

# 論文 静的破碎剤によるコンクリートの膨張性状に関する実験・解析的検討

天坪 龍汰\*1・三浦 泰人\*2・中村 光\*3

**要旨**：本研究は、静的破碎剤によるコンクリート構造物の解体工法において、静的破碎剤の基本的な膨張挙動を理解することを目的とした実験的・解析的検討を行った。コンクリート試験体の中心に設けた穿孔に静的破碎剤を注入して破碎する膨張試験を実施し、静的破碎剤内部の膨張圧変化を抽出する手法を開発するとともに、供試体寸法および穿孔径が破碎挙動に及ぼす影響を評価した。さらに、RBSM によって静的破碎剤による膨張ひび割れ進展挙動を評価した。その結果、供試体寸法および穿孔径が大きいほど破碎剤内部の膨張圧が増加することを確認し、RBSM によって特徴的な膨張ひび割れ挙動を再現可能であることを確認した。

**キーワード**：静的破碎剤, 膨張, ひび割れ, 3D-RBSM

## 1. 序論

現在、コンクリート構造物の解体工法は重機や爆薬を使用する方法が用いられている。一方、他の解体工法として静的破碎剤を用いた解体工法があり、これは騒音や振動、粉塵など周辺環境への影響が小さいという利点がある。この解体工法は、解体する対象に一定間隔ごとに穿孔を開け、穿孔内に静的破碎剤を流し込むことで、静的破碎剤によって生じる膨張圧によってコンクリートにひび割れを発生させるものである。しかしながら、静的破碎剤によって生じる膨張ひび割れの制御が困難であることから、解体対象の部材が意図しない過剰な膨張によって解体対象ではない隣接する部材を損傷させる可能性があるため、その適用範囲は限定的である。これらの課題を解決する静的破碎剤のひび割れ制御技術は現時点では体系化されていない。静的破碎剤によるひび割れの制御が可能となれば、橋脚や床版などの更新や部分的な取替えに適用できる可能性がある。

本研究では、静的破碎剤によるひび割れ制御技術の体系化に向けて、静的破碎剤による膨張ひび割れの進展に影響を及ぼす要因を実験および数値解析的に評価した。実験では、原田らの実験<sup>1)</sup>を参考に、静的破碎剤の膨張に影響すると考えられる供試体寸法と穿孔径の影響を評価した。さらに、ひび割れを直接的に再現可能な 3D-RBSM (3次元剛体バネモデル) を用いて、静的破碎剤による膨張ひび割れの発生プロセスの再現を試み、膨張ひび割れ進展挙動を評価した。

## 2. 静的破碎剤による膨張試験

### 2.1 供試体条件

実験では、原田らの実験<sup>1)</sup>を参考に、板状のコンクリ

ートの中心に穿孔を設けた供試体を作製し、この穿孔に静的破碎剤を注入して膨張挙動を観察した。

使用したセメントは普通ポルトランドセメントとし、表-1 に示す示方配合によってコンクリートを作製した。また、使用した骨材の最大寸法は 25mm である。本実験では、供試体中心位置において厚さ方向に貫通する穿孔を設けた。穿孔の作製方法としては、打設時に外径が穿孔直径と一致する塩ビ管を型枠に設置し、それ以外の型枠内部にコンクリートを流し込み、脱型時に塩ビ管を取り外すことで穿孔を作製した。打設後は、供試体は 28 日間の水中養生 (写真-1) を行った。

本実験では、供試体寸法と穿孔径においてそれぞれ 3 ケースの実験変数を設けて、全 9 ケースの実験を実施し、全てのケースで 2 体ずつの試験体を用意した。供試体の概要と供試体寸法および穿孔径の情報を、それぞれ図-1 と表-2 に示す。供試体の厚さは全てのケースにおいて 50mm とし、100×100, 200×200, 300×300mm の断面の供試体を作製した (以下、それぞれ S100, S200, S300)。

表-1 示方配合

W	C	S	G
175	350	811	932

(kg/m<sup>3</sup>)

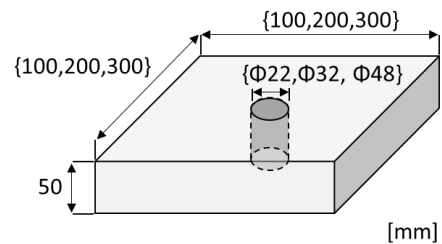


図-1 供試体概要

\*1 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

\*2 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻准教授 工博 (正会員)

\*3 名古屋大学大学院 工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表一2 供試体諸寸法

供試体番号	S100Φ22	S200Φ22	S300Φ22	S100Φ32	S200Φ32	S300Φ32	S100Φ48	S200Φ48	S300Φ48
高さ	50								
穿孔直径	22			32			48		
一辺の長さ	100	200	300	100	200	300	100	200	300
支点の位置 (穿孔中心からの距離)	30	60	90	30	60	90	30	60	90

(単位: mm)



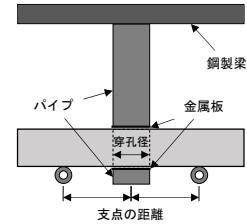
写真一1 養生の様子



写真一2 膨張試験の様子



写真一3 測定装置



図一2 装置概要

なお、断面が大きいほど静的破砕剤の膨張を拘束する効果が大きくなると想定される。また、穿孔は直径が 22, 32, 48mm の 3 種類の穿孔径を設定した。

また、膨張試験前後のコンクリートの圧縮強度を測定するために、6 体の円柱供試体を作製した。なお、打設時に使用したコンクリートで試験体を 6 体作製し、膨張試験の前後に圧縮試験を行った。その結果、膨張試験前後の 3 体の試験体の圧縮強度の平均値は、それぞれ 34.4, 37.6 N/mm<sup>2</sup>であった。膨張試験前後で大きな強度変化はみられなかったことから、全ての試験体の圧縮強度の平均値 36.0 N/mm<sup>2</sup>をコンクリートの圧縮強度とした。

## 2.2 静的破砕剤による膨張試験

静的破砕剤による膨張試験の様子を写真一2 に示す。使用した静的破砕剤は、太平洋プライスター100 (練り混ぜタイプ) を使用した。水と静的破砕剤の割合は、仕様の通り、静的破砕剤の 30%の質量で練り混ぜた。供試体の境界条件を明確にするために、全ての供試体において曲げ試験の支点のように穿孔中心から表一2 に示す距離だけ離れた位置に供試体の幅と同じ長さの塩ビ管を設置することで、供試体を支持した。

本実験では、穿孔が供試体の厚さ方向を貫通しているため、穿孔部に注入した静的破砕剤が外部へと流出することで膨張圧が低下することが危惧された。そこで、図一2 に示すように、穿孔の上下部の開口箇所には穿孔より若干大きい厚さ 1mm の金属板を配置した。穿孔上部においては金属板の上に鋼製の梁を配置し、金属板と鋼製梁の間にパイプを配置した。穿孔下部においても同様に、床と金属板の間にパイプを配置した。これにより、静的破砕剤が膨張によって穿孔外部へと抜け出すことを防ぐことで、穿孔壁面に作用する膨張圧が厚さ方向で一様になるようにした。また、注入時に液体状の静的破砕剤が

漏洩しないために、穿孔下部の開口箇所はテープで密閉した上で金属板を設置した。

なお、金属板とコンクリートとの接触領域は小さいため、摩擦によって穿孔付近のコンクリートの膨張が拘束される影響は非常に小さいと考えられる。

## 2.3 静的破砕剤内部の膨張圧の測定

本実験では、写真一3 に示すようにひずみゲージを貼付したアクリルバーを穿孔内の中心位置に配置することによって、静的破砕剤内部の膨張圧を測定した。使用したアクリルバーは 10×10×18mm であり、長手方向が穿孔に直交するように配置した。このアクリルバーの上下面にひずみゲージを貼付し、アクリルバーの長手方向のひずみを測定した。ひずみゲージの上から SB テープと VM テープで覆うことで、静的破砕剤からゲージを保護した。なお、アクリルバーが静的破砕剤の膨張圧の伝達を促すために、側面には切欠部分を設けた。膨張時には、穿孔壁面のコンクリートによって静的破砕剤による膨張が拘束されるため、静的破砕剤内部には圧縮応力が作用することでアクリルバーには圧縮ひずみが発生すると考えられる。アクリルバーの弾性係数 (3000 N/mm<sup>2</sup>) と貼付したひずみゲージから得られるひずみによって圧縮応力を算出し、この圧縮応力を膨張圧と定義して膨張圧の時間変化 (以下、膨張圧曲線) を同定した。なお、本実験では最大の膨張時間を 100 時間とした。

## 2.4 実験結果

### (1) 静的破砕剤による破砕状況

本実験で観察された静的破砕剤による破砕性状は、穿孔部から 4~5 本のひび割れが放射状に進展し、供試体表面に到達して貫通ひび割れが発生することで破砕しており、これは破砕した全ての供試体において共通していた。実験終了時の供試体の破砕状況を表一3 に示す。100

時間の間に破砕が生じたケースを「○」、破砕しなかったケースを「×」で示している。これをみると、穿孔径が小さく、供試体寸法が大きい方が破砕しにくい傾向が確認できる。穿孔径が小さく供試体寸法が大きいほど、穿孔から供試体表面までの距離が長くなる。そのため、膨張圧に対するコンクリートの抵抗が大きくなることで破砕しにくくなったと考えられる。また、穿孔径が小さいと静的破砕剤の量が少なくなることも影響していると考えられる。

### (2) 膨張圧曲線

穿孔径ごとの膨張圧曲線を図-3に示す。全体的な傾向として、静的破砕剤注入から8時間程度で膨張圧が増加し始めて、徐々に膨張圧の増加勾配が低下し、ある時点で急激に膨張圧が低下する挙動が確認できる。急激な膨張圧の低下は、穿孔と供試体表面とをつなぐ貫通ひび割れが発生したことによって、コンクリートの抵抗力が低下したためと考えられる。穿孔径に着目すると、穿孔径が大きくなるほど発生した膨張圧が大きくなることが確認できる。また、供試体寸法が小さいほど早期に貫通ひび割れが発生し、急激に膨張圧が低下する挙動が確認できる。これは、原田らの膨張圧の経時変化と同様の傾向が確認できたことから、本実験で行ったアクリルバーを用いた測定方法においても膨張圧が測定できたと判断できる。また、Φ32とΦ48の膨張圧曲線を見ると、供試体寸法が異なったとしても、膨張圧の増加勾配は概ね同様であることは特徴的な点である。すなわち、供試体寸法が異なったとしても、穿孔径が同じ（静的破砕剤の量が同じ）であれば、静的破砕剤内部に発生する膨張圧は変化しないということがわかる。

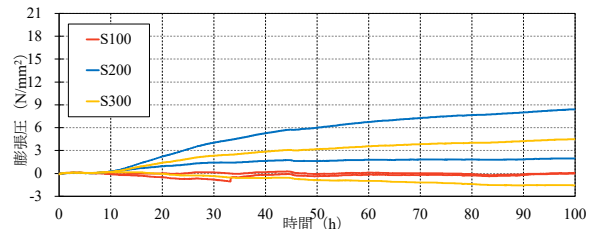
しかしながら、Φ22のケースでは、ほとんどの供試体の測定値が0に近い値であり、他の穿孔径のように明瞭な傾向が確認できなかった。アクリルバーの位置の穿孔内部の断面を考えると、アクリルバーの対角線上の長さは約20.6mmとなるため、穿孔径の大きさに対してアクリルバーの占める割合が大きいことが要因である可能性がある。すなわち、アクリルバー周辺において静的破砕剤の量が少なく、膨張圧が十分に発生されなかった可能性がある。Φ32の試験体において、供試体寸法がS200とS300の一部の試験体で膨張圧の増加勾配が低いケースがあることから、Φ32の穿孔径においても同様の問題となっている可能性がある。なお、Φ48でS300のケースにおいて、貫通ひび割れの発生時期が大きく異なることについては、粗骨材の配置などのコンクリートの不均質性によってひび割れの進展プロセスが影響を受けたものと考えられる。

### (3) 試験体寸法の影響

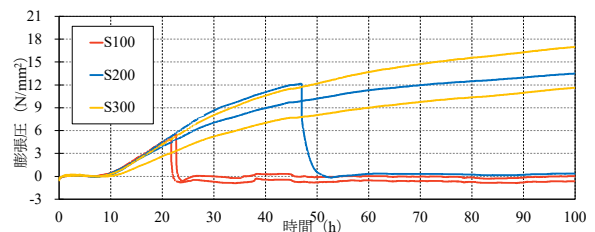
膨張圧曲線において単位時間あたりの膨張圧増加量

表-3 破砕状況

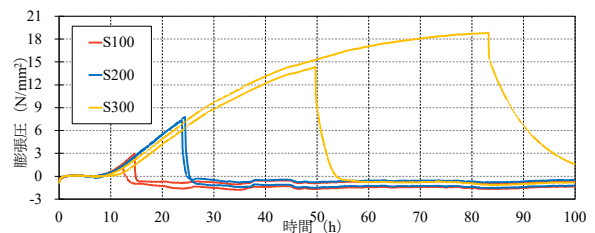
	S100		S200		S300	
Φ22	○	×	×	×	×	×
Φ32	○	○	○	×	×	×
Φ48	○	○	○	○	○	○



(a) Φ22



(b) Φ32



(c) Φ48

図-3 膨張試験の膨張圧曲線

の最大値を最大膨張速度 (N/mm<sup>2</sup>/h) と定義し、供試体寸法が及ぼす影響を評価した。なお、Φ22のケースは膨張圧の測定が適切でない可能性があるため、図には示すがここでは評価しないこととする。

最大膨張速度または最大膨張速度到達時間と供試体寸法との関係を図-4に示す。図-4(a)の最大膨張速度をみると、同じ穿孔径の場合、ばらつきはあるものの供試体寸法による差異が少なく、穿孔周辺のコンクリートによる拘束の影響が小さいことがわかる。図-4(b)の最大膨張速度到達時間に着目すると、Φ32とΦ48は概ね15~20時間の範囲で最大膨張速度に達したが、Φ48では供試体寸法の小さいS100のケースにおいて明らかに小さくなった。Φ48の供試体寸法が小さいケースで最大膨張速度到達時間が短くなったことは、穿孔から供試体表面までのかぶり厚が非常に小さく、早期に貫通ひび割れが生じたためと考えられる。かぶり厚が十分に確保されている場合、最大膨張速度到達時間は供試体寸法に影響しない。従来は膨張圧曲線などの径時変化のみだった

が、今回の膨張速度に関する評価も静的破砕剤の膨張特性を表す指標となると考えられる。外気温によって膨張速度は変わると考えられるが、今回の条件（外気温 10～15℃程度）では、静的破砕剤は練り混ぜから 15～20 時間後に最大の膨張速度に達し、その後は膨張速度が減少した。

#### (4) 穿孔径の影響

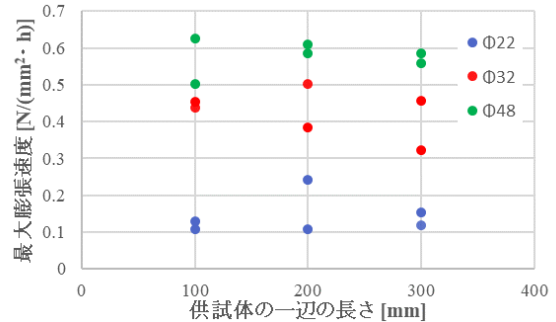
最大膨張速度と穿孔断面積の関係を図一5 に示す。なお、穿孔断面積は静的破砕剤の量と関係する指標と理解されたい。これをみると、穿孔径が大きいほど最大膨張速度は大きくなっていることが確認できる。最大膨張速度と穿孔断面積には概ね線形関係があることが確認できることから、静的破砕剤の量に応じて最大膨張速度は大きくなるのがわかる。

### 3. 3D-RBSM による静的破砕剤の膨張解析

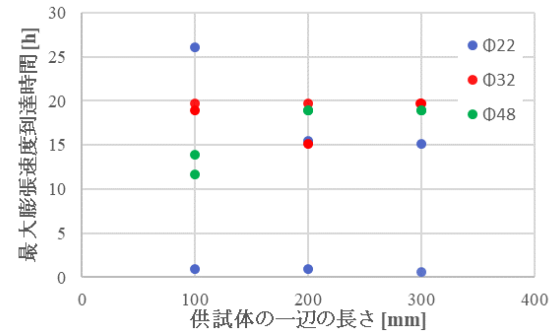
#### 3.1 解析概要

3D-RBSM は、剛体要素間の境界面に配置した力学ばねによって、コンクリート材料中のひび割れのような離散的挙動を直接的に表現する手法である。静的破砕剤による膨張挙動は、膨張圧とこれに対するコンクリートの抵抗としての拘束圧が常に釣り合っていると考えられる。したがって、コンクリートのひび割れの進展に伴ってコンクリートの抵抗が低下するとともに膨張圧が低下すると予想される。すなわち、ひび割れを直接再現可能な 3D-RBSM によって、静的破砕剤の膨張メカニズムを精緻に評価できると考えられる。そこで、3D-RBSM を用いて本実験と同様の供試体モデルを作製し、静的破砕剤の膨張挙動の評価を試みた。

一例として  $\Phi 48$  のケースの解析モデルを図一6 に示す。実験と同様に試験体中央に円柱状の静的破砕剤要素をモデル化し、この要素に膨張ひずみを導入することで静的破砕剤の膨張挙動をモデル化した。詳細な膨張モデルは後述する。境界条件は実験と同様とし、静的破砕剤要素の鉛直方向の変位を拘束する拘束板（赤色、黄色）を設置し、供試体下面の支点（青色、緑色）は、2mm の厚さ

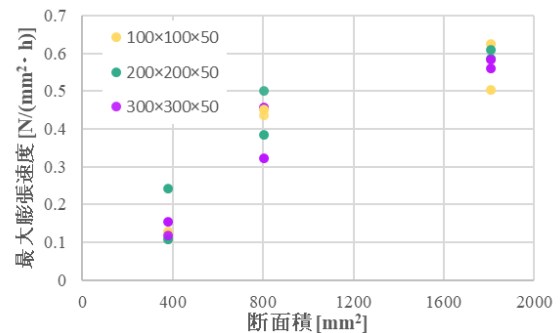


(a) 最大膨張速度との関係性



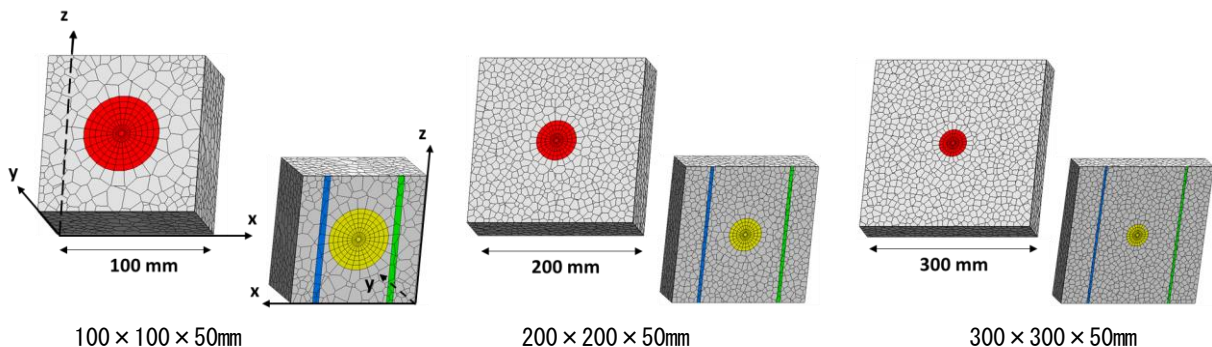
(b) 最大膨張速度到達時間との関係性

図一4 試験体寸法の影響



図一5 穿孔径の断面積の影響

の支点を設置して丸棒の支持条件を模擬した。また、支点の境界条件は、鉛直方向となる y 方向の変位を固定、z 方向の変位を自由とし、片方の支点の x 方向の変位のみ固定した。なお、解析で用いたコンクリートの材料パラメータは、実験の圧縮強度 (36 N/mm<sup>2</sup>) とし、この圧縮強度に基づいてその他の材料パラメータを表一4 に示すように決定した<sup>2)</sup>。



図一6  $\Phi 48$  のケースの解析モデル

表一4 コンクリートおよび静的破砕剤のメソスケールの材料パラメータ

材料	弾性係数 $E$ [N/mm <sup>2</sup> ]	引張強度 $f_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	粘着力 $c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	破壊エネルギー $G_f$ [N/mm]
コンクリート	39200	2.51	5.04	0.02823
静的破砕剤	7840	0.50	1.00	0.0005

### 3.2 静的破砕剤の膨張モデル

静的破砕剤は初期には液体状であるが、水和反応により水酸化カルシウムの生成が進むにつれて徐々に粉体状となる。すなわち、静的破砕剤自体が固体としての材料強度を有するものではなく、閉空間において水酸化カルシウムの生成による体積膨張が生じることで穿孔壁に膨張圧が作用する。数値解析的にこのような静的破砕剤の膨張現象をモデル化することは非常に困難であり、クリープなどの時間依存性を考慮する必要があると考えられるため、本解析では簡易的にコンクリートの構成則を用いることで静的破砕剤の特徴的な膨張挙動を表現した。

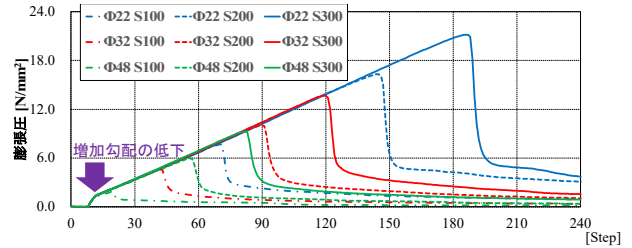
本解析で設定した静的破砕剤の材料パラメータを表一4に示す。静的破砕剤は最終的に粉体となることから、すぐにひび割れが生じ、軟化が生じない材料と仮定した。材料パラメータとしては、引張強度 $f_t$ を0.5 N/mm<sup>2</sup>とし、粘着度 $c$ は1.00 N/mm<sup>2</sup>、破壊エネルギー $G_f$ は0.0005 N/mmと非常に小さい値に設定した。また、静的破砕剤の膨張過程では、初期には液体状で、水酸化カルシウムを生成により徐々に粉体になりながら緻密化する。したがって、弾性係数が時間依存で増加するような挙動を示すと考えられるが、本解析では弾性係数を一定とし、コンクリートの20%とした。実験では静的破砕剤に膨張圧が作用し始める時間は注入してから8時間後であったため、膨張解析は8時間経過後から開始した。膨張開始時点から全ての静的破砕剤要素に1ステップごとに100 $\mu$ の膨張ひずみを作用させることとし、膨張ひずみは一定値と仮定した。なお、コンクリートのクリープの影響は考慮していないため、時間の概念がない。そのため、以降の解析結果はあるステップ数の膨張圧、ひび割れ、応力分布を評価するとして、ひび割れ進展性状については実験との比較を行った。

解析における膨張圧の定義は、静的破砕剤要素間に配置された力学ばねの応力値から水平方向の成分（実験の膨張圧の測定方向と同様）を抽出し、その平均値を算出することで、これを破砕剤内部の膨張圧とした。

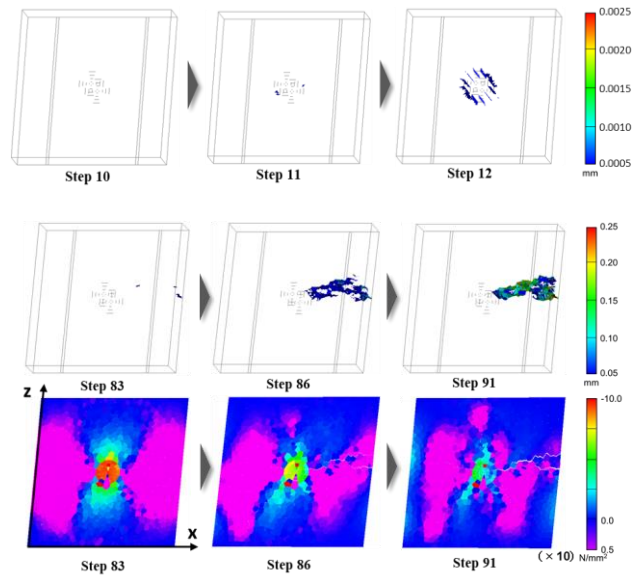
### 3.3 解析結果：膨張圧曲線

本解析により得られた膨張圧曲線を図一7に示す。同じ穿孔径のものは同じ色で示している。

膨張圧曲線の全体の傾向として膨張圧が増加し、ある時点で膨張圧の急激な低下が確認された。膨張の増加挙動が線形的であるが、コンクリートのクリープの影響を



図一7 膨張試験の膨張圧曲線



図一8 ひび割れ分布と断面応力分布

考慮することでより実験の傾向に近づくと考えられる。また、膨張圧の増加は供試体寸法や穿孔径によらず一致しているが、膨張圧の低下のタイミングに差がみられた。すなわち、穿孔径が小さく供試体寸法が大きいほど、膨張圧の低下のステップ数は増加した。これは実験において確認された傾向と同様である。

### 3.4 解析結果：膨張ひび割れに関する一考察

#### (1) 貫通ひび割れ発生プロセス

図一8に $\Phi 48$ , S300のケースにおける解析の膨張初期と膨張圧低下時付近の3次元なひび割れ分布と供試体断面中央のz軸方向の応力分布の変化過程を示す。

膨張初期のひび割れ分布に着目すると、図一7において、図中の矢印が示す膨張の増加勾配が低下した時点で微細なひび割れの発生を確認した。これにより膨張の増加勾配が低下したと考えられる。次に、膨張圧低下時のひび割れ分布に着目すると、ステップ86からステップ91の間に供試体表面と穿孔をつなぐ貫通ひび割れの発

生が確認できる。

断面内の応力分布をみると、貫通ひび割れが発生していない段階では、静的破砕剤内部に膨張をコンクリートが拘束することで圧縮応力が発生した。また、周辺のコンクリートには穿孔の左右にz方向の引張応力が試験体表面に向けて一様に分布し、その反力として穿孔上下部近傍にz方向の圧縮応力が作用した。x方向の応力分布はz方向のそれと逆の傾向になるため、実際には穿孔に対して周方向に引張応力が同心円状に生じていると考えられる。膨張圧が急激に低下した時点と貫通ひび割れが発生した時点が一致していることから、貫通ひび割れの発生によりコンクリートの抵抗力が低下することで、静的破砕剤要素内に蓄積していた圧縮応力が解放されたためと考えられる。

## (2) ひび割れの再現性評価

図-9は実験終了時の供試体の様子と、Step100の時点での解析によるひび割れ性状を示す。なお、目視で可視化できるひび割れ幅として、解析で可視化するひび割れ幅の下限は0.05mmとした。これをみると、供試体寸法の小さいS100のケースでは、ひび割れ本数を多く評価しているが、それ以外のケースでは、実験のひび割れの本数や分布は概ね同様の結果となった。

## (3) 静的破砕剤による膨張ひび割れの進展プロセス

ここで、本解析で得られた結果を基に静的破砕剤による膨張ひび割れの進展プロセスを整理する。膨張初期のひび割れが発生していない段階では、静的破砕剤にはコンクリートの拘束によって圧縮応力が発生し、穿孔周辺のコンクリートには引張応力が同心円状に発生する。膨張が進行するにつれて、穿孔壁面から非常に微細なひび割れが発生および進展することで、静的破砕剤内部の圧縮応力が低減することで膨張圧が低減する。これが、実験で膨張速度が緩やかに低下する要因であると考えられる。さらに、膨張の進行により引張応力がコンクリート表面へと伝搬し、表面の引張応力が引張強度に達すると、穿孔から進展したひび割れが表面へと進展して貫通ひび割れが発生する。このとき、コンクリートの抵抗が減衰するため静的破砕剤に生じている圧縮応力も減衰する。貫通ひび割れが生じていない方向の静的破砕剤にはコンクリートの拘束が残存するため、直ちに膨張圧が消失せず、静的破砕剤による膨張は継続される。そのため、コンクリート表面の方がひび割れ幅が大きくなり、見かけ上表面から穿孔へとひび割れが進展したようにみえることになる。この膨張の継続により、貫通していないひび割れが徐々に進展することで貫通ひび割れの本数が増加すると考えられる。

本解析では、コンクリートのクリープ、静的破砕剤の時間依存性、発生したひび割れ中への静的破砕剤の浸入

といった影響を考慮していないため、今後これらの影響を考慮可能な解析モデルを構築する予定である。

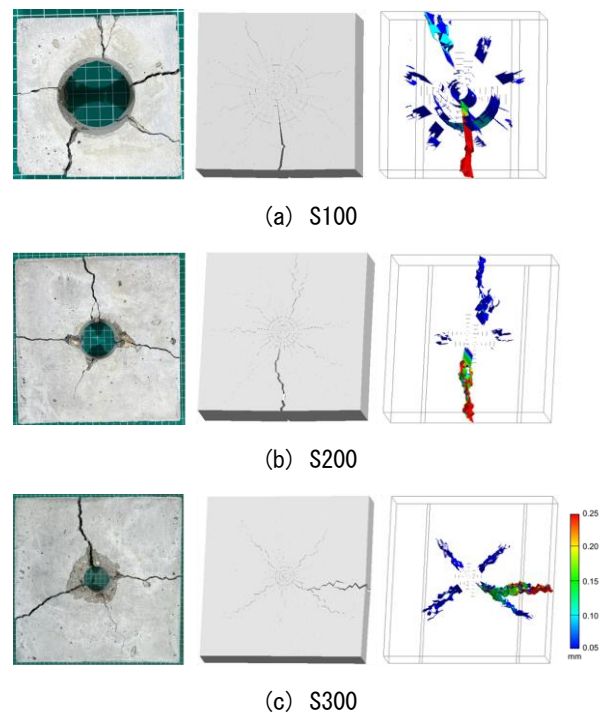


図-9 Φ48のケースにおけるひび割れ分布の比較

## 4. 結論

本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 静的破砕剤内部の膨張圧を測定する手法を開発し、供試体寸法や穿孔径による膨張圧の影響を評価することができた。最大膨張速度は穿孔径に依存するが供試体寸法の影響は小さいことを確認した。
- 2) 3D-RBSMによって静的破砕剤による膨張挙動を評価可能な手法を開発し、静的破砕剤による膨張ひび割れ進展メカニズムを評価した。
- 3) 穿孔壁面から進展する微細なひび割れの発生や供試体表面と穿孔をつなぐ貫通ひび割れの発生によって、静的破砕剤による膨張挙動は強く影響を受けることを示唆する結果を得た。

## 参考文献

- 1) 原田哲夫, 副田孝一, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤の膨張圧測定法と膨張圧の諸性質, 土木学会論文集, Vol.21, No.478, pp.91-100, 1993.11
- 2) Miura T., Nakamura H., Yamamoto Y.: Reduction mechanism of the compressive properties of concrete with primary crack of different widths and angles evaluated by 3D-RBSM. Engineering Fracture Mechanics, Vol. 276, 108877, 2022