

論文 誘発目地によるひび割れ発生状況の変化に関する解析的研究

平岩 陸^{*1}・朴 相俊^{*2}

要旨：本研究では、コンクリートにひび割れ誘発目地を考慮した場合にひび割れの発生状況がどのように変化するか検討するため、粘弾塑性サスペンション要素法を用いて解析を行った。その結果、ひび割れ誘発目地の考慮によってひび割れが誘発目地部分に集中して発生する現象を再現できた。また、ひび割れ誘発目地の有無、間隔、目地深さおよび拘束状況がひび割れの発生状況に与える影響について、その変化をひび割れ数集中度およびひび割れ幅集中度から示した。

キーワード：誘発目地、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

コンクリート構造物に生じるひび割れの原因は様々である。その原因の1つとして乾燥収縮が挙げられる。これはコンクリートの性質上避けられない現象であるものの、それによりひび割れが生じれば、建物の耐久性や美観が大きく低下するため、対策が必要となる^{1,2)}。

もっとも根本的な対策は、コンクリートの収縮量を低減させる方法である。しかし、収縮量を0にすることは非常に困難であり、コストも上昇することになる。このため次善の対策として、収縮が生じてひび割れが生じるとしても、その影響をできるだけ小さくする方法が考えられている。鉄筋や繊維を付加することでひび割れを分散させてひび割れ幅を小さく抑え、有害なひび割れ幅に達しないようにする方法や、逆にひび割れをあらかじめ対策を施した部分に発生させる方法がある。

本研究で取り上げるひび割れ誘発目地による方法は、後者の方法であり、収縮量を直接低減させるものではないが、ひび割れ誘発目地と呼ばれる断面欠損部分を与えることで、ひび割れをこの部分に集中させるものである。同時に、ひび割れが発生した時の対策として誘発目地部分に水密性を高める処理をしておくことで、ひび割れによる漏水等の建物への影響を小さくすることができる。既往の文献³⁾では、断面欠損率は20%以上、誘発目地の間隔が3m以下であるとひび割れ集中度が70～80%以上を期待できるとされている。

筆者らは、これまで粘弾塑性サスペンション要素法(VEPSEM)を用いてコンクリートの収縮解析を行ってきた。本解析手法は非連続体モデルを用いており、連続体モデルに比べてひび割れの表現が簡潔で視覚的にわかりやすく、また境界条件や様々な要因を設定しやすいといった特徴がある。このような特徴を活かして、これまで拘束状況の影響については、固定端と自由端の比較、内部の骨材の影響、周囲の拘束状況の影響、開口部におけるひび割れ発生などを取り上げるとともに、補強筋として鉄筋や繊維の付加の影響を検討し、本解析手法の適用性を検討してきた^{4,5)}。

本研究では、収縮ひび割れ対策の1つとして採用されるひび割れ誘発目地を取り上げ、その影響を解析的に検討する。本解析での誘発目地は、その範囲のサスペンション要素の断面積を変化させることで模擬する。この断面積を増減させることで断面欠損率の変化を模擬でき、さらに誘発目地とする範囲および配置を変えることも可能である。このような誘発目地を模擬した部分を導入したことによるひび割れ発生状況の変化を検討する。

2. 解析方法

本研究で用いる解析手法の詳細については、既往の文献⁴⁾を参照されたい。ここでは、解析方法の概略と今回導入する目地部分について述べる。

図-1は、今回用いた888Bモデルである。これは、縦

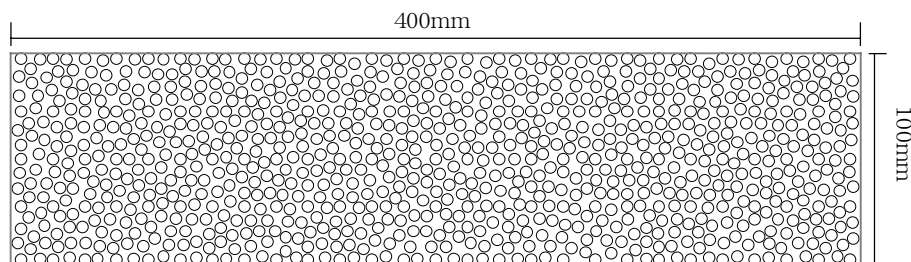


図-1 解析モデル：888Bモデル

*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）

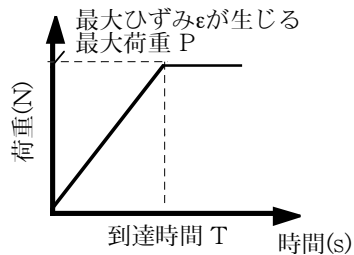


図-2 収縮用外力の与え方

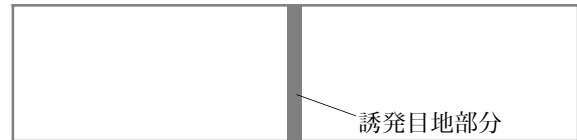
100mm、横400mmの範囲内に888個の節点を面積比40%でランダムに配置したモデルであり、乾燥収縮の測定に用いられる100×100×400mmの角柱供試体を2次元としたものを想定している。面積比40%は、コンクリートの粗骨材体積比が約40%であることによる。本解析手法では、節点とそれをつなぐサスペンション要素からなる非連続体モデルを用いており、この図は節点のみを示したものである。この節点間にモルタルに相当するサスペンション要素が構成される。本解析では、このサスペンション要素が収縮するものとして、両端の節点に収縮力として外力を作用させている。最終的にはこれらの合力として節点が移動することになり、全体の収縮現象が模擬できる。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 ϵ 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に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、通常収縮現象を検討する際に考慮すべきクリープ現象の影響を考慮できていない。また、乾燥収縮を考えた場合、乾燥勾配が生じるため位置によって発生するひずみ量が変化するが、本解析では一様としている。これらは、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。

ひび割れ誘発目地の導入については、本解析は2次元解析であるものの計算上奥行きを持つため、誘発目地を想定する範囲にあるサスペンション要素の奥行きを減少させることで断面欠損とし、誘発目地を模擬している。その配置については、図-3に示すように2通り設定した。誘発目地を1本中央に配置して2等分としたものと、それに加えて左右の部分等を等分し、4等分としたものである。これらのモデルを用いて、誘発目地の有無お

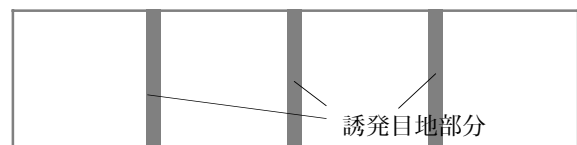
表-1 サスペンション要素の入力データ

$\tan\phi$	Ft	E	η	ϵ	T
0.1	2.0	21.0	5.0	1000	0.1

[Notes] $\tan\phi$: 内部摩擦角, Ft: 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)



(1) 中央目地

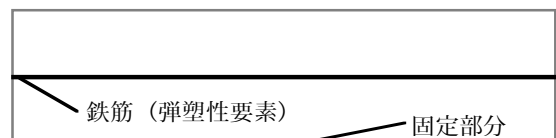


(2) 4等分目地

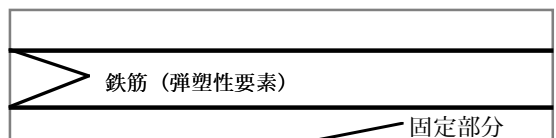
図-3 ひび割れ誘発目地配置

よび配置の影響を検討することとした。また、誘発目地範囲のサスペンション要素の奥行きについては、70%としたものを標準として解析を行うこととした。この場合、断面欠損率は30%となる。また、その奥行きを変更することで断面欠損率の変化を模擬できるため、比較として奥行きを90, 80, 60%としたものについても解析を行い、断面欠損率0% (目地なし) から40%まで変化した場合のひび割れ発生状況の変化についても検討した。

ひび割れを発生させる拘束条件として、図-4に示すように、鉄筋を模した弾塑性要素によって内部から拘束を与えるものを2種類と、コンクリート壁における基礎



(1) 鉄筋拘束1本



(2) 鉄筋拘束2本



(3) 下部拘束

図-4 拘束条件

梁による拘束を想定して下部に外部拘束を設定するものを設定した。これらにより、収縮ひび割れが分散して発生する状況を作り出した上で、ひび割れ誘発目地を加え、その影響を検討している。

内部から拘束する鉄筋を模した弾塑性要素は、図-5に示すように、節点間のひずみが增大すると、そのひずみに応じて弾性力が節点間距離を拘束する方向に働くものである。この弾塑性要素の入力データとして、弾性係数 E_s および降伏値 σ_s の2つが必要である。鉄筋は、SD295を想定して弾性係数 $E_s=2.1 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$ 、降伏値 $\sigma_s=300 \text{ N/mm}^2$ である。これに断面積を乗じて解析の入力データとする。通常、鉄筋とモルタル間にはすべりが生じるため、それを考慮して入力データを低減させる必要があるが、ここではそのままの値を用いた。このため、鉄筋による拘束力が大きめとなり、ひび割れ幅が抑制される可能性がある。断面積については、今回は1本の場合と、2本に分散させて配置させた場合の2種類を検討するため、合計を 1000 mm^2 の同一とし、1本の場合は 1000 mm^2 、2本の場合はそれぞれを 500 mm^2 として計算している。一方、下部拘束については、下部に設定した境界面と節点の間でできる要素において、軸方向とともにせん断方向にも粘弾性要素を持つようにしたものである。このことによって下部節点が境界面によって拘束される状況と見なすことができる。

本研究では、これまで述べたような解析手法を用いて、まず、鉄筋拘束を1本とした場合のひび割れ誘発目地の有無および配置がひび割れの発生状況に与える影響を検討した。その後、目地深さを変えた場合について検討するとともに、拘束条件を変えた場合について検討した。

3. 解析結果

3.1 ひび割れ誘発目地の影響

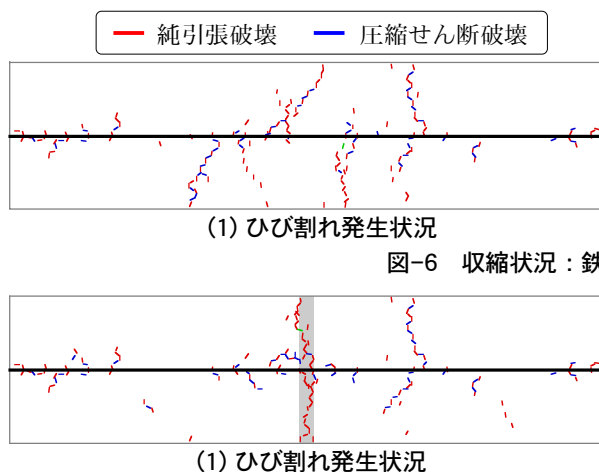


図-6 収縮状況：鉄筋拘束1本・誘発目地なし

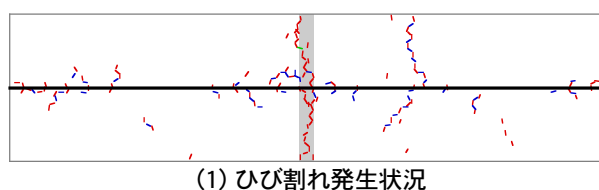


図-7 収縮状況：鉄筋拘束1本・中央目地（断面欠損率30%）

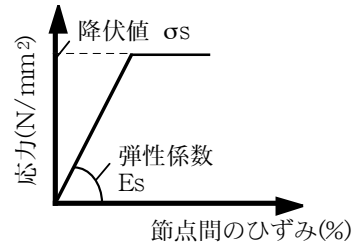


図-5 鉄筋による拘束力の与え方

(1) ひび割れ発生状況

図-6～8は、鉄筋拘束が1本の条件下の収縮状況をそれぞれ示したものである。サスペンション要素の破壊状況を示すひび割れ発生状況と、節点の移動量を200倍とした節点移動状況を示している。

図-6の誘発目地を考慮していない場合のひび割れは、鉄筋の拘束力により、ひび割れが分散して生じていることがわかる。節点移動状況を示した図においても、上部に2本、下部に2本の大きなひび割れが確認できる。このような内部鉄筋によるひび割れの分散は、既往の研究やこれまでの筆者らの解析⁹⁾においても観察されているものである。

これに対して、誘発目地を中央部に考慮した図-7では、考慮していない場合と比較して、中央の誘発目地近辺のひび割れが、誘発目地に吸収されるような形で集中的に発生していることがわかる。しかし、右側の部分にまだひび割れが発生している。図-7(2)の節点移動状況においても、誘発目地部分の中央のひび割れが大きく生じているのと同時に、誘発目地のない右側にもひび割れが生じているのがわかる。中央の1本の誘発目地だけでは全てのひび割れを集中させることができなかったと考えられる。一方、誘発目地の数を増やして4等分とした図-8においても鉄筋近傍に一部外れているひび割れも存在するが、より多くのひび割れが誘発目地に発生していることがわかる。これは、節点移動状況を示した図-8(2)においても明らかであり、中央目地の際に生じていた右側のひび割れも、それより右側に設定した誘発目

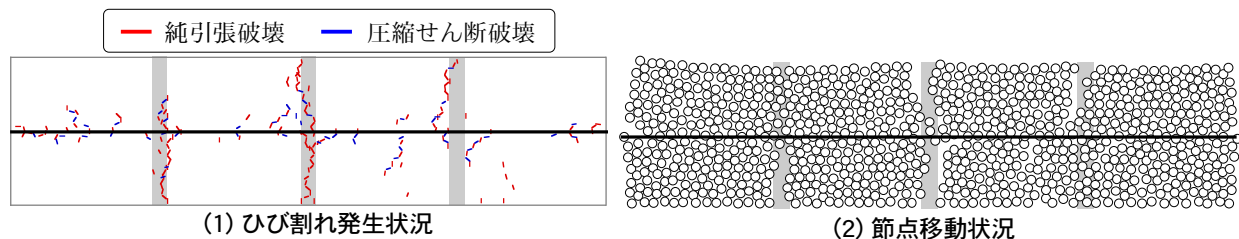


図-8 収縮状況：鉄筋拘束1本・4等分目地（断面欠損率30%）

地部分に移動しており、左側の目地においても新しいひび割れが発生している。このように、誘発目地の存在によりひび割れが集中し、さらにその間隔を小さくすることで、ひび割れが誘発目地へより集中する傾向は、これまでの実験的な検討でも見られるものである。

(2) ひび割れ集中度の変化

図-9は、誘発目地によるひび割れ発生状況の変化を数値化して比較するため、ひび割れ数集中度およびひび割れ幅集中度を示したものである。ひび割れ数集中度はひび割れの数に着目し、発生したひび割れの全本数に対して、誘発目地を模擬した部分に発生した本数の割合を示したものである。一方、ひび割れ幅集中度はひび割れの幅に着目した値である。ひび割れ幅、つまり解析上は節点間の移動距離となる値を計算し、その全合計に対して、誘発目地を模擬した部分におけるひび割れ幅の合計を割合として示したものである。

目地の配置にかかわらず、いずれの値も目地なしと比較して目地ありの場合に値が増大している。目地なしの値は、ひび割れが偶然誘発目地に入ったものの値であり、これに比較して目地ありの場合に値が増大しているということは、誘発目地の付加によりひび割れが集中したことを示している。

ひび割れ数集中度をみると、中央目地より4等分目地の方が大きいものの、中央目地では30%程度、4等分目地においても40%程度とそれほど大きくはない。これは、ひび割れ発生状況においてみられる鉄筋近辺のひび割れによるものと考えられる。これらは数は多いが、節点移動状況を見るとほとんど開口が観察できず、鉄筋から剥がれるようにして生じた微細なひび割れと考えられる。よって、ひび割れ数のみで検討するとこのようなひび割れの影響で値が小さくなるものと考えられる。このため、ひび割れの幅に着目した値として、ひび割れ幅集

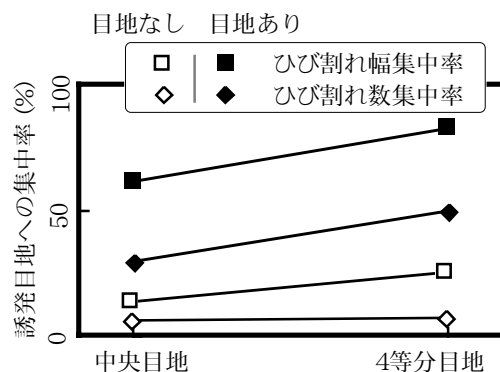


図-9 誘発目地への集中度
：目地の有無・間隔の影響

中率を計算している。

ひび割れ幅集中度をみると、ひび割れ数集中度に比較して値は大きく増加している。中央目地では60%程度であるものの、4等分目地とすると80%程度となっており、ひび割れの幅が目地に集中して発生している状況が数値的に示されている。また、中央目地より4等分目地の方が大きいのはひび割れ数集中度と同様であり、目地数が多く間隔が狭い方がひび割れが集中しやすいものと考えられる。

3.2 目地深さの影響

(1) ひび割れ発生状況

目地深さを変えた場合の解析結果の例として、図-10に断面欠損率を40%としたものの収縮状況を、図-11に断面欠損率を10%としたものの収縮状況を示す。断面欠損率を大きく、つまり目地深さを深くした図-10では、鉄筋近傍のひび割れを除いて、誘発目地へのひび割れの集中がより進んでいることがわかる。節点移動状況を見ても、誘発目地に開口が集中していることがわかる。一方、断面欠損を小さく、つまり目地深さを浅くした図-11では、中央下部および左下部では誘発目地にひび割れが生じているが、それ以外のひび割れは誘発目地を外して入っている。断面欠損率30%の図-8では、中

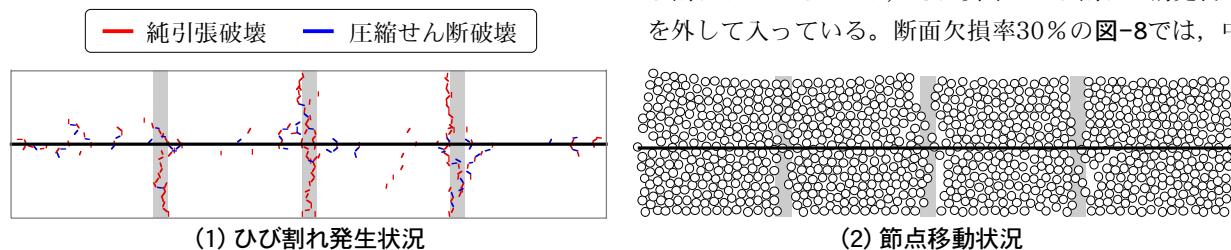
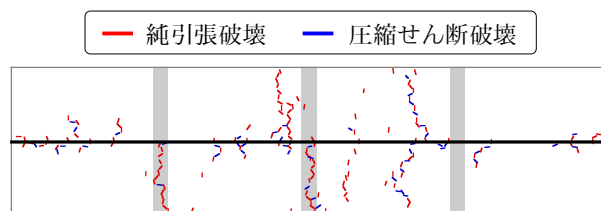
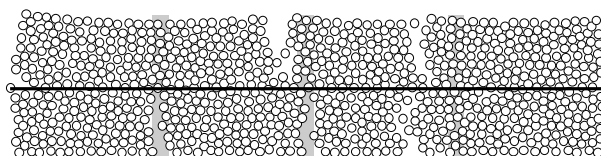


図-10 収縮状況：鉄筋拘束1本・断面欠損率40%（4等分目地）



(1) ひび割れ発生状況



(2) 節点移動状況

図-11 収縮状況：鉄筋拘束1本・断面欠損率10%（4等分目地）

中央部は上部下部ともに誘発目地にひび割れが生じていたのに対して、この図では、中央上部のひび割れは誘発目地を外れて入っている。また、右部分においては、断面欠損30%の図-8では上部で誘発目地に入っているが見られるが、この図では上部下部ともに全く外れており、誘発目地の役割を果たしていないことがわかる。これは、ひび割れが集中して発生するには断面欠損率が小さかったためと考えられる。このように、断面欠損率によって誘発目地へのひび割れの集中の効果が変化するの既往の研究でも見られるものである。

(2) ひび割れ集中率の変化

図-12は、目地深さに相当するサスペンション要素の断面欠損率を変えた場合の誘発目地へのひび割れの集中率を示したものである。断面欠損率が大きくなるに従って、ひび割れ数集中率もひび割れ幅集中率のいずれも大きくなることからわかる。ただし、断面欠損率10%では、目地なしの結果とあまり変わらない。目地なしの結果とほぼ変わらないということは、誘発目地の効果が小さいことを示している。一方、20%以上の断面欠損率では、断面欠損率が大きくなるに従って集中率が大きくなっており、誘発目地の断面欠損率は20%以上で効果が出てくるものと考えられる。また、中央目地から4等分目地になることで、ひび割れ数集中率もひび割れ幅集中率のいずれも大きくなることは図-9と同様であるものの、断面欠損率40%では中央目地の結果で頭打ちになっていることがわかる。これは、誘発目地の間隔も集

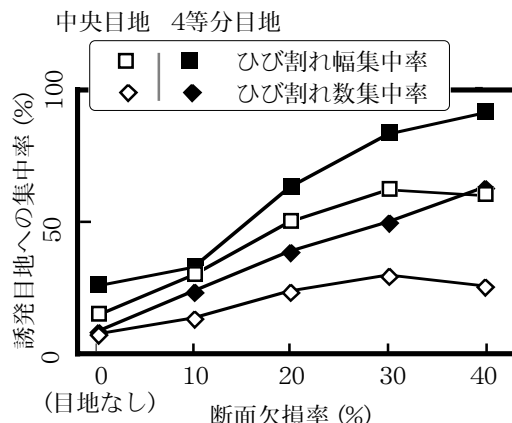


図-12 誘発目地への集中率：断面欠損率の影響

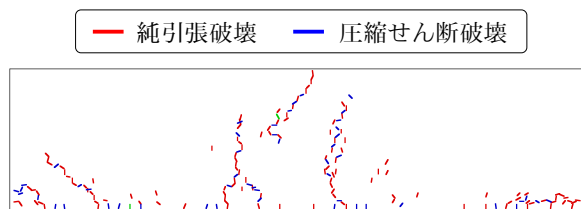
中率に影響し、間隔が大きい場合、断面欠損率を大きくしても限界があることを示していると考えられる。

3.3 拘束状況の影響

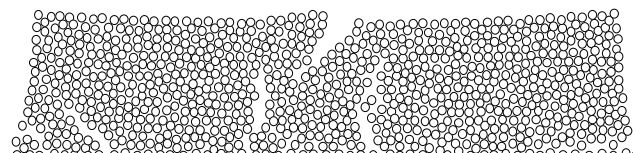
(1) ひび割れ発生状況

図-13,14は、下部拘束の条件における収縮状況を示したものである。図-13の誘発目地を考慮していない結果をみると、比較的中央近辺にひび割れが集まって生じるとともに、端部の下部に斜めのひび割れが生じていることがわかる。節点移動状況においても、中央に3本、端部下部にそれぞれ1本ひび割れが大きく開いている。これらは、この拘束状況は拘束力がそれほど大きくないため、ひび割れがあまり分散しない傾向があること、さらに拘束力が下部に偏っているために上部のみが縮んで下部にひび割れが生じやすくなったためと考えられる。

一方、4等分目地を考慮した場合の図-14では、図-13

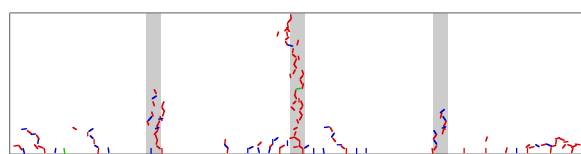


(1) ひび割れ発生状況

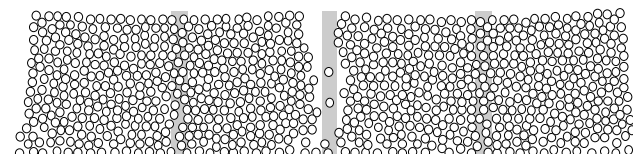


(2) 節点移動状況

図-13 収縮状況：下部拘束・誘発目地なし



(1) ひび割れ発生状況



(2) 節点移動状況

図-14 収縮状況：下部拘束・4等分目地（断面欠損率30%）

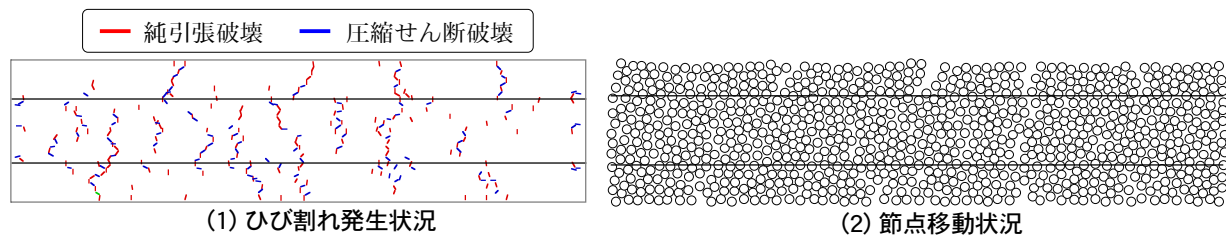


図-15 収縮状況：鉄筋拘束2本・誘発目地なし

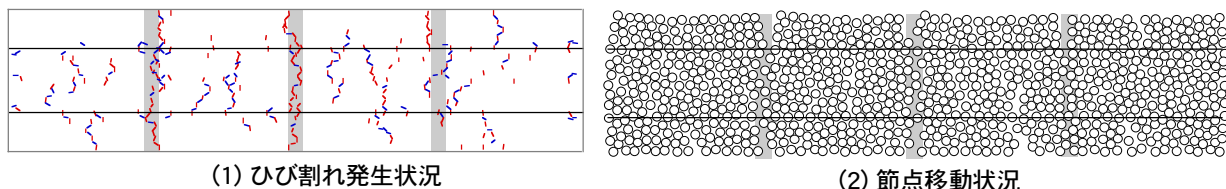


図-16 収縮状況：鉄筋拘束2本・4等分目地（断面欠損率30%）

において分散して発生していた中央部付近のひび割れが、中央部の誘発目地に集中して発生していることがわかる。また、左側の誘発目地にもひび割れが発生し、左側端部の斜め方向のひび割れが少なくなっていることがわかる。もともとそれほど分散しない拘束条件であることからひび割れが集中しやすかったと考えられる。

図-15,16は、鉄筋拘束を2本とした場合の収縮状況である。図-15の誘発目地を考慮していない結果をみると、この拘束状況は全体を広く拘束しているため、ひび割れが広く分散する結果であることがわかる。これに対して誘発目地を与えた図-16では、誘発目地にひび割れは集まって発生はしているものの、それ以外の部分にもまだひび割れは多く発生しており、このように鉄筋拘束によるひび割れ分散性が高いと、ひび割れ誘発目地の効果が低くなるものと考えられる。

(2) ひび割れ集中度の変化

図-17は、拘束状況を変えた場合の誘発目地へのひび割れの集中度を示したものである。この図からもわかるように、誘発目地への集中度は、いずれも下部拘束がもっとも高く、鉄筋拘束2本の場合には低くなっている。これは、同一の誘発目地を設定した場合であっても、拘束の状況によってひび割れの集中度が異なることを示している。これは、拘束状況によってひび割れの分散状況がそもそも異なるため、ひび割れ誘発目地の効果も変わることになることを示していると考えられる。

4. まとめ

本研究では、粘弾塑性サスペンション要素法において、ある範囲のサスペンション要素の断面積を小さくすることで、ひび割れ誘発目地を模擬し、これが収縮ひび割れ発生状況に与える影響を検討した。本解析で得られた知見は以下の通りである。

- 1) ひび割れ誘発目地の考慮によって、ひび割れが誘発目地部分に集中する現象が再現できた。

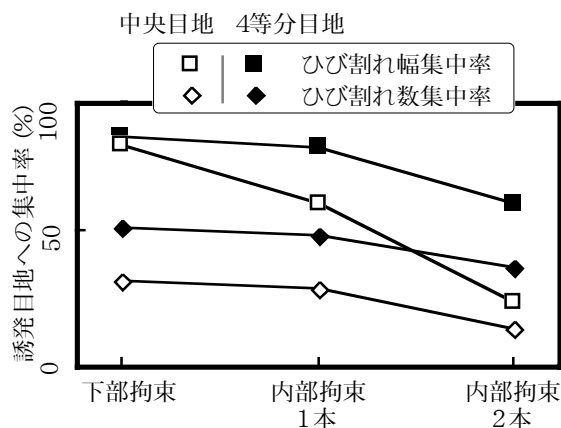


図-17 誘発目地への集中度：拘束条件の影響

- 2) ひび割れ誘発目地の間隔が小さくなると、誘発目地へのひび割れの集中度が多くなる。また、ひび割れ誘発目地の断面欠損率が大きくなると誘発目地へのひび割れの集中度が多くなる。これらの傾向をひび割れ数集中度およびひび割れ幅集中度から示した。
- 3) 拘束状況によってひび割れの分散状況が異なれば、同一の誘発目地を設置しても誘発目地へのひび割れの集中度も異なる。

【参考文献】

- 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) コンクリートの収縮問題検討委員会報告書, コンクリート工学協会, 2010.3
- 3) 大谷博：鉄筋コンクリート造外壁のひび割れ対策における収縮目地の効果に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第392号, pp.18-25, 1988.10
- 4) 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
- 5) 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