗じ、それを全て足したものを繊維体積と考え、この繊維体積と、解析モデルの全体積との比率を繊維混入率と定義している。この定義に従って計算すると、繊維の断面積が 2mm^2 の時の繊維混入率は約1%となった。

解析モデルは、図-3に示すように、650個の節点をランダムに配置した650Bモデルであり、中央一点集中荷重による曲げ試験のシミュレーションを行った。また、モルタル要素の入力データは表-1に示す通りである。

以上のように、動的な繊維要素を加えた解析手法を用いて、繊維混入率 p 、繊維長さ L_f 、繊維の配向性、さらに繊維の性質として弾性係数 E_s および降伏応力 σ_y が、繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動に及ぼす影響について検討した。

3. 解析結果および考察

図-4 解析モデル (繊維混入率 p の変化: $L_f = 1\text{cm}$)

図-5 荷重P-中央点たわみδ曲線（繊維混入率 p の影響）

3.1 繊維混入率 p の影響

図-4は、繊維混入率 p を模擬して、繊維要素の本数を変化させた場合の解析モデルを示したものである。繊維長さ $L_f=1\text{cm}$ で、繊維混入率 $p=1.0\%$ とし、配置をランダムとしたものを基本とし、本数を1/2, 1/4と減らしている。よって、繊維混入率はそれぞれ1.0, 0.5, 0.25%となる。図-5は、これらのモデルを用いた場合の荷重P-中央点たわみδ曲線を示したものである。この図によると、プレーンコンクリートは最大荷重に達したのち、荷重が一気に低下していることがわかる。これに対して、繊維を混入したものは最大荷重が増加するとともに、最大荷重後も耐力を保持しており、さらにその傾向は繊維混入率の大きいものほど大きい。これらの結果は、図-6に示す各繊維混入率の最終的な破壊状況から説明できる。すなわち、プレーンコンクリートにおいては、供試体下部の中央部付近にひび割れが生じ、それが一直線に供試体を貫き、供試体上部まで到達しており、供試体が折れるような形で破壊している。これが最大荷重後に一気に荷重が低下する原因と考えられる。一方、繊維を混入したものでは、プレーンコンクリートで生じたひび割れの周りにもひび割れが生じている。これは、繊維の架橋効果により、ひび割れ幅の拡大が抑制され、その周りにひび割れが生じるものと考えられる。また、繊維混入率が大きくなるにつれて、より広い範囲にひび割れが生じており、繊維による架橋効果が顕著になることがわかる。このような傾向は、実験において観察される結果と同様である。なお、実験においては、最大荷重後に荷重が徐々に低下していくものも多いが、本解析結果では、荷重が一定値に収束している。これは、繊維要素の構成則において、繊維の抜けによる降伏後の応力低下を考慮していないためと考えられる。

3.2 繊維長さ L_f の影響

図-7は、繊維混入率 $p=1.0\%$ とし、繊維長さ L_f を変化させた場合の解析モデルを示したものである。繊維の配置については、 $L_f=1\text{cm}$ のものと同様にランダムであり、これらのモデルを用いて繊維長さの影響を考察した。図-8は、これらのモデルを用いた場合の荷重P-中央点たわみδ曲線を示したものである。この図によると、繊維が長くなると、わずかに最大荷重が低下し、全体の変形挙動が変化するようであるが、本解析では、繊維長さの影響はそれほど生じなかったといえる。繊維の形状などにもよるが、繊維が長いものの方が強度を上昇させる効果が高いとされており¹¹⁾、この理由として繊維が長いとひび割れ発生後の引抜き抵抗が増すことが挙げ

図-6 破壊状況（繊維混入率 p の影響） 図-7 解析モデル（繊維長さ L_f の変化： $p=1.0\%$ ）

図-8 荷重P—中央点たわみδ曲線（繊維長さLfの影響）

られている。本解析では、繊維の構成則として、降伏後の応力低下を考慮していないため、このような結果になったものと考えられる。

3.3 繊維の配向状態の影響

図-9は、繊維の配向状態を変化させた場合の解析モデルを示したものである。繊維混入率 $p=1.0\%$ 、繊維長さ $L_f=1\text{cm}$ の解析モデルから、縦方向の要素（垂直方向との角度が 45° 以内の要素）のみのモデルと、横方向の要素（水平方向との角度が 45° 以内の要素）のみのモデルを作成している。縦要素のみのモデルは、もとの繊維要素のうち46%の要素を、横要素のみのモデルは、残りの54%の要素を使用しているモデルとなった。図-10は、これらのモデルを用いた場合の荷重P—中央点たわみδ曲線を示したものである。この図によれば、繊維要素数が約半分しかない横要素のみのモデルにおいても、全要素のモデルとほぼ同様の变形挙動を示していることがわかる。逆に縦要素のみのモデルでは、最大荷重も小さく、その後も一定値に収束するものの、荷重が小さくなっている。図-11は、これらの破壊状況を示したものである。この図からも明らかなように、横要素のみの場合、図-6(4)に示される全要素の結果とほとんど同様の破壊状況を示しており、曲げ試験においては、横方向の要素の役割が非常に大きいことがわかる。一方、縦要素のみの場合、図-6(1)に示されるプレーンコンクリートの結果よりも破壊領域が広いものの、ごくわずかの範囲に破壊が集中しており、繊維要素の効果あまり生じないことがわかる。

3.4 繊維性質の影響

繊維補強コンクリートに用いられる繊維には、鋼繊維以外にもガラス繊維や炭素繊維など様々な繊維があり、現在も開発が進められている。ここでは、繊維の性質が繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動に及ぼす影響について検討するため、繊維要素の入力データである弾性係数 E_s および降伏応力 σ_y を変化させた解析を行った。

(1) 弾性係数 E_s の影響

図-12は、弾性係数 E_s を変化させた場合の荷重P—中央点たわみδ曲線を示したものである。弾性係数が小さい場合、荷重がまだ小さいときに一時的に低下するが、その後は徐々に荷重が上昇していく。一方、弾性係数が大きい場合、荷重の上昇率が高く、最大荷重そのものも大きい、その後大きく荷重が低下して一定値に収束している。

図-9 解析モデル（繊維の配向状態の変化）

図-10 荷重P—中央点たわみδ曲線（繊維の配向状態の影響）

図-11 破壊状況（繊維の配向状態の影響）

図-13は、これらの破壊性状を示したものである。弾性係数が小さい場合、供試体中央部付近に何本もすじになるようにひび割れが生じている。これらのすじ状のひび割れは、それぞれ図-12の荷重P

図-12 荷重P—中央点たわみδ曲線（弾性係数 E_s の影響） 図-13 破壊状況（弾性係数 E_s の影響）

—中央点たわみδ曲線において、荷重が一時的に大きく低下したときに発生している。これは、弾性係数が小さいと、架橋効果が小さいため、ひび割れ発生後の開口部が広がりやすいものの、広がるに従って繊維による拘束がさらに増大していくため、それ以上ひび割れ幅が広がることがなく、次のすじとなるひび割れが生じるものと考えられる。一方、弾性係数が大きい場合、破壊がすじ状ではなく、狭い範囲に密集して生じている。これは、弾性係数が大きいとわずかなひずみで大きな拘束力が生じるため、ひび割れが発生してその付近の応力のバランスが崩れた場合に、破壊が集中して一気に生じることを示している。

(2) 降伏応力 σ_y の影響

図-14は、降伏応力 σ_y を変化させた場合の荷重P—中央点たわみδ曲線を示したものである。降伏応力が小さい場合、最大荷重はブレンコンクリートよりも大きくなるが、荷重はその後すぐに低下する。その後、ブレンコンクリートのように応力が0になることはないものの、低い値で収束している。一方、降伏応力が大きくなると、ブレンコンクリートの最大荷重を超えてさらに荷重が増大していき、今回の中央点たわみの範囲では、荷重が上昇し続けてい

図-14 荷重P—中央点たわみδ曲線（降伏応力 σ_y の影響） 図-15 破壊状況（降伏応力 σ_y の影響）

図-16 供試体下部の節点間のひずみ量

る。

これらの結果が生じる理由は、破壊状況を示した図-15から説明できる。降伏応力が小さい場合、ブレンコンクリートと同じく、供試体中央付近のみにひび割れが生じており、全体に広がっていない。また、その部分の繊維が降伏している。これは、降伏応力が小さいため、繊維がすぐに降伏応力に達し、ひび割れが発生したあとに、その拡大を防止することができないことを示している。ただ

し、ひび割れが集中しているものの、繊維の降伏応力分だけは荷重を保つことができるため、最終的に荷重が0にはならない。一方、降伏応力が大きい場合、これとまったく異なり、全体にひび割れが分散しており、繊維の降伏もまったく生じていないことがわかる。これは、降伏応力が大きくなると、ひび割れ発生後のひび割れ幅の拡大を確実に防止できるため、供試体全域にひび割れを誘発することになることを示している。これらのことを確認するため、供試体下部の変形状態を検討した。図-16は、たわみが0.5%の時の供試体下部の節点間のひずみを示したものである。これによると、プレーンコンクリートでは、供試体中央付近でひずみが突出しており、他の部分にはほとんどひずみが生じていないことがわかる。一方、繊維を混入したものでも、降伏値が小さい場合は、中央部付近のひずみは小さくなるものの、それ以外の箇所ではひずみはほとんど生じない。しかし、降伏値が大きくなると、供試体下部全域で変形が生じており、加えて中央部のひずみが非常に小さくなっている。つまり、プレーンコンクリートでは破壊が一点に集中するのに対して、繊維補強コンクリートでは、繊維の架橋効果によって破壊が分散しており、降伏値が大きい場合にその効果が大きいことが明らかである。

4. まとめ

本研究では、筆者らが開発した粘弾塑性サスペンション要素法に、動的な繊維要素を導入した場合の、繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動の再現性について検討した。その結果、以下のような解析結果が得られた。

- 1) 繊維を混入することで、プレーンコンクリートに比較して最大荷重が大きくなり、最大荷重後も耐力を保持した。また、この傾向は、繊維混入率が大きいほど顕著であった。
- 2) 破壊状態を検討することにより、繊維の混入による影響が繊維の架橋効果によるひび割れの分散に伴うものであることを示した。
- 3) 繊維長さの影響はそれほど生じなかったが、これは繊維の引き抜き抵抗による架橋効果の減少を考慮していないためと考えられる。
- 4) 曲げに対して抵抗するのは横方向の繊維要素であり、縦方向の繊維要素の役割は小さい。
- 5) 繊維の弾性係数が大きくなると、最大荷重は大きくなるものの、その後の破壊性状が脆性的になる結果が得られた。

6) 繊維の降伏応力が大きいと、荷重が上昇し続け、ひび割れが供試体全域に広がっていく結果が得られた。

これらの解析結果は、既往の実験結果の多くを再現している。また、弾性係数や降伏値の影響については、予想される破壊挙動を示しているものと考えられる。よって、本解析手法を用いて繊維補強コンクリートの曲げ破壊挙動を再現できる可能性があるといえる。ただし、本解析手法は2次元であり、定性的な再現にとどまっている。今後は、コンクリートからの繊維の引抜きを考慮した構成則を導入するとともに、2次元解析と実現象との関連を考察し、定量的な検討につなげていく予定である。

謝辞

本研究費の一部は、平成16年度日本学術振興会科学研究費補助金・若手研究(B)によった。付記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 日本建築学会：スチールファイバーコンクリートの現状、丸善、1984.3
- 2) 真嶋光保・幸左賢二・大野定俊：繊維補強セメント/コンクリート複合材料、技報堂出版、1994.5
- 3) 松岡茂・堀井秀之：短繊維補強コンクリートの現状について、コンクリート工学、Vol.37, No.4, pp.19-24, 1999.4
- 4) 関田徹志：高性能繊維補強セメント材料の設計技術の現状、コンクリート工学、Vol.38, No.6, pp.9-16, 2000.6
- 5) 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、2002.1
- 6) 荒井正直・船見晃啓・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：非連続体モデルを用いたコンクリートの破壊解析手法、日本建築学会構造系論文集、No.471, pp.1-9, 1995.5
- 7) 平岩陸・谷川恭雄・森博嗣・朴相俊・杉浦充：引張応力を受ける繊維補強コンクリートの変形挙動に関する解析的研究、日本建築学会構造系論文集、No.578, pp.7-11, 2004.4
- 8) 鎌田敏郎・荒川健・栗原哲彦・六郷恵哲：コンクリートと鋼繊維の付着特性に関する基礎的研究、セメント・コンクリート論文集、No.52, pp.754-759, 1998.12
- 9) 清田雅量・三橋博三・関田徹志・川又篤：繊維補強セメント系複合材料における単繊維の引抜き抵抗性能に関する実験的研究、セメント・コンクリート論文集、No.56, pp.625-632, 2002.12
- 10) 平岩陸・田中清人・谷川恭雄・森博嗣：モルタル中の各種繊維の引抜き特性に関する基礎的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、A-1, pp.769-770, 2003.9
- 11) 椿龍哉・田中健二郎：鋼繊維の引き抜き特性に及ぼす付着長の影響、コンクリート工学論文集、Vol.12, No.2, pp.83-92, 2001.5

(2005年10月6日原稿受理、2006年1月12日採用決定)