

論文 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

平岩 陸^{*1}・遠藤大樹^{*2}

要旨: 本研究は、従来硬化コンクリートの破壊解析手法として用いてきた粘弾塑性サスペンション要素法を、コンクリートの乾燥収縮の再現が可能ないように改良し、乾燥収縮に伴うひび割れ発生の再現性を検討するものである。本稿では、改良方法について説明するとともに、自由端および固定端を模擬した解析モデルを用いて、収縮に伴う変形およびひび割れ発生挙動について、実験に対する再現性を検討する。また、それらに与える収縮量および引張強度の影響を検討する。

キーワード: 収縮, ひび割れ, 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

コンクリートに生じるひび割れは、コンクリート構造物の諸性能に大きな影響を与える。コンクリートの力学特性の低下から、構造物としての耐力が低下するのはもちろん、鉄筋の発錆を促進させる物質を内部に浸透させやすくなるため、耐久性にも大きな影響を及ぼす。さらに、美観上の問題になるものとして、仕上げタイルでのひび割れの発生や、ひび割れが水の通り道となることによる汚れやエフロレッセンスの発生なども構造物の外観の低下として挙げられる。

このように種々の劣化の原因となるひび割れを防止するために、これまでに多くの検討・対策[1]がなされている。ひび割れ発生の原因としては、地震や不同沈下などの外力、乾燥収縮、水和熱、アルカリ骨材反応など、多くの要因が挙げられる。これらのうち本研究では乾燥収縮を取り上げる。

コンクリートの乾燥収縮は、セメントペースト硬化体の乾燥収縮に起因しているため、コンクリートには不可避のものと言える。セメントペースト単体での乾燥収縮は $2000\sim 5000\times 10^{-6}$ 程度であり、一方、これに細骨材、粗骨材を混ぜてできる普通コンクリートの乾燥収縮ひずみは、最終的には $500\sim 1000\times 10^{-6}$ 程度である。コンクリートの乾燥収縮ひずみがセメントペーストに比較して非常に小さくなる理由は、硬質で乾燥収縮の小さい骨材が体積として70~80%程度入ることによって、骨材がペーストの収縮による応力を分担することによるためとされている。これらのことから、コンクリートの乾燥収縮ひずみは、セメントペーストの乾燥収縮ひずみ量および体積弾性率、骨材の乾燥収縮ひずみ、体積弾性率および単位容積によって表現されると考えられている[2]。よって、コンクリートの平均的な乾燥収縮ひずみはこれらの関連によって表現されるはずであるが、これらがどのように関連しているか、そのメカニズムはあま

り明らかではない。

本研究は、筆者らが開発したコンクリートの破壊解析手法である粘弾塑性サスペンション要素法を、コンクリートの乾燥収縮の再現が可能ないように改良し、解析的にコンクリートの乾燥収縮に伴うひび割れ発生を検討するものである。この解析により、モルタルおよび骨材の収縮量および単位容積、各種の外力もしくは各種条件下でのひび割れ発生を再現できれば、コンクリートの乾燥収縮のメカニズムを検討できるものと考えられる。さらに、ひび割れの発生防止の方法についても解析的に検討できるものと考えられる。

本稿は、粘弾塑性サスペンション要素法の改良方法について説明するとともに、自由端および固定端を模擬した解析モデルを用いて、収縮に伴う変形およびひび割れ発生挙動の実験に対する再現性について基礎的な検討を行ったものである。

2. 解析方法

ここでは、粘弾塑性サスペンション要素法[3]に対して、乾燥収縮を考慮できるように改良した点について述べる。

本解析は、コンクリートを粗骨材とモルタルの二相材料として、それぞれ節点とサスペンション要素でモデル化している。粗骨材の収縮量はモルタルに比較して少ないため、本稿では、モルタルに相当するサスペンション要素の収縮のみを考えて解析を行った。サスペンション要素の収縮により、どのように節点が移動するか考えると、図-1(1)に示すように、サスペンション要素の一方が固定壁の場合は、全ての収縮力が節点に働き、節点が壁の方向へ移動すると考えられる。一方、図-1(2)のように、サスペンション要素の両端部に節点がある場合には、単純に半分の収縮力がそれぞれの節点に働き、節点は中央に移動すると考えられる。

*1 名城大学理工学部建築学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 名城大学大学院理工学研究科建築学専攻修士課程 (正会員)

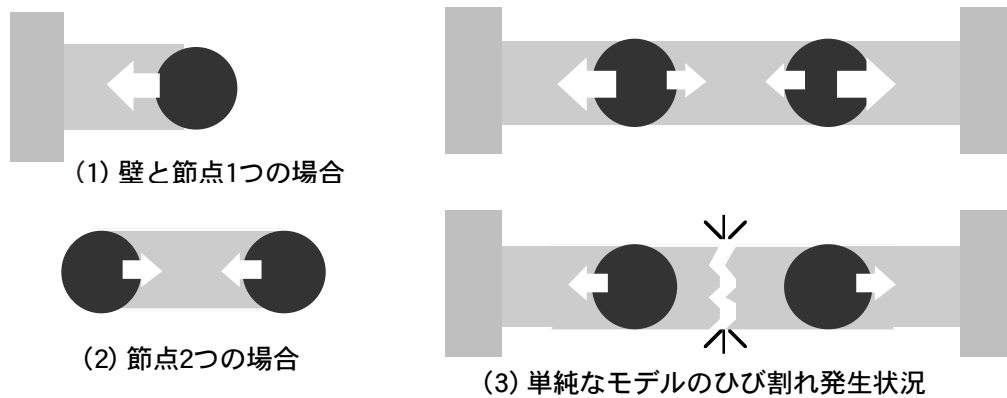


図-1 乾燥収縮に伴う節点の移動の考察

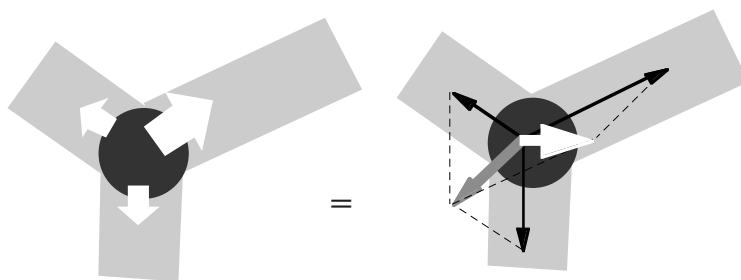


図-2 乾燥収縮に伴う節点の移動の合成

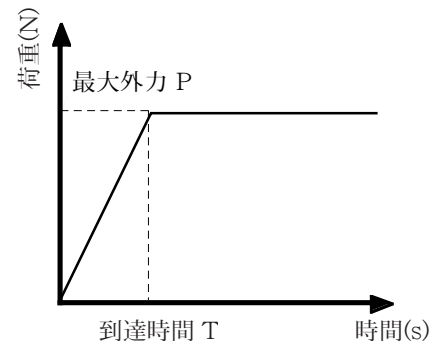


図-3 外力の与え方

これらをもとに図-1(3)のようなモデルを考えると、各サスペンション要素の収縮によりそれぞれ矢印の方向へ節点移動するが、最終的にはそれらの移動が合成されて移動方向が決定されることになる。実際の移動量は、サスペンション要素の長さ、断面積および収縮量によるが、図-1(3)のようにサスペンション要素が同一の場合、一端が壁のサスペンション要素の方が節点に生じる収縮量が大きいため、節点は両方とも壁の方に移動することになる。この変位量が大きくなれば、図に示すように最終的に中央にひび割れが発生すると考えられる。

また、図-2に示すように、要素がランダムな方向に構成されている場合も、各方向の収縮変位を合成すれば、その節点移動すべき方向および移動距離が計算でき、この変位が蓄積することで、最終的なコンクリート全体の収縮およびひび割れの発生につながるものと考えられる。

以上のように、サスペンション要素が収縮すると見なした場合、各節点につながっているサスペンション要素の収縮を合成した方向に節点移動すると考えることができる。本研究では、この移動を節点に生じさせることで収縮を模擬した。ただし、解析上、節点を直接変位させることは難しいため、節点に収縮力として外力を作用させることとした。

収縮力を与えるこの外力は、図-3に示すような形で節点に与えた。乾燥収縮ひずみの変化は指数関数で表現される場合が多いが、今回はもっとも単純な形として、

最大外力Pとなる到達時間Tまでは線形に増大し、その後一定となる形で表現した。これら2つの値が入力データとなる。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1[s]としている。よって、本研究のこの解析は、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る。通常の乾燥収縮は、クリープの影響を受け時間依存性があるが、乾燥収縮そのものの解析としては、短時間で進んでも問題ないと考え、今回の解析を行った。また、最大外力は、式(1)を用いて、サスペンション要素に生じる収縮による最大収縮ひずみ量が、 1000μ となるように計算して与えた。なお、式(1)における断面積は、節点の直径と解析上の奥行きから計算される値である。

$$\varepsilon = \frac{P/A}{E} \quad (1)$$

ここに、 ε :最大収縮ひずみ、P:最大外力(N)、

A:断面積(mm²)、E:弾性係数(N/mm²)

以上のような改良を加えることで、粘弾塑性サスペンション要素法による乾燥収縮、ひび割れ発生の追跡解析を行った。

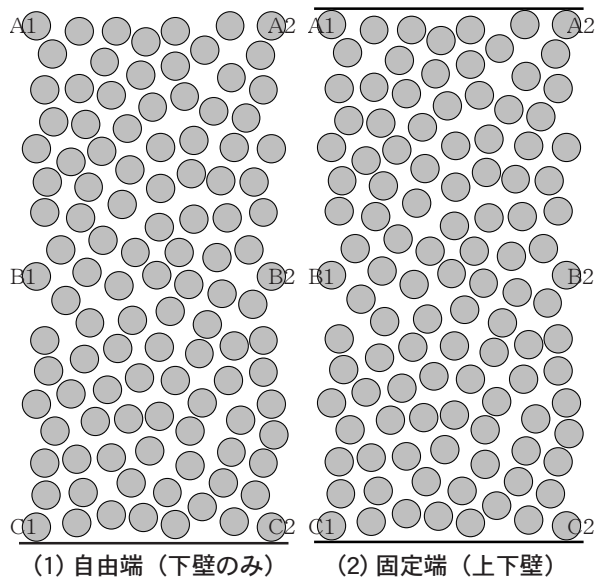


図-4 解析モデル

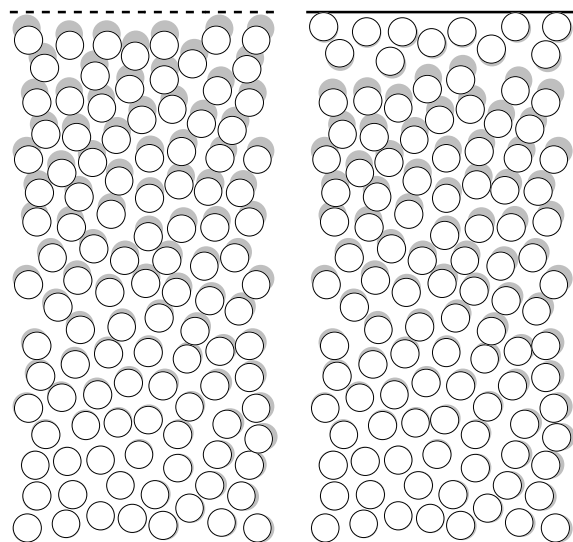


図-5 変形状況

3. 解析結果とその考察

図-4に、本解析に用いた解析モデルを示す。横100mm、高さ200mmで、節点の面積比率を約40%とした110個の節点を持つ110Bモデルである。同図に示すように、下壁のみを拘束した自由端を模擬した解析モデルと、上下に壁を配置した固定端を模擬した解析モデルの2つの解析モデルを使用する。これらの状況下で収縮を与えた場合の変形・破壊状況および節点の移動量を検討した。入力データは表-1に示すとおりであり、これまでの破壊解析に用いたものと同様である。また、純引張強度 F_t および最大ひずみ量 ϵ を変化させてその影響を検討した。

3.1 変形・破壊状況

図-5は、収縮によって生じた最終的な節点位置について、自由端および固定端の各解析モデルについて初期

表-1 解析の入力データ

$\tan\phi$	F_t	E	η
0.3	2.0	21.0	0.5

[Notes] ϕ : 内部摩擦角, F_t : 純引張強度 (MPa), E: 弾性係数 (GPa), η : 塑性粘度 (MPa·s)

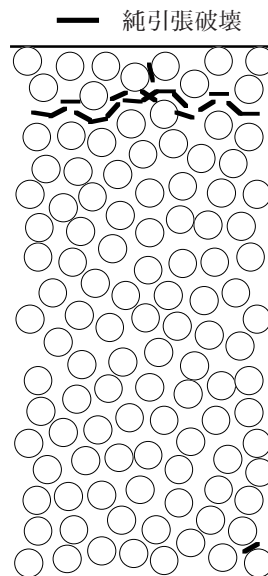


図-6 固定端の破壊状況

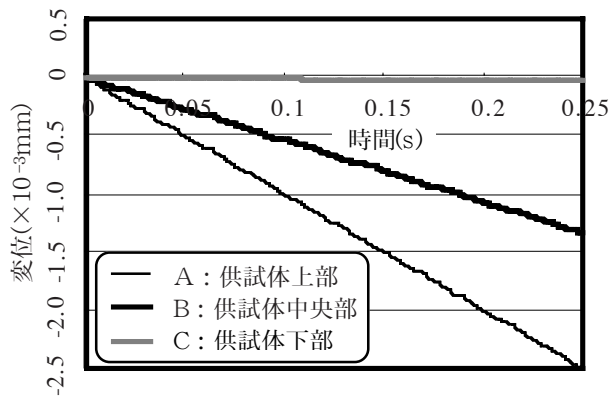
の節点位置の上に重ねて示したものである。ただし、実際の収縮量はごくわずかであり、ほとんど観察できないため、ここでは、節点の変位量を200倍して図示している。

まず、図-5(1)に示す自由端の解析結果から、収縮の考慮により解析モデルの下方向および中央方向に節点が移動していることがわかる。当然のことながら自由端ではサスペンション要素の破壊は生じず、下壁に向かって全体が収縮していく。一方、図-5(2)に示す固定端の解析結果から、上壁近辺の10個程度の節点はほとんど移動していないが、それ以外の節点は下方向および中央方向に移動していることがわかる。このような節点の移動により上壁近辺に生じている空間には、図-6に示すようなサスペンション要素の破壊が生じている。固定端においては、上下の壁に引っ張られるような形でひび割れが生じていることがわかる。

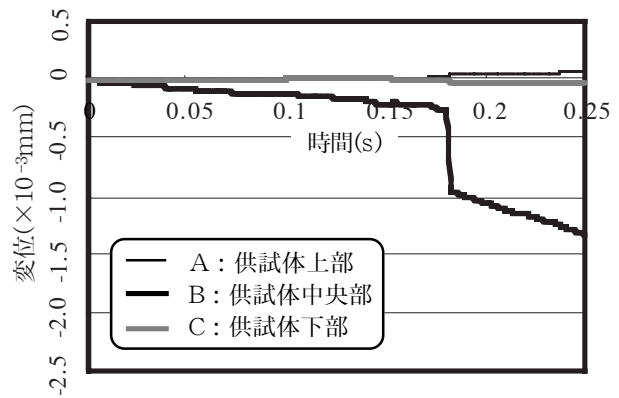
3.2 節点の移動状況

図-7は、図-4に示した各節点の移動量を、自由端および固定端の各解析モデルについて示したものである。なお、図-7のA,B,Cの値は、図-4に示したそれぞれの1,2の移動量がほとんど変わらなかったため、1,2の移動量を平均して示したものである。

図-7(1)は自由端の結果であり、この図からもわかるように、供試体上部のA位置の節点の移動がもっとも大きく、供試体中央部のB位置の節点はその半分程度、さ



(1) 自由端 (下壁のみ)



(2) 固定端 (上下壁)

図-7 節点の移動状況 (節点位置による相違)

らに供試体下部のC位置の節点ではほとんど移動していない。各サスペンション要素の収縮量は同一であるため、下壁を基準として各サスペンション要素の収縮が蓄積して、上部の節点の移動量をもっとも大きくなったものと考えられる。一方、図-7(2)に示す固定端の節点の移動量については、これと大きく異なる。供試体上部のA位置と下部のC位置の各節点はほとんど移動していない。これは上下壁によって固定を受けており、壁近傍の節点はあまり移動しないものと考えられる。また、中央部のB位置の節点のみが移動しているものの、その移動量は、自由端の結果に比べると小さい。これは、中央部の節点については、その上下にあるサスペンション要素の構成のバランスにより移動が生じるものの、両方から収縮を受けるために移動量は小さくなると思われる。さらに中央部のB位置の節点については、0.18秒程度の時に大きく移動量が増大している。これは、図-6に示すように、サスペンション要素の破壊つまりひび割れが

生じたためである。その後、移動量の変化割合が増加しており、これは、ひび割れが生じたために上のサスペンション要素による拘束がなくなり、自由端となったため、自由端と同じ割合で変位するようになったと考えられる。

3.3 最大収縮ひずみ量 ϵ の影響

図-8は、最大収縮ひずみ量を変化させた場合の自由端および固定端の解析モデルの変形状況を示したものである。最大収縮ひずみ量が多くなることは、各サスペンション要素の収縮量が大きくなることとであり、自由端および固定端のいずれの結果でも、最大収縮ひずみ量が多くなる $\epsilon = 2000 \mu$ では全体の変形が大きくなっている。一方、 $\epsilon = 500 \mu$ の結果では、変形が小さくなっている。図-8(1)に示すように、自由端では変形が増減するだけであるが、固定端では、図-8(2)に示すようにひび割れの発生の有無が異なる。 $\epsilon = 2000 \mu$ では1000

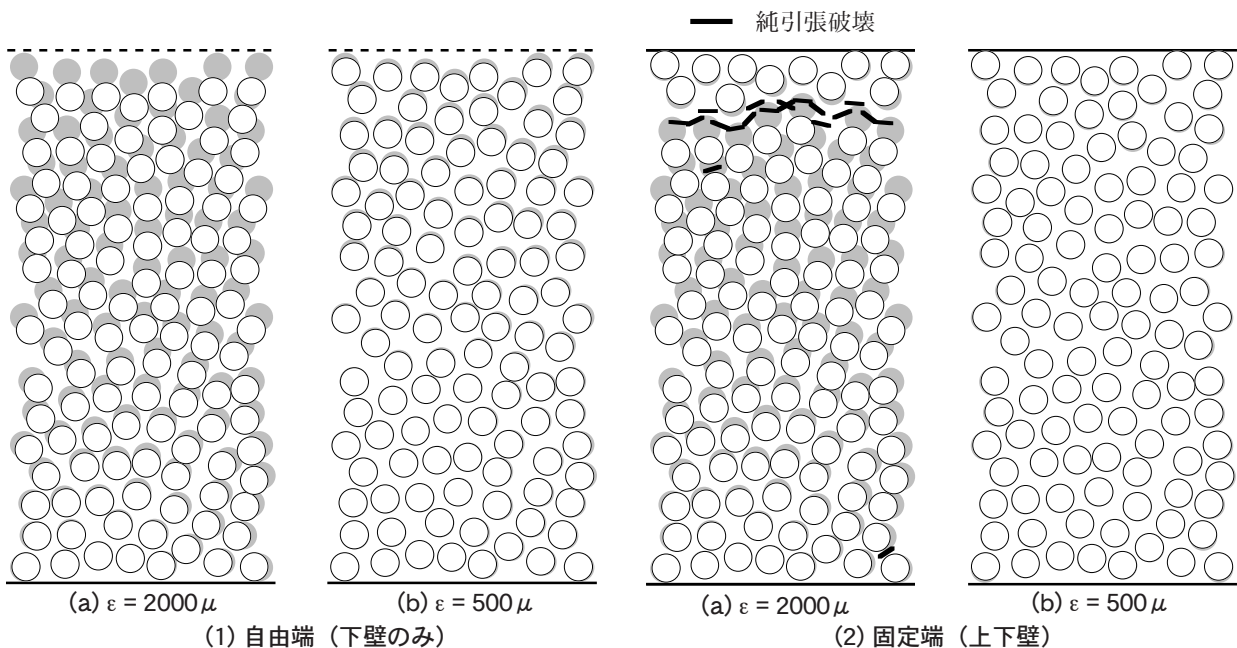
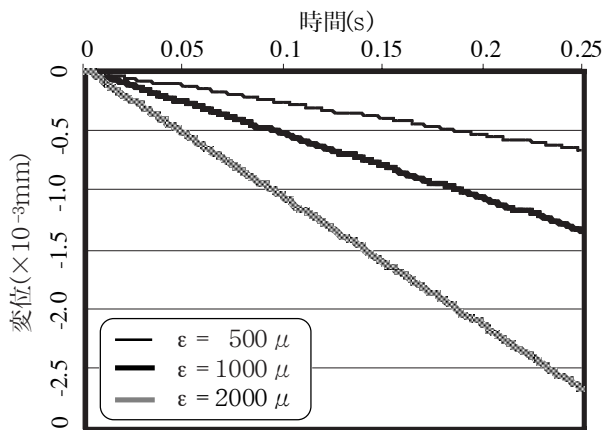
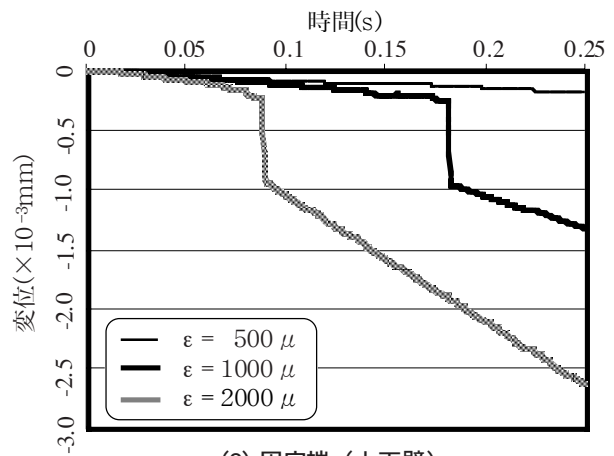


図-8 変形状況 (最大ひずみ量 ϵ の影響)



(1) 自由端 (下壁のみ)

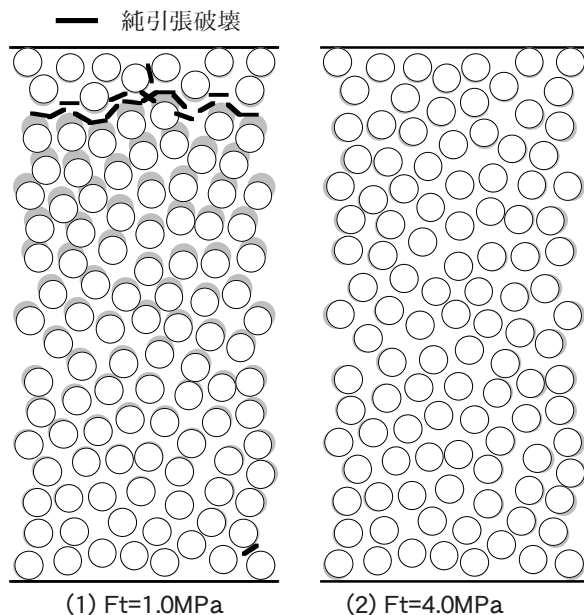


(2) 固定端 (上下壁)

図-9 節点の移動状況 (最大ひずみ量 ϵ の影響)

μ と同様の位置に空間ができており破壊が生じているものの、 500μ では、変形量も小さく破壊も生じない。収縮量が大きくなるとひび割れが生じ、少なくなるとひび割れが生じにくくなるのがわかる。これらのことは、節点の移動量を示した図-9でも明らかである。なお、この図では、比較しやすいように供試体中央部のB位置の節点の移動量のみを示している。自由端においては、最大収縮ひずみ量が大きくなると節点の移動量が大きくなっている。一方、固定端においても、自由端と同様に最大収縮ひずみ量が大きくなると節点の移動量が大きくなるが、これとともに、移動量が急変するひび割れの発生時間が早くなっている。逆に最大収縮ひずみ量が小さくなると、今回の解析時間の範囲では節点の移動量が急変せず、ひび割れが発生していないことがわかる。

これらの結果は、最大収縮ひずみ量が大きくなることで、ひび割れの発生が早くなること、収縮量を小さくすることでひび割れの発生を防止できることを意味してい



(1) $F_t = 1.0 \text{ MPa}$

(2) $F_t = 4.0 \text{ MPa}$

図-10 変形状況 (純引張強度 F_t の影響)

るといえる。

3.4 純引張強度 F_t の影響

純引張強度 F_t の影響は、自由端においては全く生じなかった。これは、サスペンション要素の収縮量が、与える最大収縮ひずみ量、つまり式(1)に示されるように、与える最大外力とサスペンション要素の弾性係数および断面積によって決定されるものであり、純引張強度はまったく影響しないためである。実際のコンクリートにおいては、強度の増大に伴い弾性係数も増大すると考えられ、その場合は計算による最大ひずみ量が減少することになり、収縮量も減少するものと考えられるが、今回のような解析方法では、純引張強度 F_t の影響は生じなかった。

一方、固定端においては純引張強度 F_t の影響が生じた。図-10は、純引張強度を変化させた場合の固定端の変形状況を示したものである。固定端の場合、ひび割れが生じる可能性があるため、その有無によって変形状況が大きく変わる。純引張強度が大きくなると、収縮量は同じであってもひび割れが生じなくなるため、 $F_t = 4.0 \text{ MPa}$ の場合には、変形状況はほぼ未破壊の状態と同様になる。一方、純引張強度が低い $F_t = 1.0 \text{ MPa}$ の場合、変形性状は図-5(2)に示した $F_t = 2.0 \text{ MPa}$ の場合と

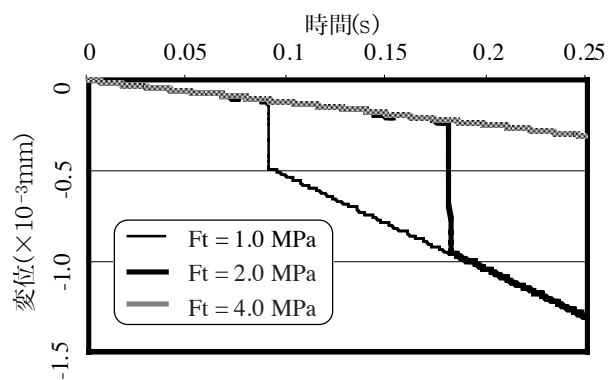


図-11 節点の移動状況 (純引張強度 F_t の影響)

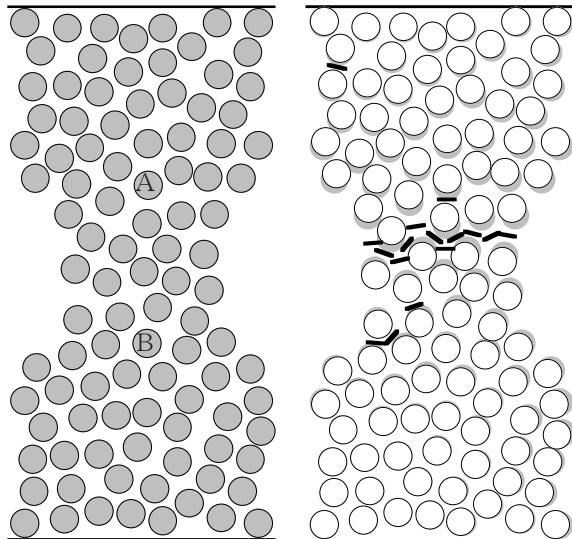


図-12 100Bモデル

図-13 変形・破壊状況

ほぼ同一となる。しかし、節点の移動量を示した図-11を見ると、 $F_t=1.0\text{MPa}$ の場合には移動量の急変する時間が早く、早期にひび割れが発生することがわかる。ただし、そのあとも収縮は進展するため、最終的な変形状況は $F_t=2\text{MPa}$ の場合と変わらないことになる。

これらの結果から、純引張強度 F_t の変化によって、拘束時のひび割れの有無および発生時期が変化することが再現できているといえる。

4. 中央部にくびれのある解析モデルによる検討

JIS A 1151に示されている拘束されたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法では、中央部にくびれを設けて断面積の減少部を設定して行われる方法が規定されている。これは、全断面積を同一とした場合には、端部の拘束部位の応力集中などにより端部でひび割れが発生することが多く、それを避けるための処置である。このような供試体を用いた場合の変形・破壊状況を解析的に再現するため、本解析手法を用いて、図-12に示すような中央部にくびれのある100Bモデルを作成し、解析を行った。図-13は、その解析結果である。この図に示すように、両端拘束により中央部にひび割れが生じており、実験で得られるような破壊状況を再現できている。また、図-14は図-12の節点A,Bの移動状況を示したものである。初期にはいずれも下方向に移動しているが、その収縮量に差が生じており、これがひび割れを生じさせるものと考えられる。ひび割れが生じると、移動量が急激に変化し、くびれ部よりも上部にある節点Aで上方向に、くびれ部よりも下部にある節点Bで下方向に、それぞれ移動していくことがわかる。また、三段階にわたって大きく移動量が変化しているが、これはひび割れが三段階にわたって進展したことを示している。

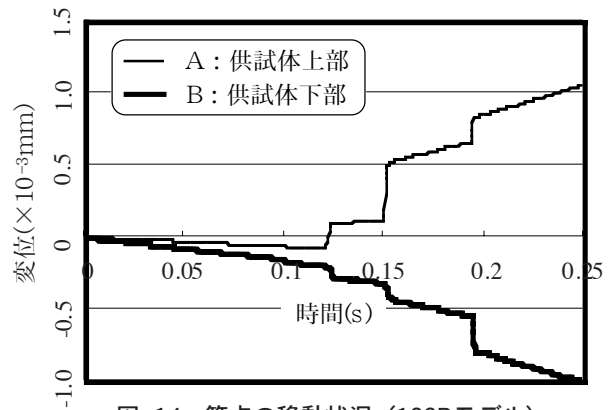


図-14 節点の移動状況 (100Bモデル)

5. まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法に対して、乾燥収縮の再現が可能となるように改良を加え、実験に対する再現性について検討した。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1)自由端および固定端の各解析モデルの変形・破壊状況の相違を再現できた。すなわち、自由端の解析モデルにおいては、下側の拘束壁方向に節点移動する収縮状況を再現でき、固定端の解析モデルにおいては、上下を拘束されることでひび割れが発生する破壊状況を再現できた。
- 2)最大収縮ひずみ量を変化させると、全体の収縮量が変化し、ひび割れの発生時期が変化することを再現できた。
- 3)純引張強度を変化させると、ひび割れの発生の有無および発生時期が変化することを再現できた。
- 4)中央部にくびれのある供試体について解析し、断面積の減少するくびれ部分にひび割れが発生することを確認した。

なお、本稿では、モルタルに相当するサスペンション要素の収縮のみを取り扱った。本解析では、粗骨材要素を導入することで、粗骨材の収縮も取り扱うことができるため、今後粗骨材の収縮も考慮した解析を行っていく予定である。

【引用文献】

- 1)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
- 2)江口清・寺西浩司：複合モデルを基盤としたコンクリートの乾燥収縮予測式, 日本建築学会構造系論文集, No.557, pp.15-22, 2002.7
- 3)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