

# 論文 収縮ひび割れに及ぼす繊維の影響に関する解析的研究

平岩 陸<sup>\*1</sup>・朴 相俊<sup>\*2</sup>

**要旨：**本研究では、コンクリートに繊維を混入した場合の収縮ひび割れの発生状況について検討するため、粘弾塑性サスペンション要素法に繊維要素を付加した解析を行った。その結果、繊維を混入した場合、ブレンコンクリートに比較して、ひび割れが分散してひび割れ数が増大するものの、最大ひび割れ幅が減少する結果が得られた。これらは実験でも得られている知見であり、繊維の影響を解析によって定性的に再現できることがわかった。

**キーワード：**収縮、ひび割れ、繊維、非連続体モデル、粘弾塑性サスペンション要素法

## 1. まえがき

コンクリートのひび割れの原因の1つとして挙げられる収縮は、コンクリートにおいては避けられない現象である。しかし、収縮ひび割れを減らすために、収縮量を減らす方法が様々に提案されている<sup>1)</sup>。しかし、収縮ひび割れは、収縮が拘束を受ける場合に発生するため、拘束を減少させる方法や補強筋等に応力を負担させる方法により、ひび割れを制御する対策も提案されている<sup>2)</sup>。こちらの目的は、主として設計ひび割れ幅を設定し、発生するひび割れ幅をそれ以下に制御することである。前者としてはスリットによる方法、後者としては鉄筋補強による方法がある。本研究で取り上げる繊維による方法は、後者の方法であり、繊維混入によってひび割れ幅の抑制効果やひび割れの分散が認められている<sup>3)</sup>。

収縮ひび割れに関する解析的な検討については、これまで多くなされている。FEMを用いた検討<sup>4)</sup>が多いものの、連続体モデルであるため、ひび割れをコンクリート要素の中に取り込む分散ひび割れを取り入れるものが多い、さらに鉄筋もしくは繊維を考慮するためには同様の処理が必要となるため、モデル化は煩雑となる。このため、要素を文字通り離してひび割れを表現する離散ひび割れを用いた手法としてRBSMによる解析<sup>5)</sup>が行われている。こちらの手法は、非連続体とすることでひび割れを明確に表現でき、ひび割れの表現に向いていると考えられる。本研究で用いる粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)<sup>6)</sup>は、RBSMと同様の非連続体モデルを用いた手法である。ただし、解析対象を全て要素分割するRBSMに対して、コンクリートをそもそも対象としているため、粗骨材を表す節点と、それらをつなぎモルタルを表すサスペンション要素とからなる非連続モデルとした点でモデル化の方式が異なる。このモデルにおいては、サスペンション要素が変形・消失することによって、コンクリー

ト全体の変形・破壊を模擬し、ひび割れは、引張強度を超える応力が生じた場合にサスペンション要素の消失によって表現される。また、節点同士を結ぶ要素に、別の構成則を設定することによって、モルタル要素以外に鉄筋要素や繊維要素を模擬することも容易に可能といった特徴もある。このような他の要素を導入してその影響を検討するものは、破壊解析においては見られるが、収縮解析<sup>7)</sup>においては少ない。

筆者らは、粘弾塑性サスペンション要素法の適用性を確認するために、様々な条件下での再現性について検討してきた<sup>8,9)</sup>。本論文では、コンクリートの乾燥収縮の測定に用いられる供試体において、内部拘束の鉄筋を配置してひび割れを生じるようにした場合を想定し、これに繊維を模擬した弾塑性要素を付加した解析を行った。繊維の混入がひび割れの発生にどのような影響を与えるか、また、それが実験で得られている知見を定性的に再現できているかを検討した。その後、その影響が繊維の混入率および物性によってどのように変化するか検討した。

## 2. 解析方法

ここでは、使用した解析モデルについて述べるとともに、解析手法について、収縮の考え方の概略および繊維要素の導入方法について説明する。ただし、解析手法の詳細については、既往の文献<sup>6,8,9)</sup>を参照されたい。

図-1は、今回用いた888Bモデルである。これは、縦

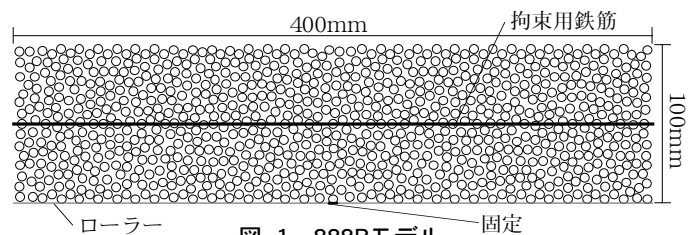


図-1 888Bモデル

\*1 名城大学 理工学部 建築学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 金城学院大学 生活環境学部 環境デザイン学科 准教授 博士 (工学) (正会員)

100mm, 横400mmの範囲内に888個の節点を面積比40%で配置したモデルであり, 乾燥収縮の測定に用いられる100×100×400mmの角柱供試体を2次元としたものを想定し, 解析上奥行きは50mmとしている。本解析手法では, 節点とそれをつなぐサスペンション要素からなる非連続体モデルを用いており, この図は節点のみを示したものである。実際の解析においては, この節点間にサスペンション要素が構成され, それが収縮することで全体の収縮現象を模擬している。なお, 中央横にあるのは, ひび割れを生じさせるための拘束用の鉄筋要素である。これについては後述する。また, 境界条件として, 下部は左右に自由に移動するローラーとし, 中央の1節点のみ固定として全体が移動しないようにした。

本解析における収縮は, モルタルに相当するサスペンション要素に生じるものとし, 両端の節点にサスペンション要素が収縮する方向に収縮力として外力を作用させている。最終的にはこれらの合力として, 節点移動することになる。収縮力を与える外力は, 図-2に示すように, 線形的に荷重を増大させ, 到達時間Tに最大ひずみ $\epsilon$ に達するように与えている。これら2つの値が収縮に関する入力データとなる。実際には乾燥収縮は長期にわたって進行するため, 到達時間Tは大きな値を用いる必要があるが, 解析時間の関係上, 今回は0.1sとしている。このため, この解析は, サスペンション要素の高速収縮を想定することで生じる内部応力によるコンクリートの変形・破壊状況を検討していることになり, 通常考慮すべきクリープ現象の影響を考慮できていない。これは, 本解析の意図として, できる限り単純なモデル化によって, 収縮による変形・破壊現象を定性的に再現することを意図しているためである。サスペンション要素の入力データを表-1に示す。これまでの解析および予備解析からこれらの値を設定している。

繊維の考慮については, 解析モデル中の節点同士を弾塑性要素で結ぶことで表現している。図-3は, 繊維の配置の1例を示したものである。今回は, 繊維長さを約1cmとし, その範囲にある節点同士を, その間の節点の有無にかかわらず弾塑性要素で結んでいる。この弾塑性要素は, 節点間のひずみが増加すると, そのひずみに応じて弾性力が節点間を拘束する方向に働く要素である。この弾塑性要素に与える構成則は, 図-4に示すようなバイリニア型とし, 今回は鋼繊維を想定して弾性係数 $E=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ , 降伏値 $\sigma=300 \text{ N/mm}^2$ で, 断面積を $10 \text{ mm}^2$ としている。これは一般の繊維よりも太い値であるが, 今回の解析で効果の出る断面積として設定した。繊維混入率については, 繊維断面積に全繊維長さを乗じたものを繊維体積として, 解析モデルの全体積

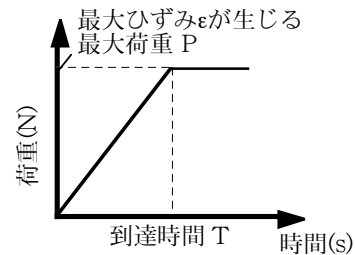


図-2 収縮用外力の与え方

表-1 サスペンション要素の入力データ

$\tan\phi$	Ft	E	$\eta$	$\epsilon$	T
0.5	2.0	2.1	0.1	1000 2000 3000	0.1

[Notes]  $\tan\phi$ : 内部摩擦角, Ft: 純引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ ), E: 弾性係数 ( $\times 10^4 \text{ N/mm}^2$ ),  $\eta$ : 塑性粘度 ( $\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$ ),  $\epsilon$ : 最大ひずみ量 ( $\mu$ ), T: 最大ひずみ量に達するまでの時間(s)

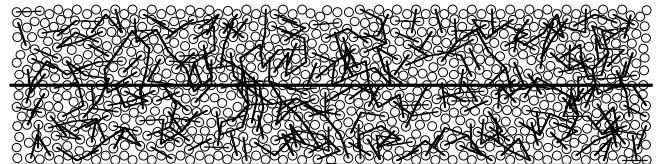


図-3 繊維要素を含む解析モデルの1例 (繊維混入率  $p=4.0\%$ )

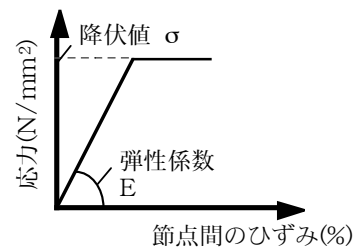


図-4 繊維の構成則

表-2 繊維の入力データ

p	E	$\sigma$	A
1.0	$2.1 \times 10^5$	300	10
2.0			
4.0			

[Notes] p: 繊維混入率(%), E: 弾性係数 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $\sigma$ : 降伏値 ( $\text{N/mm}^2$ ), A: 断面積 ( $\text{mm}^2$ )

( $100 \times 400 \times 50 \text{ mm}$ ) に対する割合として算出している。繊維の入力データを表-2に示す。なお, 本来なら, 繊維とコンクリートの付着特性を考慮して入力データおよび構成則を設定すべきものと考えられるが, ここでは考慮していない。このため, 実験では生じる繊維の引抜きによるすべりは考慮していないことになり, 繊維の効果がよく表れる可能性がある。

また、ひび割れを発生させるためには、拘束力が必要である。今回は図-1,3に示すように中央横に拘束用鉄筋要素を設定し、プレーンコンクリートであってもひび割れが生じるようにしている。鉄筋要素は、繊維要素と同様に節点同士を弾塑性要素で結んだものである。今回想定した鉄筋は、SD295を念頭に弾性係数 $E=2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、降伏値 $\sigma=300 \text{N/mm}^2$ とし、断面積を $1000 \text{mm}^2$ として入力データを与えた。

以上のような解析方法を用いて、まず、繊維の有無の影響について、最大ひずみ量 $\epsilon$ を変えて解析を行った結果を比較して、本解析による再現性を検討した。その後、繊維混入量 $p$ および繊維の物性として弾性係数 $E$ および降伏値 $\sigma$ を変化させることで、それらの要因がコンクリートの収縮変形・ひび割れ発生状況にどのような影響があるかを解析的に比較・検討した。

### 3. 解析結果および考察

#### 3.1 繊維補強の有無の影響

図-5は、最大ひずみ量 $\epsilon$ が $1000 \mu$ と $3000 \mu$ の条件において、プレーンコンクリートの収縮状況として節点移動状況およびひび割れ発生状況を示したものである。な

お、節点移動状況は、変位を実際の200倍として表している。また、ひび割れには、純引張破壊とせん断圧縮破壊があるが、これらは破壊時の応力状態による相違である。

最大ひずみ量の変化による影響は、中央部分のひび割れ幅の変化に大きく表れ、節点移動状況を見ると、最大ひずみ量 $1000 \mu$ よりも $3000 \mu$ の方が中央部分のひび割れ幅が大きくなっていることがわかる。本解析における最大ひずみ量は収縮量に相当するため、単純に収縮量が大きくなるとひび割れ幅が大きくなると言える。また、 $3000 \mu$ の結果では、右下の部分にもひび割れが生じている。これは、中央の拘束鉄筋によるひび割れ分散効果によるものと考えられる。

図-6は、図-5と同様に最大ひずみ量 $\epsilon$ が $1000 \mu$ と $3000 \mu$ の条件において、繊維要素を考慮した繊維補強コンクリートの収縮状況を示したものである。最大ひずみ量 $1000 \mu$ の条件の節点移動状況を見ると、ほとんどひび割れの発生が確認できない。一方でひび割れ発生状況を見ると、ひび割れが広範囲に発生していることが確認できる。つまり、繊維要素の導入によりひび割れが分散して発生するようになり、節点移動状況からは確認できない程度にひび割れ幅が小さくなっていると言える。しか

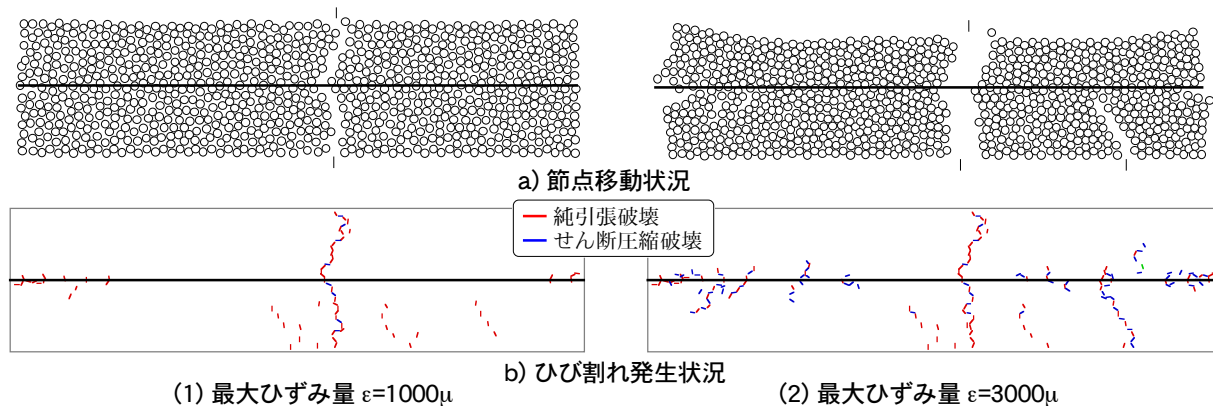


図-5 収縮状況：プレーンコンクリート

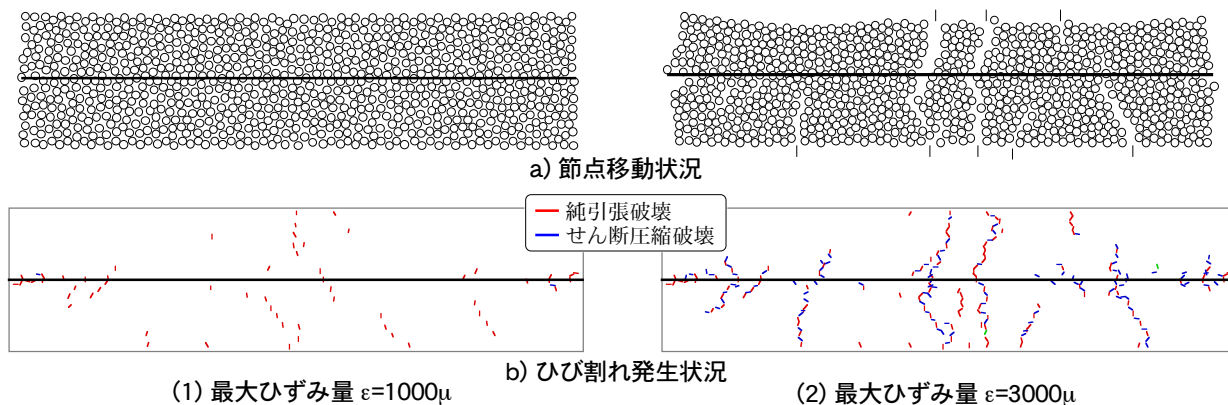


図-6 収縮状況：繊維補強コンクリート

し、最大ひずみ量 $3000\mu$ では、繊維を混入した場合でもひび割れの発生が節点移動状況から確認できる。収縮量が小さい場合は繊維混入の効果が大きかったものの、より収縮量が大きくなると効果が小さくなることを示している。ただし、プレーンコンクリートに比べれば、上下に貫くひび割れも2本に分散するとともに、それぞれのひび割れ幅は小さくなっている。また、上下の片面のみが発生しているひび割れも4本程度観察できる。このようなひび割れの分散は、ひび割れ発生状況からも明らかであり、繊維要素の導入による効果が生じていることを示している。

これらの結果から、繊維要素の導入は従来の知見通り、ひび割れの分散とひび割れ幅の抑制を再現できていると考えられる。これを詳細に検討するため、解析結果からひび割れ数および最大ひび割れ幅を算出・比較した。ひび割れ数は、純引張破壊、圧縮せん断破壊ひび割

れが生じた要素の総数を、最大ひび割れ幅は、ひび割れが生じた要素のうちもっとも節点間の変位が大きいものの値を示したものであり、それぞれひび割れの分散状況とひび割れ幅の抑制状況を示していると考えられる。

最大ひずみ量を変化させた場合の、プレーンコンクリートと繊維補強コンクリートのひび割れ数を図-7に、最大ひび割れ幅を図-8に示す。最大ひずみ量が大きくなると、ひび割れ数および最大ひび割れ幅いずれも大きくなるのは、プレーンコンクリートも繊維補強コンクリートも変わらない。しかし、プレーンコンクリートと繊維補強コンクリートの値を比較すると、ひび割れ数は繊維補強コンクリートの方が多く、最大ひび割れ幅は繊維補強コンクリートの方が小さくなっていることがわかる。つまり、繊維要素の導入によりひび割れが分散するとともに、ひび割れ幅が抑制されていることが明確に示されている。

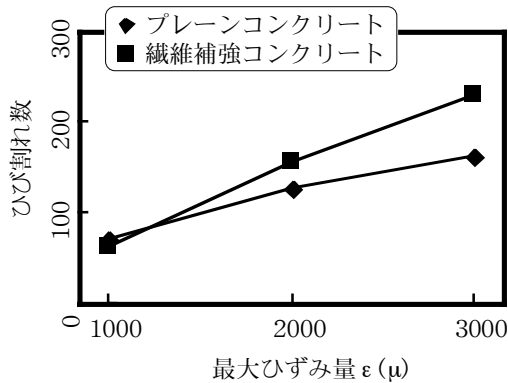


図-7 ひび割れ数と最大ひずみ量 $\epsilon$ の関係 (繊維の有無の影響)

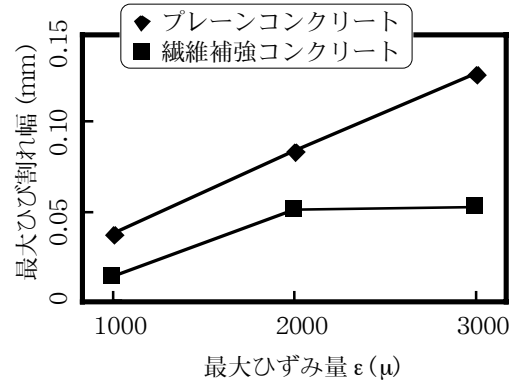
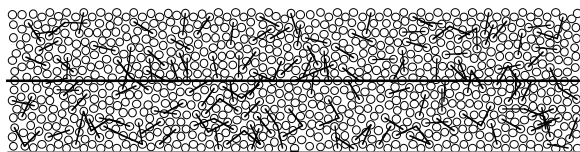
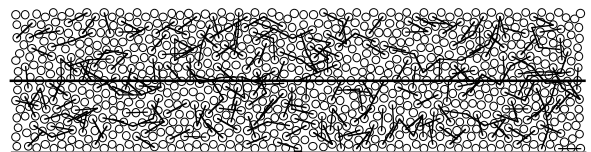


図-8 最大ひび割れ幅と最大ひずみ量 $\epsilon$ の関係 (繊維の有無の影響)



(1) 繊維混入率  $p = 1.0\%$



(2) 繊維混入率  $p = 2.0\%$

図-9 繊維混入率の異なる解析モデル

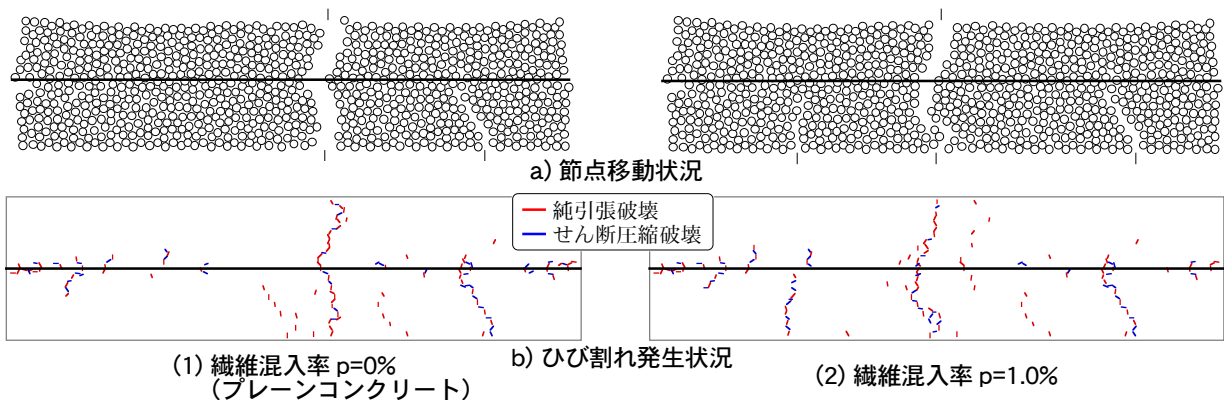


図-10 収縮状況：繊維混入率 $p$ の影響 (最大ひずみ量 $2000\mu$ )



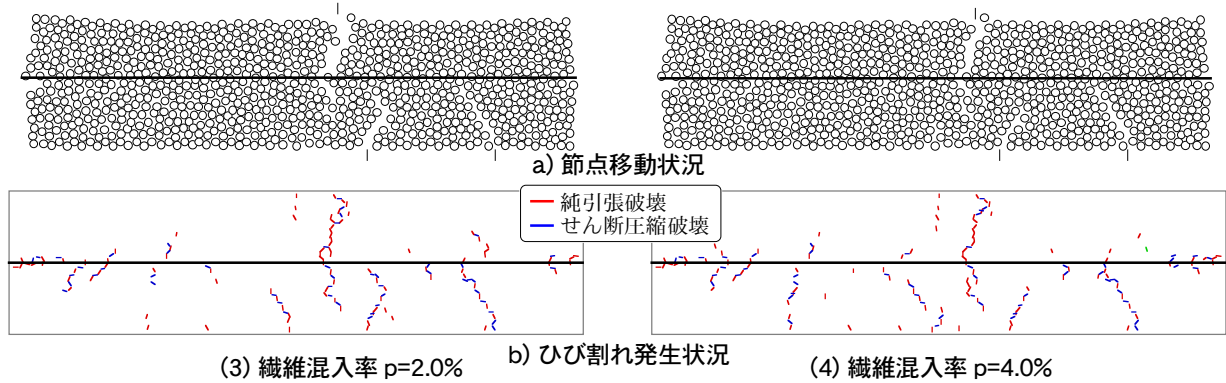


図-10 収縮状況：繊維混入率 $p$ の影響（続き）  
（最大ひずみ量 $2000\mu$ ）

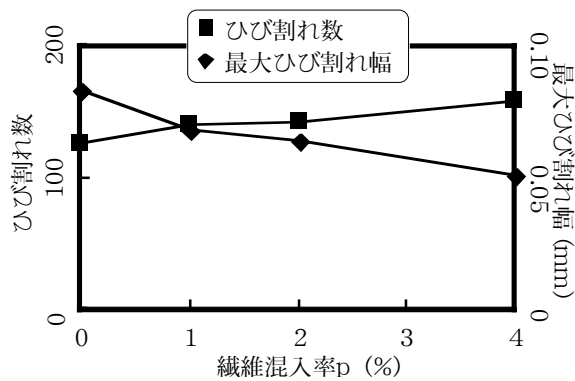


図-11 ひび割れ数と最大ひび割れ幅に及ぼす繊維混入率 $p$ の影響

### 3.2 繊維混入量の影響

図-9に、繊維の本数を変えた解析モデルを示す。図-3の繊維混入率 $p=4\%$ に対して、本数を半分として $p=2\%$ 、またその半分で $p=1\%$ とすることで、繊維混入率の変化を模擬している。これらのモデルを用いて解析を行った結果として、最大ひずみ量 $\epsilon$ が $2000\mu$ の結果を図-10に示す。もっとも小さい繊維混入率 $p=1\%$ であっても繊維混入の効果は現れており、節点移動状況を見ると、中央部に生じるひび割れの幅がプレーンコンクリー

トに比べて小さくなっているとともに、左下部にもひび割れが生じている。こういったひび割れ幅の抑制およびひび割れの分散の傾向は、繊維混入率が大きい $2\%$ 、 $4\%$ を見るとより顕著に表れている。すなわち、節点移動状況を見ると、中央部のひび割れの幅がより小さくなっていくとともに、他のひび割れ幅も小さくなっている。また、ひび割れ状況を見るとひび割れがより分散するようになっている。このような繊維混入率の影響をひび割れ数および最大ひび割れ幅で示したのが図-11である。これによれば、繊維混入率が大きくなるに従ってひび割れ数が多くなる一方で、最大ひび割れ幅が小さくなっており、前述した傾向をこれらの数値からも確認できる。

### 3.3 繊維の物性の影響

繊維の物性の影響の検討として、繊維の降伏値 $\sigma$ および弾性係数 $E$ を変化させた解析を行った。傾向をわかりやすくするため、それぞれの値を独立させて当初の $1/10$ 倍と $10$ 倍として検討している。図-12は、それぞれの変化がひび割れ数および最大ひび割れ幅に与える影響を示したものである。いずれも、値を $1/10$ まで小さくしても、プレーンコンクリートに比較すれば、ひび割れ数が多くなり、また最大ひび割れ幅が小さくなってお

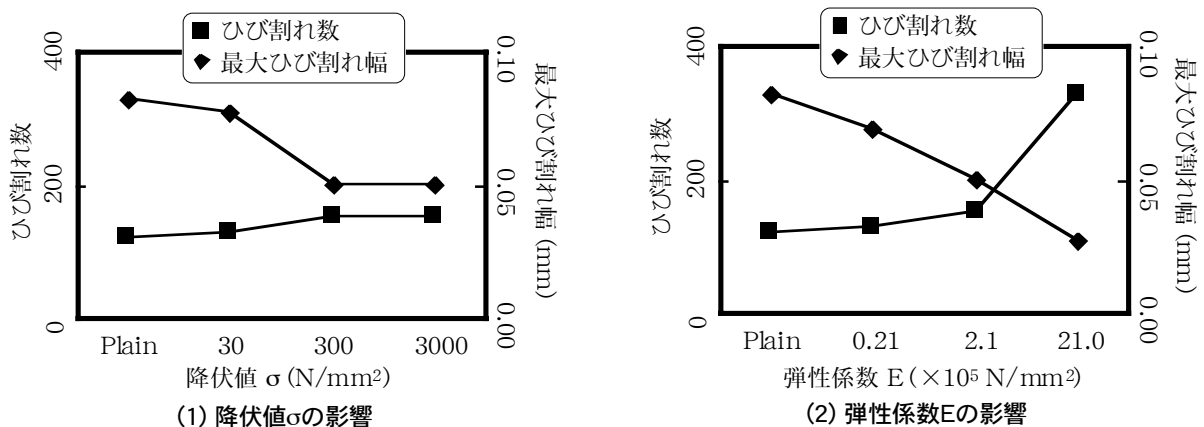


図-12 ひび割れ数と最大ひび割れ幅に及ぼす繊維の物性の影響  
（最大ひずみ量 $2000\mu$ ，繊維混入率 $p=4\%$ ）

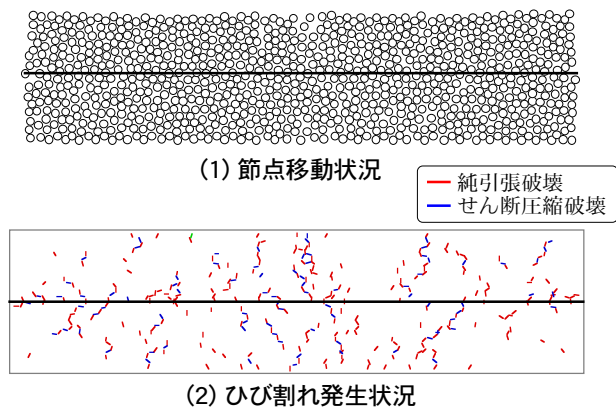


図-13 収縮状況  
(弾性係数 $E=21.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ の結果)

り、繊維混入の効果が生じていることがわかる。

一方で、値が大きくなった場合の傾向はそれぞれで異なる。降伏値 $\sigma$ の場合、値が10倍と大きくなってひび割れ数および最大ひび割れ幅は全く変化がない。本解析では、繊維の拘束力は節点間の変位に伴って生じる受動的な拘束力となるこのため、弾性係数が同一であれば、実際に生じた節点間の変位が降伏値を越えない範囲なら、拘束力は変わらないことになる。ここで収縮力として与えた最大ひずみ量 $2000\mu$ は、降伏値 $300\text{N/mm}^2$ であっても降伏しない範囲であったため、降伏荷重が大きくなって拘束力が全く変わらないことになり、全く同一の結果となったと考えられる。

一方、弾性係数 $E$ の場合、値が10倍と大きくなると、ひび割れ数はさらに多くなるとともに、最大ひび割れ幅も大きく低下する。弾性係数が高いということは、わずかな節点の変位によっても与えられる拘束力が大きいということである。このため、ひび割れの開口がさらに妨げられ、ひび割れの分散能力もより高くなったものと考えられる。このことは、もっとも弾性係数が大きい $21.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ の条件の節点移動状況およびひび割れ発生状況を示した図-13からも明らかである。節点移動状況においては大きく開口したひび割れが見られず、また、ひび割れ発生状況においては、これまでのどの結果よりも、ひび割れの数が多く、かつ広範囲に発生していることから、繊維の効果が非常に大きくなったことが理解できる。ただし、本解析では、繊維の付着を考慮しておらず、付着が切れて繊維が抜け出した場合には、すべり剛性がこれに替わるものと考えられ、繊維の弾性係数はこれほど影響は与えないものと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法に繊維要素を導入して、繊維補強コンクリートの収縮に伴うひび

割れ発生状況および変形状況を検討し、実験の知見の解析的な再現を試みた。また、繊維混入率および繊維の物性の影響を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 繊維の混入の有無の影響を、ひび割れ発生状況および節点移動状況で示すとともに、ひび割れ数および最大ひび割れ幅から検討した。その結果、繊維の混入によりひび割れが分散することでひび割れ数が増加し、ひび割れ幅が小さくなる現象を解析的に再現できた。
- 2) 繊維混入率の増大に伴い、ひび割れ数の増大と最大ひび割れ幅の減少が見られた。これは繊維の効果が大きくなったものと考えられる。
- 3) 繊維の物性の影響は、降伏値よりも弾性係数の方が大きい。これは、繊維による拘束力が節点の変位に伴って生じる受動的な力であるためと考えられる。

#### 【謝辞】

本研究の実施に際し、加藤勇次君（名古屋市役所）の助力を得た。また、本研究の研究費の一部は、平成27年度名城大学総合研究所学術研究奨励助成・基礎的研究促進事業費によった。付記して謝意を表する。

#### 【参考文献】

- 1) コンクリート工学協会：コンクリートの収縮問題検討委員会報告書，2010.3
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針（案）・同解説，2006.2
- 3) 嵯峨山剛・眞嶋光保：繊維補強コンクリートの乾燥収縮ひび割れ，コンクリート年次論文集，Vol.16，No.1，pp.1133-1138，1994.7
- 4) 石川靖晃・大橋裕成・田辺忠顕：分散ひび割れモデルによるひび割れ幅評価法の提案，コンクリート年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1555-1560，2009.7
- 5) 小澤泰士・斎藤成彦・檜貝勇：3次元バネモデルによるコンクリートの収縮ひび割れ解析，コンクリート年次論文集，Vol.26，No.1，pp.477-482，2004.7
- 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) J. E. Bolander and M. Yip: Numerical modeling of fiber reinforced cement composites subject to drying, HPRCC4, Proc. of the 4th Int. RILEM Workshop, pp.7-20, 2003
- 8) 平岩陸・遠藤大樹：粘弾塑性サスペンション要素法によるコンクリートの収縮解析，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.401-406，2010.7
- 9) 平岩陸・朴相俊：収縮ひび割れに及ぼす鉄筋の影響に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.37，No.1，pp.495-500，2016.7