

論文 コンクリート壁の開口部における収縮ひび割れに関する解析的研究

平岩 陸^{*1}・朴 相俊^{*2}

要旨：本研究では、コンクリート壁の開口部に発生する収縮ひび割れについて、粘弾塑性サスペンション要素法を用いてその再現を試みた。開口部を模した解析モデルによるシミュレーションを行うとともに、開口部のひび割れの低減対策として用いられる補強筋を模して拘束力を導入し、その効果を検討した。その結果、開口部の角から生じるひび割れを解析的に示すことができ、さらに、補強筋の付加によるひび割れの分散およびひび割れ幅の低減も解析的に示すことができた。

キーワード：開口部、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

コンクリートのひび割れ制御はコンクリート構造物を考える上で非常に重要である。構造耐力に与える影響はもちろんのこと、構造物の美観や防水に対しても大きな影響を与える。このため、ひび割れをどのように制御するかは古くからの課題^{1, 2)}である。ひび割れの原因は様々であり、施工不良もあれば、地震や不同沈下などの外的な要因、さらに乾燥収縮、水和熱、アルカリ骨材反応といったコンクリートの内的な要因も原因として挙げられる³⁾。

これらのうち、乾燥収縮については、コンクリートにおいては不可避ではあるものの、その収縮量を小さくしてひび割れを低減させることが検討されている。これはある意味ではコンクリートの物性を向上させることにもつながり、セメントや骨材の種類、混和材料などが収縮量に与える影響に関する研究^{4, 5)}が進められ、その実験結果が取りまとめられ、対策とされている。

しかし、コンクリートの収縮量が少なくても、周囲からの拘束が大きければ収縮によるひび割れは発生する。逆に、収縮量が大きいコンクリートであっても、周囲から拘束されず、自由に収縮できる状況下であればひび割れは発生しない。通常、コンクリート構造物における各部材が収縮した場合、周囲に拘束されることになり、コンクリート内部に引張力が生じてひび割れが発生する。このため、実際のコンクリート構造物において発生する乾燥収縮ひび割れを考える場合、各部材が周囲から受ける拘束状況との関連を検討する必要がある。つまり、コンクリートの乾燥収縮ひび割れを減少させるためには、コンクリートの物性値としての収縮量を減少させることも重要であるが、それとともに拘束状況や拘束力を低減させることも重要である。また、乾燥収縮によるひび割れが生じやすい部位として、コンクリート壁の開口部が挙げられる。これは、開口部の角部分から発生するひび

割れであり、収縮によって生じる応力が角部分に集中するためである。

筆者らはこれまでに、破壊解析手法として実績のある粘弾塑性サスペンション要素法⁶⁾に、収縮ひび割れを模擬できるように改良を加え、その再現性について検討してきた⁷⁾。本解析手法は、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た解析手法である。節点同士をつなぐサスペンション要素が変形・収縮することによって、コンクリート全体の変形・収縮を模擬している。また、サスペンション要素は引張強度を持つため、引張強度を超える応力が生じれば消失する。これはひび割れに相当するものである。このような非常に単純化されたモデルを用いており、ひび割れの発生も明快に出力できるところに本解析の利点がある。また、当然のことながら同様の解析モデルで破壊解析も行える点も特長の一つである。

既往の文献⁸⁾では、各種拘束下におけるひび割れ発生状況を検討し、その再現性について良好な結果を得ている。今回は、収縮ひび割れが発生しやすい部位であるコンクリート壁の開口部を対象として解析を行った。まず、開口部を模した解析モデルを作成してシミュレーションを行い、開口部からのひび割れの発生状況を検討した。その後、開口部におけるひび割れの低減対策として用いられる補強筋を模した拘束力を導入し、その効果を補強筋のない場合と比較・検討した。さらに、縦筋・横筋のみの場合と斜め筋のみの場合を比較して、補強筋位置の効果を検討した。

2. 解析方法

解析手法の詳細については、既往の文献⁶⁾を参照されたい。ここでは概略について説明するとともに、解析モデルおよび補強筋による拘束力の導入方法について述べる。

*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講師 博士（工学）（正会員）

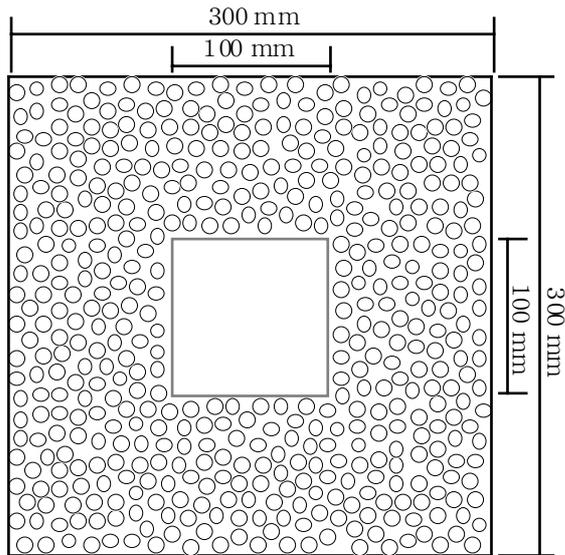


図-1 486Bモデル

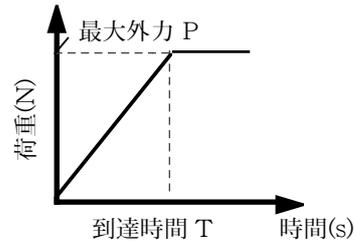


図-2 収縮用外力の与え方

表-1 サスペンション要素の入力データ

$\tan\phi$	F_t	E	η	ϵ	T
0.5	2.0	21.0	0.1	500	0.5

[Notes] $\tan\phi$: 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),
 ϵ : 最大ひずみ量 (μ), T : 最大ひずみ量に達するまでの時間 (s)

2.1 解析モデル

今回用いた解析モデルである486Bモデルを図-1に示す。これは縦300mm、横300mmの壁に100mm四方の開口部を開けた状況を模した解析モデルであり、486個の節点をランダムに並べたものである。この図では節点のみが示してあるが、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、そのサスペンション要素が収縮することにより、コンクリートの収縮を模擬している。なお、今回用いたこの解析モデルは、開口部を除いた試験体の面積に対して節点の面積比を約40%としたモデルであり、周囲は四方とも拘束する条件としている。

サスペンション要素の収縮の方法は、既往の文献⁷⁾と同様であり、図-2に示すように線形的にひずみを増大させ、到達時間 T に最大ひずみ量 ϵ に達するように各節点に外力を与えている。収縮を外力として与えているのは、解析上、節点を直接変位させることが難しいための処置である。また、解析時間の関係上、到達時間を0.5sとしている。つまり、この解析は、超高速収縮におけ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などは考慮できていない。これは、本解析手法ができる限り単純なモデル化によってコンクリートの収縮変形挙動をおおまかに再現することに主眼をおいているためである。サスペンション要素の入力データを表-1に示す。

2.2 補強筋による拘束力の考慮

前述の収縮解析に加えて、本稿ではひび割れ低減のために用いられる補強筋の影響を考察した。補強筋は、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。この弾塑性要素は、節点間のひずみが増大すると、そのひずみに応じて弾性力が節点間距離を拘束する

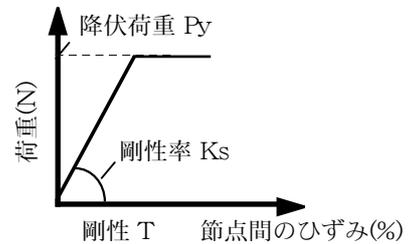


図-3 補強筋による拘束力の与え方

表-2 補強筋の入力データ

p	K_s	P_y
2.0	2100.0	3.0

[Notes] p : 鉄筋比(%),
 K_s : 剛性率 (kN),
 P_y : 降伏荷重 (kN)

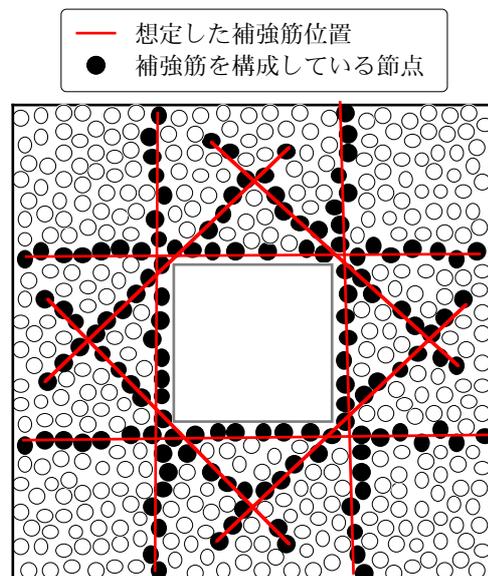


図-4 補強筋の配置

方向に働く要素である。この弾塑性要素に与える入力データは、図-3に示すように、剛性率（弾性係数一定）および降伏荷重である。これらの値の設定は以下のように行った。想定した補強筋は、弾性係数 $2.1 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、降伏値 300N/mm^2 である。補強筋の鉄筋比を2%と設定しており、これはサスペンション要素の断面積に対する鉄筋量の比として考えている。本解析は2次元解析であり、奥行き方向は50mmとしている。また、節点の直径は10mmであるため、サスペンション要素の断面積は 500mm^2 となる。これに対する鉄筋比を2%としているため、鉄筋の断面積は 10mm^2 となり、これを想定した補強筋の各値に乗ずることで剛性率および降伏荷重を求め、表-2に示すような入力データとした。また、図-4に補強筋の配置位置を示す。通常の補強筋は、図中に線で示したように開口部の角から縦方向、横方向、斜め方向に配置されるが、本解析の節点はランダムであるため、正確に直線とすることは不可能である。このため、補強筋上に近い節点同士をつなぐこととした。具体的には、図中に示す黒い節点について、補強筋として考える方向の隣同士を弾塑性要素で結んで補強筋を模擬した。なお、補強筋の長さについては文献⁹⁾を参考に、縦横筋においては開口部長さが分が両端に確保

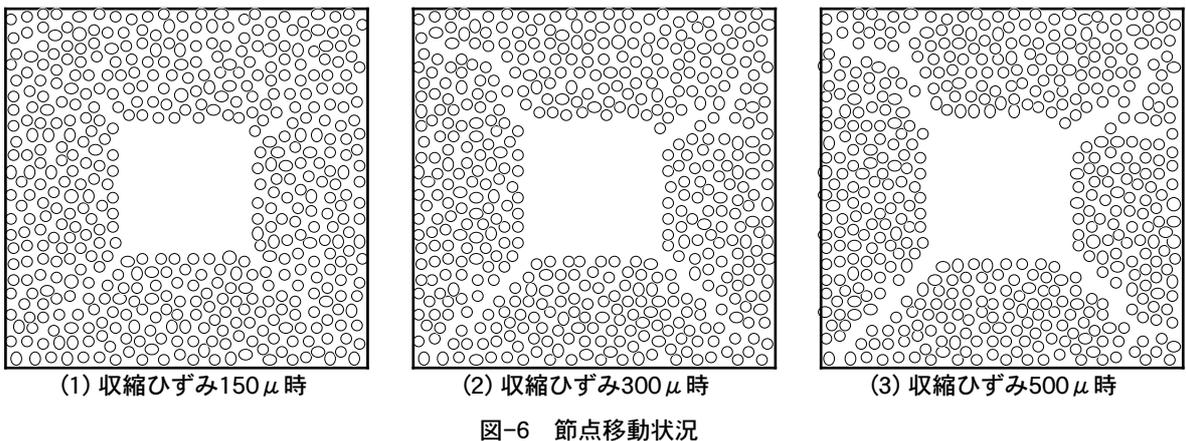
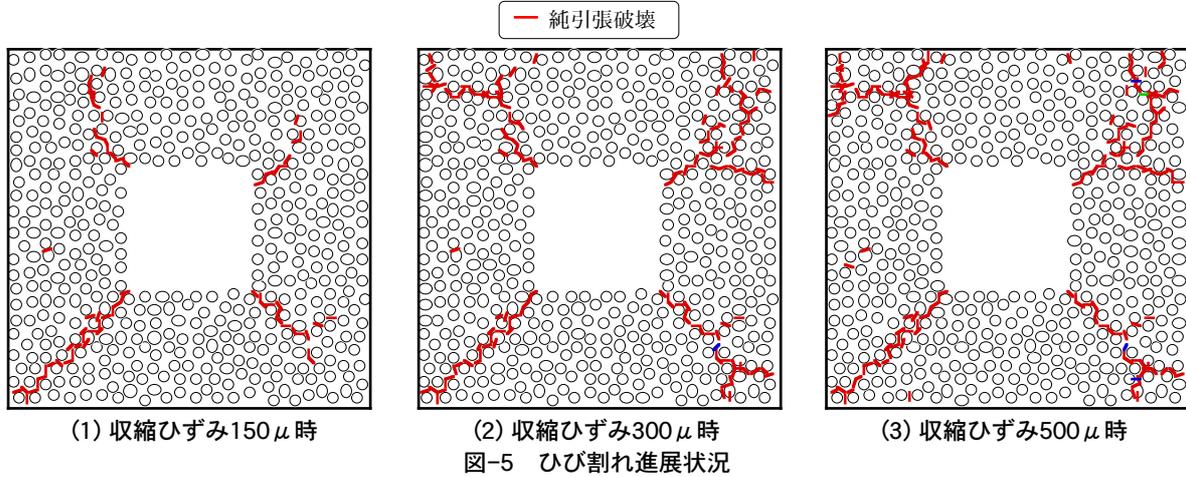
できるように、斜め筋においては長さが開口部長さ分の2倍となるようにした。

このようなモデルを用いて、補強筋の効果について検討するとともに、補強筋のない場合の結果と比較を行った。さらに、縦筋・横筋と斜め筋の補強効果について検討するために、補強筋を縦筋・横筋のみとした場合と、斜め筋のみとした場合について解析を行い、比較・検討した。

3. 解析結果

3.1 開口部における収縮ひび割れの発生

486Bモデルを用いた収縮解析結果であるひび割れの進展状況を図-5に示す。この図に示すように、開口部の角から生じたひび割れが、徐々に進展していく様子が示されていることがわかる。一部に開口部の角からずれて発生しているひび割れも見られるが、これは、角部分の節点間に比較して、この部分の節点間距離が小さく、かつ周囲の節点が密であり、生じる引張力が大きくなったためと考えられる。また、ひび割れが開口部から周囲に進展するに従って分岐し、分散しているように見られるが、これは開口部と周囲の壁との距離が近く、壁からの拘束が影響したものと考えられる。



このときの節点の移動状況を図-6に示す。実際の移動状況はごくわずかであり、ほぼ認識できない移動量であるため、この図では節点の変位を300倍に拡大して示している。図-5(1)の破壊状況図で示されるように、収縮ひずみが 150μ の時点で実際にはすでにひび割れが生じているが、図-6(1)からは、節点の変位が300倍であっても、開口部付近の変形はわずかに見られる程度である。しかし、収縮が進むに従って開口部付近の節点間の距離が徐々に大きくなり、最終的に大きなひび割れ幅となっていることがわかる。開口部の角からのひび割れの進展が、節点間の距離の拡大で示されているといえる。また、このように節点間の距離が拡大するひび割れ部分に対し、それ以外の部分、つまりひび割れの発生していない部分では、収縮により節点間の距離は縮まっていることもわかる。

このような節点の移動を詳細に検討するために、開口部付近の節点間のひずみの変化を出力した。図-7は、ひずみを出力した開口部付近の節点の位置を示したものであり、解析結果をもとに、ひび割れが発生した部位について検討している。図-8に、それぞれの位置の節点間のひずみの変化を示す。収縮ひずみが 100μ 以下で初期段階では、節点間のひずみの増大は少ない。しかし、

ある段階で一気に節点間のひずみが増大するとともに、それ以降のひずみの増加割合が大きくなることがわかる。一気に大きくひずみが増大するのは、収縮および周囲の拘束に伴うサスペンション要素の応力の増大によって、節点間の要素が消失した、つまりひび割れが生じたためと考えられる。その後に節点間のひずみの増加割合が大きくなるのもこのためであり、要素が消失することで節点が移動しやすくなったものと考えられる

3.2 補強筋の影響

(1) 縦筋、横筋、斜め筋全てを使用した場合

補強筋として、縦筋、横筋、斜め筋の全てを考慮した場合のひび割れの進展状況を図-9に示す。図-5の補強筋がない場合と比較すると、収縮ひずみが 150μ 時点でのひび割れ量が少なく、補強筋によりひび割れの発生が遅くなっていることがわかる。収縮ひずみが 300μ 時点では、ひび割れが進展しているものの、補強筋がない場合では開口部のそれぞれの角に生じるひび割れが1つであるのに対して、補強筋を考慮した場合は、その周囲にもひび割れが生じている。補強筋による拘束により、ひび割れの発生場所が分散したのと考えられる。最終状態である収縮ひずみ 500μ 時点では、開口部周りのひび割れは分散しているが、周囲の壁に近い部分のひび割

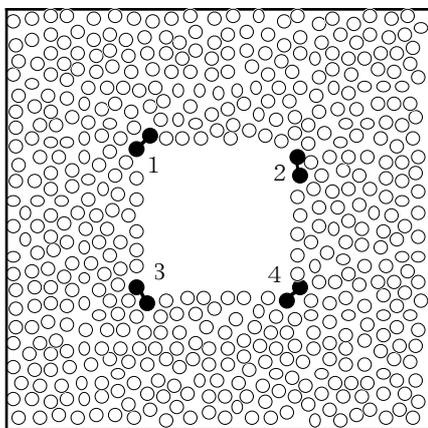


図-7 ひずみ測定位置

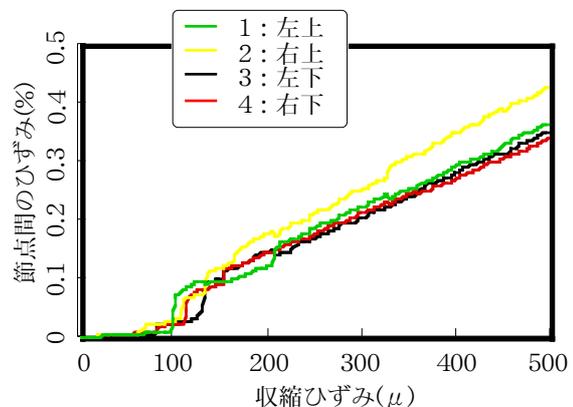


図-8 節点間のひずみの変化

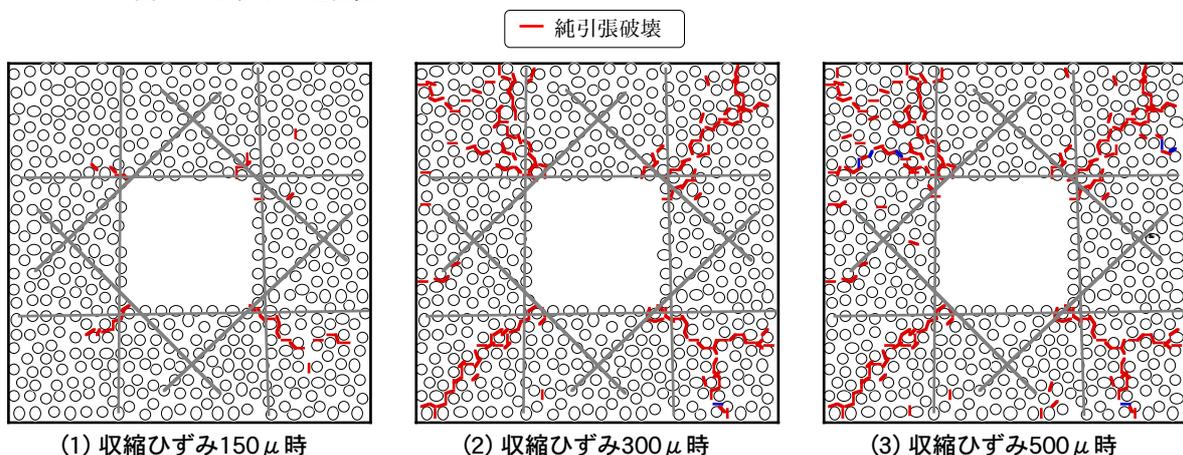


図-9 ひび割れ進展状況 (全ての補強筋あり)

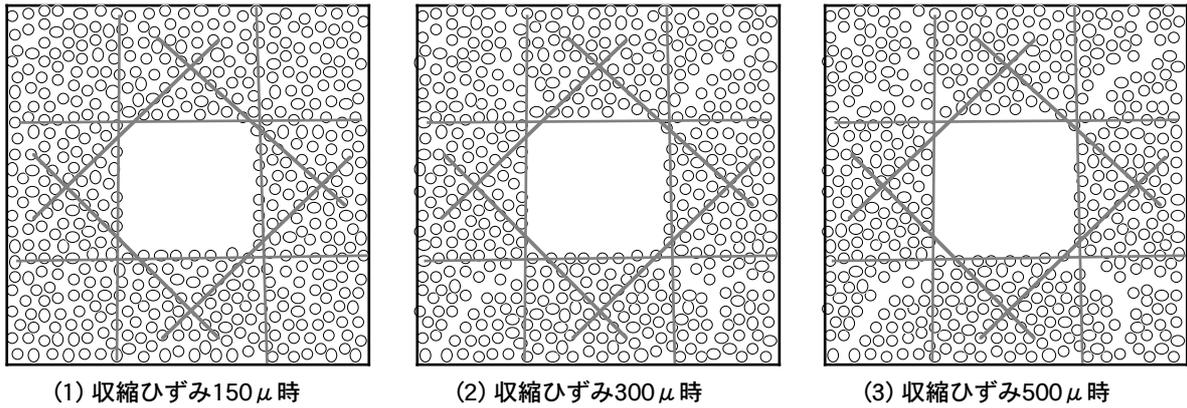


図-10 節点移動状況 (全ての補強筋あり)

れ状況は補強筋のない場合とそれほど変わらない。これは周囲の壁による拘束については、補強筋の有無によらず同条件であるためと考えられる。

補強筋を考慮した場合の節点の移動状況を図-10に示す。図-6の補強筋がない場合と比較すると、収縮ひずみ150 μm時点のひび割れはさらに認識できない状態となっており、これは補強筋による拘束効果によるものと考えられる。収縮ひずみ300 μmになるとひび割れがはっきりとしてくるが、全体的にひび割れ幅は小さくなっており、特に開口部付近のひび割れ幅が小さくなっていることがわかる。図-4に示したように、開口部付近には多くの補強筋が配置されており、その部分の変位が特に拘束されたものと考えられる。また、収縮ひずみ500 μmの最終状況においても、全体的にひび割れ幅が小さくなっているが、開口部から遠く、補強筋のない部分については、それほどひび割れ幅は小さくなっていない。実際のコンクリート壁では、補強筋以外の縦筋・横筋が入るため、このようなことにはならないと考えられるが、補強筋の効果が及ぶ範囲が限られていることを示していると考えられる。

図-11は、補強筋がない場合と同様の部位の、開口部

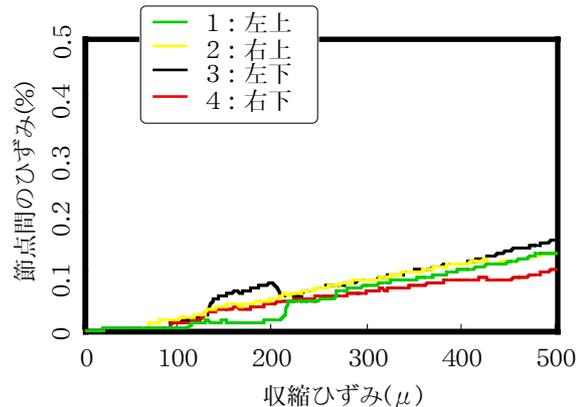


図-11 節点間のひずみの変化 (全ての補強筋あり)

の角の節点間のひずみの変化を示したものである。補強筋のない場合の図-7と比較すると、ひずみの増加が非常に少なくなっていることがわかる。この節点間は、いずれも補強筋による拘束力が直接生じる部分であるため、補強筋の効果が大きく出たものと考えられる。しかし、この節点間のひずみは小さくなる反面、その周囲の要素のひずみが大きくなると考えられ、図-9に示すように、この節点間の周囲の要素が破壊するようになり、ひび割れの分散効果が生じるものと考えられる。

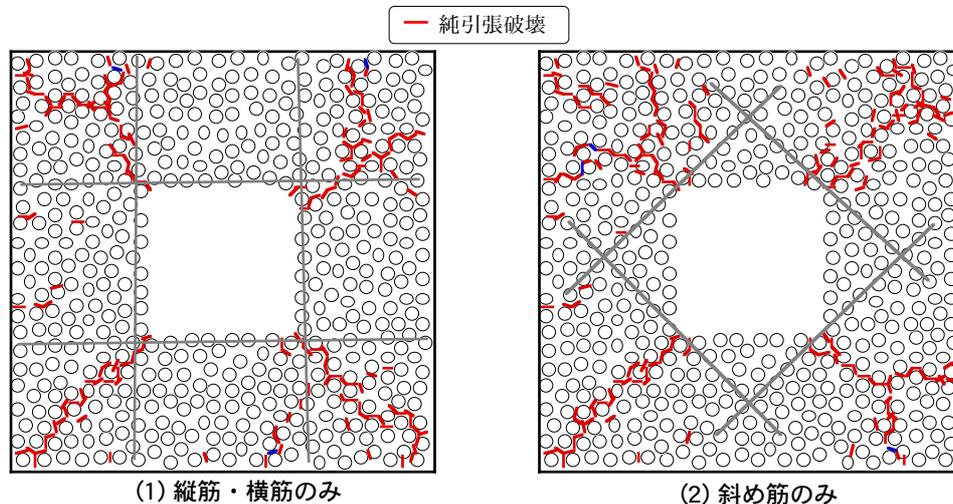


図-12 最終ひび割れ状態 (収縮ひずみ500 μ)

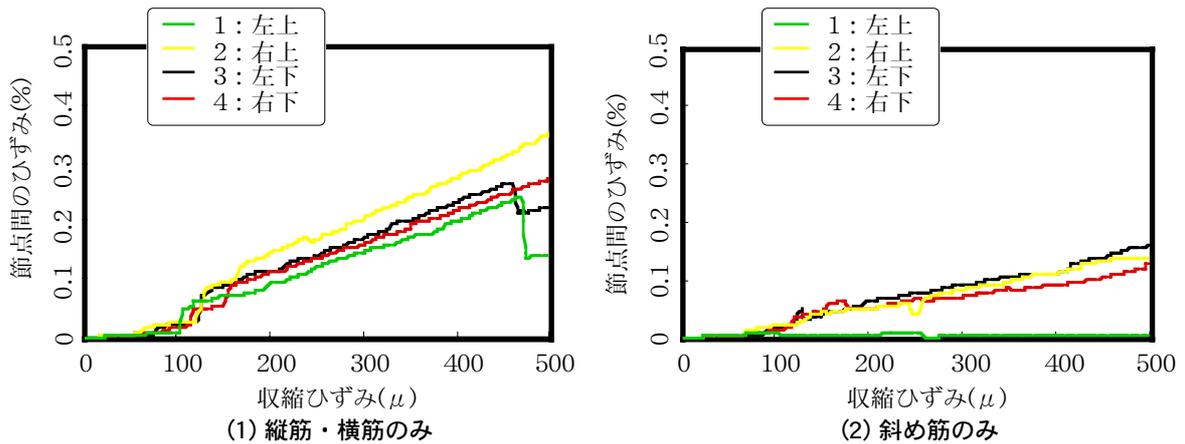


図-13 節点間のひずみの変化（補強筋による違い）

(2) 縦筋・横筋および斜め筋の効果の相違

開口部補強筋として用いられる縦筋・横筋と斜め筋の効果について検討するために、縦筋・横筋のみを補強筋として考慮したモデルと、斜め筋のみを考慮したモデルについて解析を行い、比較・検討した。

図-12は、それぞれのモデルにおいて収縮ひずみ500 μ に達した場合の最終ひび割れ状態を示したものである。縦筋・横筋のみの場合は、わずかに開口部付近のひび割れを分散させる働きがある点に、図-5(3)の補強筋なしの場合との差があるが、ほとんど補強筋なしと同様で、あまり効果が見られない。一方、斜め筋のみの場合は、開口部付近のひび割れを分散させる働きや、その後の分散状況などの点で、図-9(3)の全ての補強筋がある場合とほぼ変わらず、補強効果が高いと言える。これは、図-13に示す節点間のひずみの変化からも明らかである。この図によれば、縦筋・横筋のみの場合は、節点間のひずみの増加が大きい。ただし、図-8の補強筋なしの場合に比べればひずみ量は小さくなっているため、一定の効果はあるといえるがその効果は低いと考えられる。一方、斜め筋のみの場合は、節点間のひずみの増加が小さく、図-11の全ての補強筋がある場合とほとんど変わらないことがわかる。また、左上のひずみについては、節点間のひずみの増加が非常に小さくなっており、破壊も生じていないと考えられる。これは、補強筋によってひび割れ発生部分が変化したことを示している。

4.まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法を用いてコンクリート壁の開口部における収縮ひび割れの発生を解析的に再現することを試みた。また、補強筋を配置した場合の解析を行い、その効果を補強筋がない場合と比較・検討した。さらに補強筋の位置の影響を検討するために縦筋・横筋のみの場合と斜め筋のみの場合を比較した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1)コンクリート壁の開口部の角部から生じるひび割れの発生およびその進展を解析的に示すことができた。
 - 2)開口部に補強筋を考慮した場合、ひび割れが分散するとともに、ひび割れ幅が減少する現象を解析的に示すことができた。
 - 3)開口部補強筋の縦筋・横筋と斜め筋の補強効果を比較すると、斜め筋の方が補強効果が大きかった。
- 今後は、壁面および開口部の大きさの影響や、補強筋の鉄筋量や位置、長さ等の影響について詳細に検討するとともに、同条件での実験的な検討も行っていく予定である。

【参考文献】

- 1)日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説,2002.12
- 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)コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針,2009.3
- 4)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
- 5)NPO法人コンクリート技術支援機構：コンクリートの収縮ひび割れ研究委員会報告書,2011.5
- 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・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,コンクリート年次論文集,Vol.31, No.1, pp.401-406, 2010.7
- 8)平岩陸・朴相俊：収縮ひび割れの発生に及ぼす拘束状況の影響に関する解析的研究,コンクリート年次論文集,Vol.33, No.1, pp.490-495, 2012.7
- 9)日本建築学会：鉄筋コンクリート造配筋指針・同解説,2010.11