

論文 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

平岩 陸^{*1}・朴 相俊^{*2}

要旨：本研究は，コンクリートの収縮ひび割れの発生を解析的に再現する手法として修正を加えた粘弾塑性サスペンション要素法を用いて，境界面における拘束の有無や拘束力，さらに拘束境界面の配置が，収縮に伴う変形状況および収縮ひび割れの発生に及ぼす影響について検討したものである。その結果，本解析によって，様々な拘束状況において，収縮が原因と推定されるひび割れの発生状況を解析的に再現でき，今後様々な条件下の解析ができる可能性があることがわかった。

キーワード：収縮，ひび割れ，拘束状況，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に大きな影響を及ぼす。このため，その防止は古くからコンクリートの課題として認識されており，種々の指針¹⁻³が発行されている。例えば部材への影響が少ないひび割れ幅として，鋼材腐食の観点からは0.2mm，防水性・水密性の観点からは0.05mmなどが示されている³。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挙げられる。

これらのうち，特に近年では，コンクリートにおいては不可避ではあるものの，乾燥収縮について，その収縮率を小さくしてひび割れを低減させることが対策に盛り込まれている。この具体的な数値として，土木学会のコンクリート標準示方書・設計編(2007)には設計値として 1200×10^{-6} が，日本建築学会のJASS5 (2009)には上限値として 8×10^{-4} が示されている。このため，コンクリートの収縮率を低減させる方法が様々に検討され，セメントや骨材，混和材料などが収縮率に与える影響もしくは効果に関する研究が進められ，その実験結果が取りまとめられている^{4,5}。

ただし，コンクリートの乾燥収縮ひび割れが発生するのは，コンクリート構造物またはコンクリート部材が収縮し，かつ周囲に拘束される状況下においてであり，これによってコンクリート内部に引張力が生じるためである。逆に言えば，コンクリートが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。つまり，実際のコンクリート構造物において乾燥収縮ひび割れを考える場合，コンクリートの周囲の拘束状況との関連を検討する必要がある。このことから考えれば，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

ることが重要なのもちろんであるが，それと並んでコンクリートの拘束状況や拘束力を制御・低減させることが重要である。

筆者らはこれまで，コンクリートの収縮ひび割れの発生を解析的に再現する手法として，従来は硬化コンクリートの破壊解析⁶に用いてきた粘弾塑性サスペンション要素法に修正を加えて収縮解析を行ってきた。解析によってひび割れ発生状況を再現できれば，その防止策の効果も検討できるなど，その利点は大きいと考えられ，これまでに解析方法の再現性を検討するとともに骨材の影響についても検討を行い，良好な結果を得てきた^{7,8}。本稿は，本解析手法を用いて，境界面における拘束の有無や拘束力，さらに境界面の拘束状況などが，収縮に伴う変形状況および収縮ひび割れの発生に及ぼす影響について検討し，解析手法の再現性を検討したものである。

2. 解析方法・解析モデル

解析手法の詳細については，既往の文献⁷で述べている。本解析手法は節点と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。ここでは主として今回の検討要因とした境界面による拘束状況の変化について述べる。

境界面による拘束状況は，境界面との間に作成されるサスペンション要素のレオロジーモデルによって区別さ

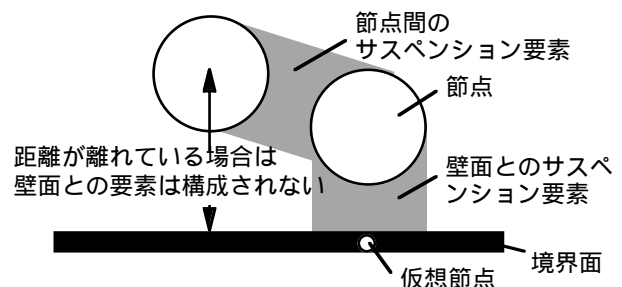
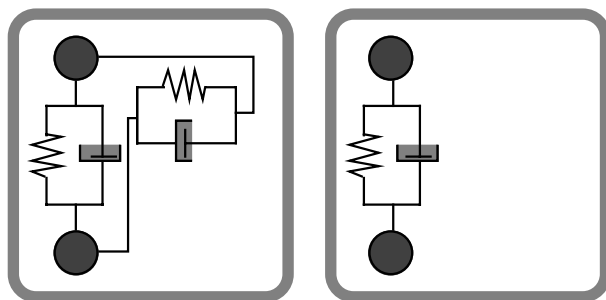


図-1 節点と壁面との要素の構成

*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)

れる。境界面に対してサスペンション要素が作成されるのは、図-1に示すように節点と境界面との距離がある



(1) 拘束モデル (2) ローラーモデル

図-2 壁との要素のレオロジーモデル

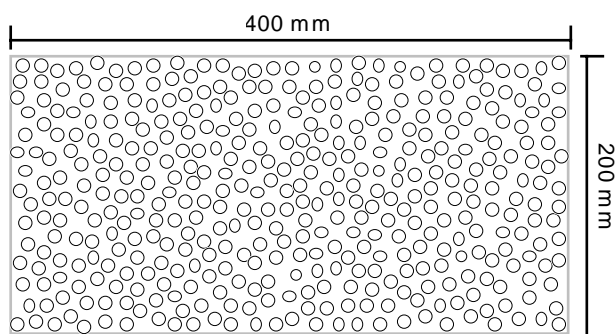
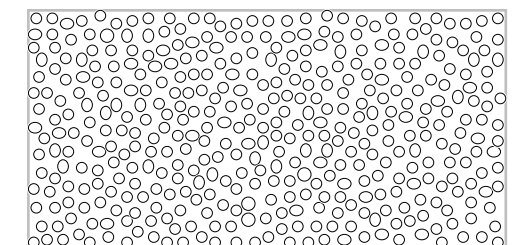
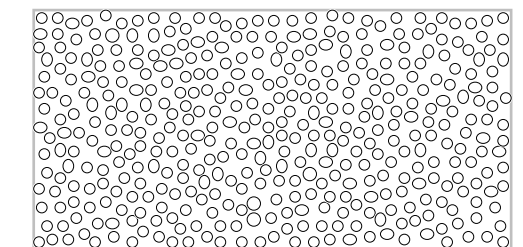


図-3 408Bモデル



(1) 下面拘束あり



(2) 下面拘束なし (ローラー)

図-4 解析モデル (拘束の有無)

距離以下の場合であり、節点と垂直となるように仮想節点が境界面上に作成され、節点間と同様に節点とのサスペンション要素が作成される。この境界面との要素について、図-2に示すように軸方向、せん断方向ともに粘弾性要素を持つ場合と、軸方向には粘弾性要素を持つものの、せん断方向には要素を持たない場合の2種類の設定ができる。前者は、境界面により収縮が拘束される状況と考えることができ、後者は、境界面が収縮を拘束せず、ローラーのように境界面に沿って自由に収縮ができる状況と考えることができる。本解析では、これら拘束とローラーの2種類の設定を、それぞれ、境界面による拘束がある場合とない場合として取扱い、拘束の有無がひび割れ発生状況に与える影響を検討する。また、せん断方向の粘弾性要素の弾性係数を変化させることは、境界面による拘束力が変化することとみなすことができるため、この影響についても検討する。さらに、境界面そのものはいずれの方向にも設定が可能であり、その数も任意に設定できるため、境界面配置を変化させ、ひび割れ発生状況がどのように変化するか検討した。

図-3は、本解析において用いた408Bモデルである。この図では、図-1に示した概念図と異なり、節点のみを示し、サスペンション要素を示していない。この解析モデルは、縦横比を1:2とし、200×400mmの試験体の面積に対する節点の面積の比率を40%としたモデルである。このモデルにおいて、まず図-4に示すように下部に境界面を設定し、拘束のありなしによる比較および拘束力の変化による比較を行った。次に、境界面を左右、上部に設定した場合にどのようなひび割れが発生するか検討した。境界面の位置を変えた解析モデルについては、解析結果および考察において示す。

なお、収縮の考慮は既往の文献と同様であり、解析上、節点を直接変位させることが難しいため、各節点に外力を作用させることで与えている。外力は、図-5に示すような形で節点に与えている。最大外力Pとそれに到達するまでの時間Tが入力データであり、最大外力に達したあとは一定の荷重を保持する。なお、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1.0sとし、その時間までの解析を行った。よって、本

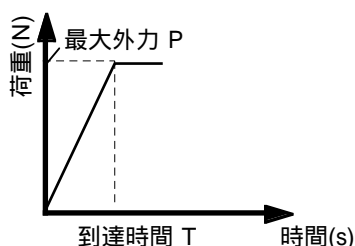


図-5 外力の与え方

表-1 解析の入力データ

	$\tan\phi$	Ft	E	η	ϵ	T
モルタル要素	0.5	2.0	21.0	0.1	1000	1.0

[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)

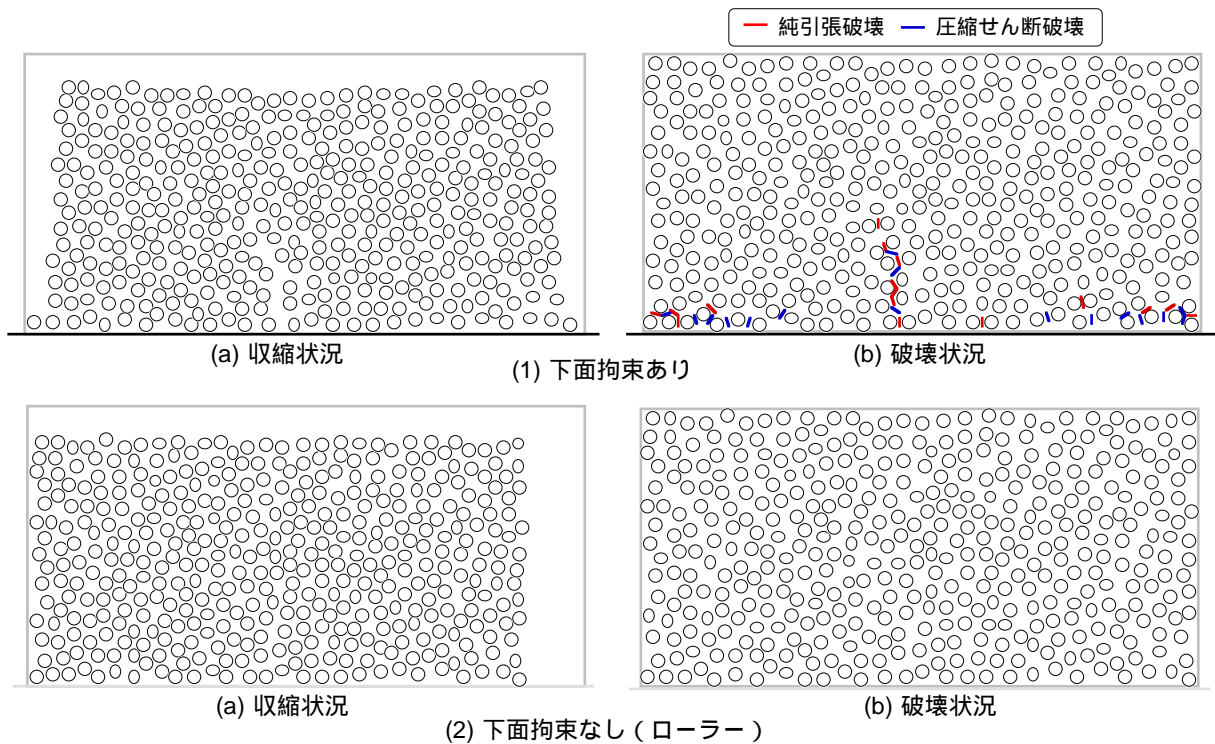


図-6 収縮状況・破壊状況（拘束の有無による比較）

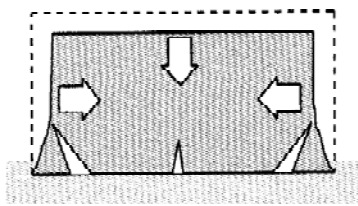


図-7 一辺拘束の場合のひび割れ発生予想図³⁾

研究のこの解析は、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。今回は、最大ひずみ量に達する時間Tに最大ひずみ量 = 1000 μ に達するように線形的にひずみが増大する形で与えている。これらの入力データを表-1に示す。

3. 解析結果および考察

3.1 拘束の有無による影響

図-6は、下部の境界面の拘束の有無が収縮状況および破壊状況に与える影響を示したものである。収縮状況をわかりやすくするために節点の変位については200倍にして示している。なお、ひび割れについては、軸方向の引張で破壊された純引張破壊と、軸方向に圧縮を受けつつせん断力を受け破壊線を越えた圧縮せん断破壊の2種類がある。図-6(1)に示すように、拘束がある場合、拘束される下部の節点位置はほぼ変わらず、上部にかけて細くなる台形のような形で収縮しており、中央部および左右下部にひび割れが生じていることがわかる。一辺の拘束によって生じるひび割れは図-7のように予想され、解析結果のひび割れは下部の斜めのひび割れの角度が小さい面はあるが、このようなひび割れ発生予想を表

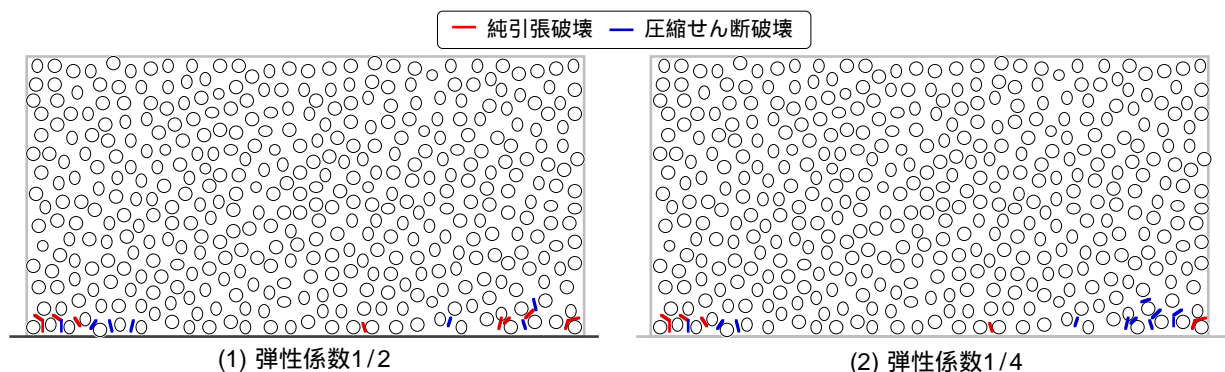


図-8 破壊状況（拘束力の変化による比較）

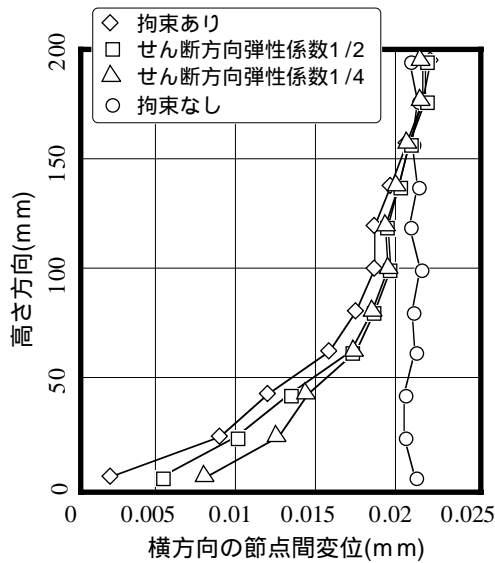
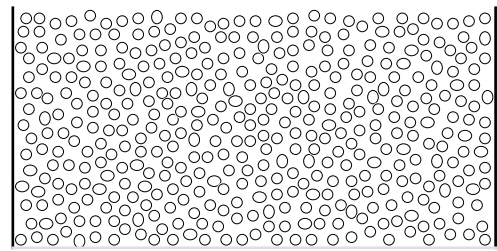


図-9 供試体の横方向の節点間変位

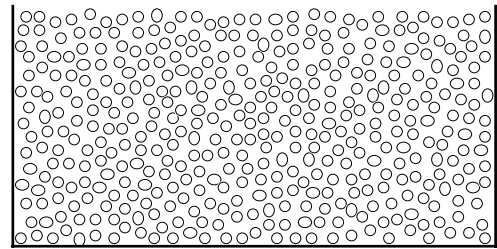
現できていると考えられる。図-6(2)に示すように、拘束がない場合は全体が均一に収縮しており、ひび割れも全く発生していないことがわかる。以上のように、本解析手法で下部の拘束の有無により収縮状況および破壊状況が変化することが再現できる。なお、拘束がない場合の収縮状況は、左下に移動するような形で収縮しているが、これは下部全体をローラー扱いにすると解析上、解析モデル全体が移動してしまうために、解析モデルの固定用に左下の一節点のみを下部境界との固定要素としたためである。

3.2 拘束力の変化による影響

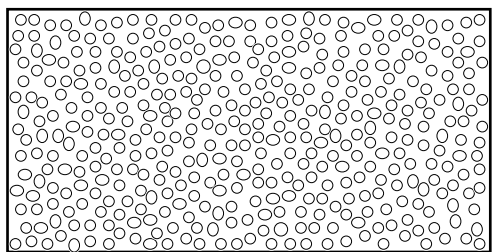
図-8は、拘束力の変化による影響を検討するために、境界面とのサスペンション要素について、せん断方向の弾性係数を1/2,1/4と低下させた場合の破壊状況を示したものである。収縮状況については、拘束がある図-6(1)とほとんど変わらなかったため、ここでは示さなかった。破壊状況については、図-8に示したとおり、せん断弾性係数1/2と1/4ではそれほど差はないものの、図-6(1)と比較すれば、中央のひび割れが生じなくなっていることがわかる。これは拘束力の低下により



(1) 左右拘束(下はローラー)



(2) 三方拘束



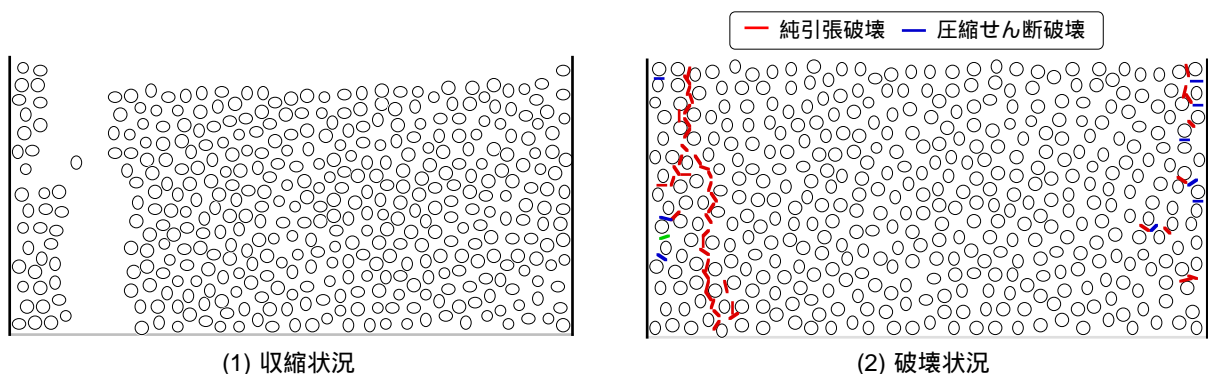
(3) 四周拘束

図-10 解析モデル(拘束境界面の配置の影響)

下部の変位が生じやすくなったためであり、このことは、高さ方向別に供試体左右端部の節点間の変位、つまり供試体の横方向の収縮状況を示した図-9からも明らかである。拘束がない場合には、供試体上下でほとんど変位の差がなく収縮しているが、拘束がある場合には、下部の変位が少なくなっていることがわかる。さらに、下部の拘束力を1/2,1/4と低下させることにより下部の変位は大きくなっており、このためひび割れが生じにくくなったものと言える。

3.3 拘束境界面の配置の影響

図-10は、拘束境界面の配置を変えた各解析モデルで



(1) 収縮状況

(2) 破壊状況

図-11 収縮状況・破壊状況(左右拘束)

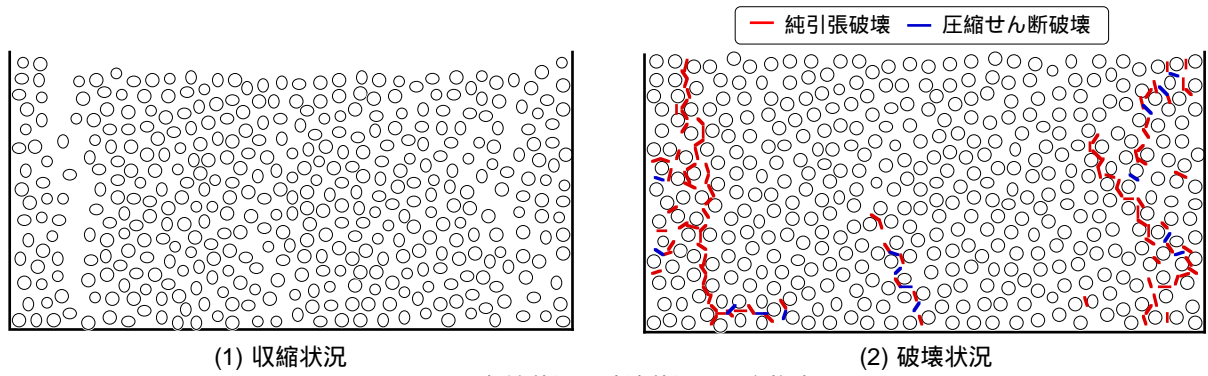


図-12 収縮状況・破壊状況（三方拘束）

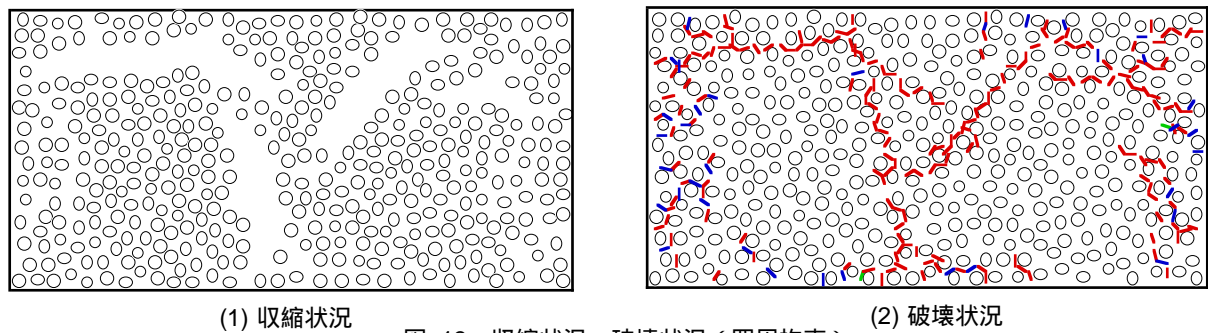


図-13 収縮状況・破壊状況（四周拘束）

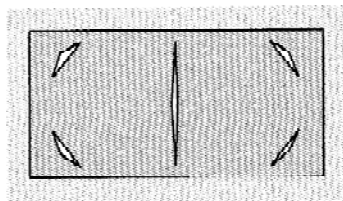


図-14 四周拘束の場合のひび割れ発生予想図³⁾

ある。図-10(1)は、両端に柱があるような壁を想定し、左右に拘束境界面を配置した左右拘束モデルである。なお、解析上、破壊後の落下を避けるために下部にローラーの境界面を配置している。図-10(2)は、両端に柱がありかつ下部も拘束される状況の壁を想定し、左右と下部に拘束境界面を配置した三方拘束モデルである。図-10(3)は、上下左右の四周に拘束境界面を配置したモデルであり、壁というよりも四周を梁で拘束された床スラブのような状況を想定したものである。これら3種の解

析モデルについて、収縮解析を行った。

それぞれの収縮状況および破壊状況を図-11～13に示す。まず、図-11の左右拘束モデルについては、単純に左右が拘束されるため、縦方向にひび割れが生じていることがわかる。両端部への収縮が同程度生じれば、ひび割れは中央部近辺に入るものと考えられるが、実際の構造物でも端部近くに入る場合も多い。解析においては、節点配置の関係で弱くなった部分からひび割れが生じたか、または境界面に近い部分では要素が必ず真横に設定されることによって収縮状況が節点のみの部分とは異なるために生じたことが考えられる。

次に、左右に加えて下面を拘束境界面として加えた三方拘束の図-12の場合、図-11で示した左右拘束に、図-6(1)に示した下面拘束の結果を組み合わせたようなひび割れが生じている。すなわち、左右拘束で特徴的な左右境界面の近辺の縦のひび割れとともに、下面拘束で特徴的な中央部から縦方向へのひび割れが生じている。さ

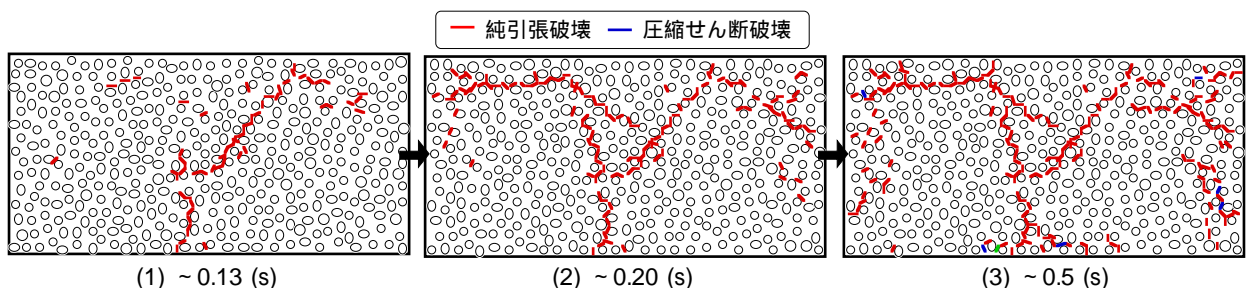


図-15 四周拘束時の収縮ひび割れの進展

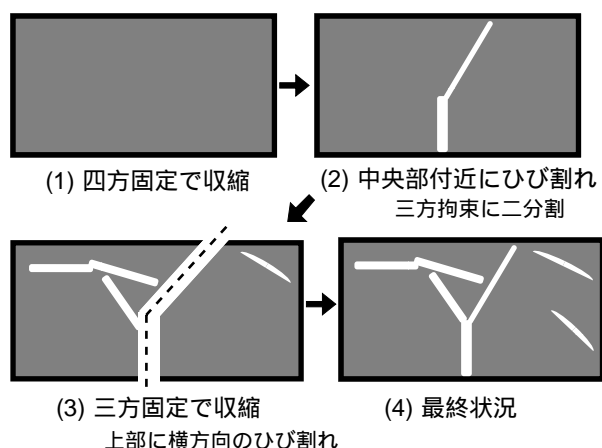


図-16 四周拘束時の収縮ひび割れの進展
(概念図)

らに左右境界面の下部近辺にもひび割れが多く生じており、これは下面拘束で生じる端部の斜めひび割れに相当するものと考えられる。

最後に、四周を拘束した場合には、通常図-14に示すようなひび割れが発生すると考えられている。本解析結果である図-13では、中央部に縦方向にひび割れが大きく生じつつ斜めにもひび割れ、さらに左右上部に斜めひび割れも生じているなどの点で、図-14を再現していると考えられる。しかし、左右の上部に、実現象ではあまり見られないと考えられる横方向のひび割れも生じている。これを検討するために、四周拘束のひび割れの進展状況を検討する。これを図-15に示す。この図からわかるように、この解析結果では、まず縦方向から斜め方法へのひび割れが生じている。その後、横方向のひび割れ、さらに斜め方向のひび割れが生じている。つまり、縦方向のひび割れが生じたことで、拘束状況として、左右二つの供試体に分離したと考えられる。これにより分離したそれぞれの供試体は、図-10(2)で示すような三方拘束が横になったような状況になり、その結果ここでは横方向のひび割れが生じたものと考えられる。この破壊の流れを簡略化して示すと図-16のようになる。このように、ひび割れが生じる順番を考慮することで、ひび割れの発生理由を説明できるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、収縮を生じるコンクリートにおいて、境界面における拘束の有無や拘束力、さらに拘束境界面の配置を変化させた場合に、変形状況およびひび割れ発生状況がどのように変化するかを解析的に検討した。その結果得られた知見は以下の通りである。

- 1) 拘束力の有無によりひび割れの発生および変形挙動が変化する結果が得られた。
- 2) 拘束力の減少によりひび割れの発生が減少する結果を再現できた。
- 3) 周囲の拘束状況の変化によってひび割れの発生状況が変化し、その傾向は実構造物で見られるひび割れを再現できていた。

以上のような結果から、本解析手法を用いて今後様々な拘束条件下における収縮ひび割れ解析できる可能性があると考えられる。また、同時にこれらの解析条件に合わせた拘束条件での実験的な検討を行い、ひび割れ発生状況を検討していく予定である。

【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：コンクリートの収縮に及ぼす骨材の影響に関する解析的研究, コンクリート年次論文集, Vol.32, No.1, pp.419-424, 2011.7