

論文 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解抵抗性

内藤 英樹^{*1}・山洞 晃一^{*2}・古賀 秀幸^{*3}・鈴木 基行^{*4}

要旨：模擬ひび割れを導入したコンクリート供試体の水中凍結融解試験を行った。その結果、i) 繰り返し凍結融解作用によって供試体のひび割れ深さが進展し、見かけの相対動弾性係数が低下すること、ii) ひび割れの進展程度は、初期ひび割れ深さに大きく影響すること、などの知見を得た。さらに、凍結融解サイクル数とひび割れ深さとの関係を整理し、破壊力学に基づくコンクリートのひび割れ進展モデルを提示した。そして、圧縮を受けるコンクリート部材を対象として、提案モデルを用いたひび割れ進展解析の一例を示した。

キーワード：凍結融解試験、初期ひび割れ、ひび割れ進展モデル、凍害

1. はじめに

これまでにコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究が多く報告されており、コンクリート内部の細孔空隙における水分の移動や凍結時の膨張圧など、凍害のメカニズムが解明されつつある¹⁾。しかし、既往の研究の多くは、初期ひび割れがないコンクリート供試体（以下、健全供試体）を対象としており、初期ひび割れがコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討した例^{2),3)}は少ない。橋口ら²⁾は、初期ひび割れを導入したコンクリート供試体（以下、ひび割れ供試体）の凍結融解試験を行っており、水の凍結膨張圧がひび割れを開口させるため、凍結融解サイクル数の増加に伴ってコンクリートのひび割れ深さが進展することを報告している。しかし、このような実験データは不足しており、コンクリート構造物の設計・施工に際して、凍結融解作用を想定した許容ひび割れ幅や許容ひび割れ深さの規定はなく、また、各地域の気象条件に対して、コンクリートのひび割れ進展速度を評価する手法も確立されていない。

そこで、本研究では、凍害環境下におけるコンクリートのひび割れ進展モデルを構築するため、模擬ひび割れを導入したコンクリート供試体の凍結融解試験を行った。そして、凍結融解サイクル数と供試体のひび割れ深さとの関係を整理し、破壊力学に基づくコンクリートのひび割れ進展モデルを構築した。なお、最終的には鉄筋などの拘束効果を考慮した RC 部材のひび割れモデルに発展させるため、本論文では、その基礎的研究として、無筋コンクリートのひび割れ進展モデルを対象とした。

2. 初期ひび割れを有するコンクリートの凍結融解試験

2.1 実験概要

供試体諸元を表-1 に示す。いずれの供試体も 10cm×

10cm×40cm の角柱供試体とする。これらの供試体に使用したコンクリートの配合表を表-2 に示す。なお、セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。打設後は、実構造物の施工を想定して、24 時間の蒸気養生した後に脱型し、材齢 28 日まで実験室内（室温：10～15℃）に気中静置した。なお、試験開始前の 3 日間は供試体を水中に静置して水を含ませ、その状態を基準として質量減少率の計測を行った。表-1 に示す供試体は、健全供試体（D0）とひび割れ供試体 5 シリーズ（D1～D5）とし、それぞれのシリーズ毎に 3 体の供試体を作製した。コンクリート標準示方書⁴⁾に規定される鋼材腐食に対するひび割れ幅の許容値は、かぶり 10cm の場合に 0.3mm 程度となる。そこで、ひび割れ供試体 D1～D3 では、ひび割れ幅を 0.3mm とし、初期ひび割れ深さを 10mm～50mm に変化させた。これに対して、D4 供試体ではひび割れ幅の影響を検討するため、ひび割れ幅 0.1mm、ひび割れ深さ 30mm とした。さらに、ひび割れ本数の影響を検討するため、D5 供試体ではひび割れ本数を 3 本とした。

初期ひび割れの導入は、図-1 に示すように、コンク

表-1 供試体一覧

供試体 シリーズ	初期ひび割れ		
	深さ	幅	本数
D0	---	---	---
D1	10mm	0.3mm	1 本
D2	30mm		
D3	50mm		
D4	30mm	0.1mm	3 本
D5	30mm	0.3mm	

※ 供試体はそれぞれのシリーズ毎に 3 体作製した。

*1 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (独) 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 鉄道建設本部 東北新幹線建設局

*3 (株) オリエンタルコンサルタンツ 東北支店

*4 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

表-2 示方配合

W/C (%)	s/a (%)	$G_{\max}$ (mm)	単位量 (kg/m ³)				AE 減水剤 (ml)	スランブ (cm)	空気量 (%)
			W	C	S	G			
53	40.6	25	148	279	755	1143	2.79	15.5	6.2

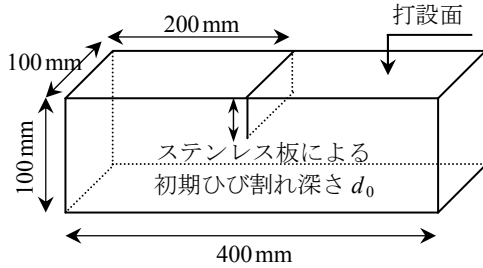


図-1 ひび割れ供試体の概略図

リートを打設する際にグリースを塗布したステンレス板 (幅 10 cm, 厚さ 0.1 または 0.3 mm) を供試体打設面の中央位置に垂直に埋め込み、硬化開始とともにステンレス板を引き抜いた。なお、初期ひび割れを 3 本導入した D5 供試体では、図-1 のひび割れ間隔を 100 mm とした。

水中凍結融解試験では、供試体中心部の温度変化 -18 ~ +5℃ を基準として、300 サイクルの温度履歴を与えた⁵⁾。なお、別途作製した円柱試験体 (φ10 cm × 20 cm) を用いた試験開始時 (材齢 28 日) の強度試験結果は、圧縮強度が 36.3 MPa、引張強度が 2.58 MPa、ヤング係数が 27,300 MPa であった。

2.2 実験結果

20 サイクル毎の質量減少率と相対動弾性係数をそれぞれ図-2 と図-3 に示す。なお、これらの図には全供試体 18 体 (3 体 × 6 シリーズ) の結果を示した。ここで、図-3 を作成する際の見かけの動弾性係数 E_d は、共鳴振動試験 (縦振動) から式 (1) により算定した⁵⁾。

$$E_d = 4.00 \times 10^{-3} \frac{L}{tb} m f^2 \quad (1)$$

ここで、 L は供試体長さ (mm)、 b は断面幅 (mm)、 t は断面高さ (mm)、 m は供試体質量 (kg)、 f は縦振動による一次共鳴振動数 (Hz) である。なお、式 (1) は等断面を有する棒部材の振動方程式から導出されているが、図-3 では、初期ひび割れ深さ d_0 に関わらず、断面高さ $t=100$ mm (試験終了まで一定) として計算した見かけの動弾性係数を示した。

図-2 と図-3 の実験結果より、健全供試体 D0 の質量や動弾性係数がほとんど減少しないことから、表-2 の配合によるコンクリートは高い凍結融解抵抗性を有していることが確認できた。そして、同じ配合のコンクリートを使用したひび割れ供試体 D1~D5 でも、スケーリングや図-2 の質量減少率は小さかった。

一方、初期ひび割れを導入した D1~D5 供試体では、

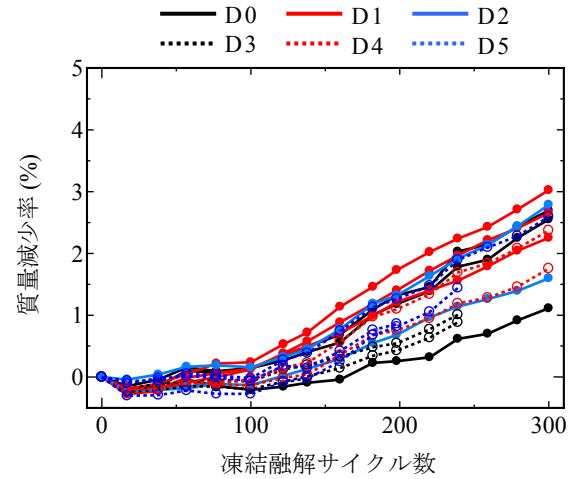


図-2 質量減少率

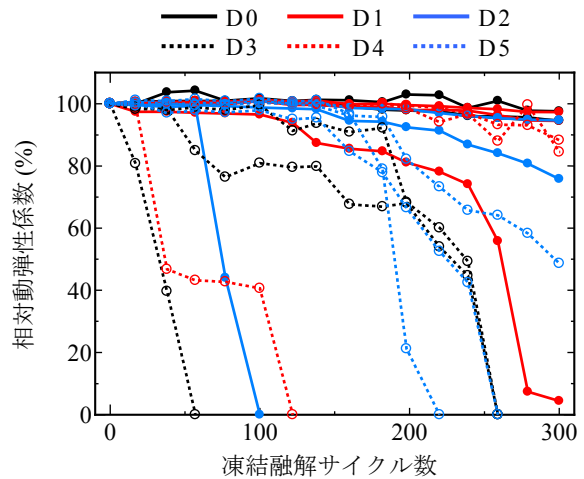
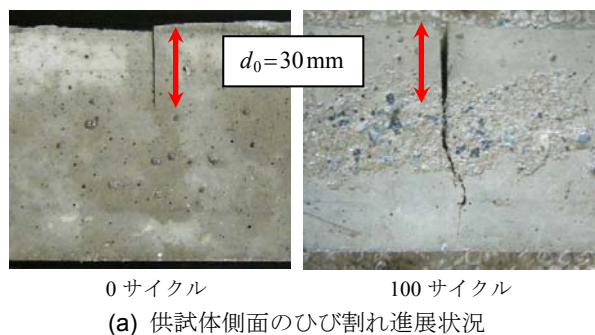
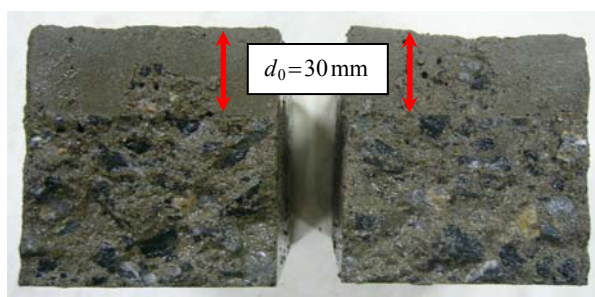


図-3 相対動弾性係数

健全供試体とは異なり、見かけの相対動弾性係数が大きく低下した。これらの実験結果は、供試体毎のばらつきが大きく、相対動弾性係数 60% を下回る供試体も多く見られた。供試体の損傷状況の一例を写真-1 に示す。初期ひび割れ深さ $d_0=30$ mm とした D2 供試体などでは、写真-1 (a) に示すように、供試体の側面から凍結融解作用に伴うひび割れ深さの進展が目視によって確認できた。これは、ひび割れ部に満たされた水の凍結膨張圧によってひび割れ部が開口したものと推察される²⁾。また、ひび割れの進展に伴って供試体の相対動弾性係数が大きく低下した。これは、ひび割れによって共鳴振動数 f が低下し、式 (1) の見かけの動弾性係数 E_d が小さくなるためである。なお、非破壊検査法によって推定されるひび割れ深さと相対動弾性係数の関係は後述する。特に、



(a) 供試体側面のひび割れ進展状況



(b) 破断面 (100 サイクル)

写真-1 D2 供試体の損傷状況

ひび割れ深さ $d_0=30, 50\text{mm}$ とした D2, D3, D4 供試体では、図-3 に示す相対動弾性係数の低下が顕著であり、写真-1 (b) に示すようにひび割れ深さが 100 mm に達して供試体が割裂した。橋口ら²⁾は、ステンレス板によって初期ひび割れを導入したコンクリートの凍結融解試験を行っており、相対動弾性係数の低下は初期ひび割れ深さに大きく影響することを報告している。本実験の範囲でも、初期ひび割れ深さが大きいほど、相対動弾性係数の低下が大きい傾向が見られた。一方、ひび割れ幅 (0.1 mm, 0.3 mm) やひび割れ本数 (1 本, 3 本) をパラメータとした供試体の比較では、実験結果に明確な差異が見出せなかった。これより、動弾性係数の評価はひび割れ本数に無関係であること、また、ひび割れ幅 0.1 mm と 0.3 mm では、ひび割れを開口させる水の凍結膨張圧が同程度になると推察される。しかし、各シリーズの中でも供試体毎のばらつきが大きく、本実験の諸元や計測の範囲ではその理由を明らかにすることはできなかった。今後、さらに多くの実験データを収集し、検討する必要がある。

3. 凍結融解作用によるひび割れ進展モデル

3.1 凍結融解試験におけるひび割れ深さの推定

供試体のひび割れ深さを目視によって精度良く計測することは困難であり、非破壊検査法による推定手法が必要である。本研究では、ひび割れの進展に伴って供試体の共鳴振動数 f が変化することに着目し、共鳴振動試験を用いてひび割れ深さを推定した。式 (1) は等断面を有する棒部材の振動方程式の解であり、厳密にはひび割れを考慮した振動方程式を解く必要があるが、ここでは

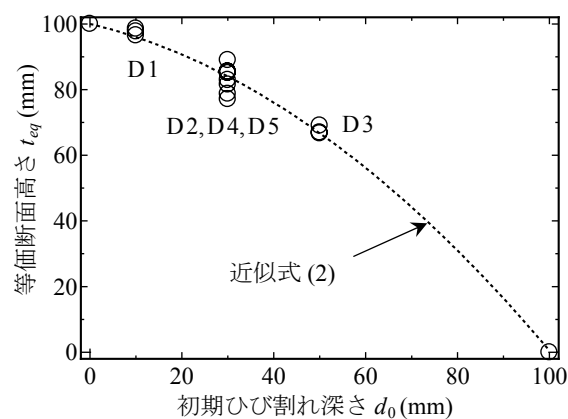


図-4 ひび割れ深さと等価断面高さの関係

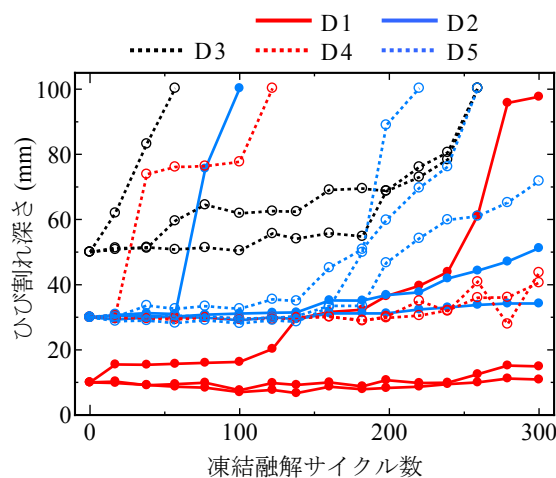


図-5 ひび割れ深さの推定値

簡易な手法として、ひび割れ深さ d に対してその影響を考慮した式 (1) の等価断面高さ t_{eq} を定式化する。

0 サイクル時の共鳴振動試験によって、表-2 のコンクリートの動弾性係数 (健全供試体 D0) は 39,200 MPa となった。コンクリートの配合は全供試体で同一であるため、共鳴振動試験 (縦振動) による D1~D5 供試体の振動数 f に対して、式 (1) の動弾性係数 E_d が 39,200 MPa となる t_{eq} を等価断面高さとして定義した。0 サイクル時のひび割れ深さ d と等価断面高さ t_{eq} の関係を図-4 に示す。さらに、図-4 からひび割れ深さ d (mm) をパラメータとする式 (2) の等価断面高さ t_{eq} (mm) の回帰式を得た。

$$t_{eq} = 100 - 0.0066d^2 - 0.3351d \quad (2)$$

また、前記のように表-2 の配合によるコンクリートは高い凍結融解抵抗性を有している。そこで、凍結融解作用による動弾性係数 E_d と質量 m の低下を無視すれば、式 (1) より各供試体の n サイクル時の t_{eq} が次式で算定できる。

$$t_{eq} = t_0 (f/f_0)^2 \quad (3)$$

ここで、 f は n サイクル時の共鳴振動数 (Hz)、 f_0 は 0 サイクル時の共鳴振動数 (Hz)、 t_0 は式 (2) に初期ひび割れ

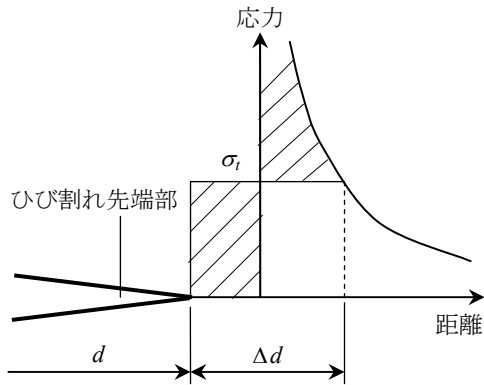


図-6 荷重平衡に基づく塑性域の推定⁶⁾

深さ d_0 を代入して得られる等価断面高さ (mm) である。

以上より、各サイクルでの共鳴振動数 f を用いて、式 (2)(3) からひび割れ深さ d が推定できる。本実験において推定されるひび割れ深さ d と凍結融解サイクル数 n の関係を図-5 に示す。ひび割れ深さの進展は、図-3 の相対動弾性係数の低下と概ね対応しており、D2, D3, D4 供試体の 3 体では、ひび割れ深さの進展が特に大きかった。前記のように、図-5 でもひび割れの進展程度が供試体毎に大きく異なったが、以降の検討では、安全側の配慮から早期にひび割れが進展したこれら 3 体の実験データを基にしてひび割れ進展モデルを構築する。

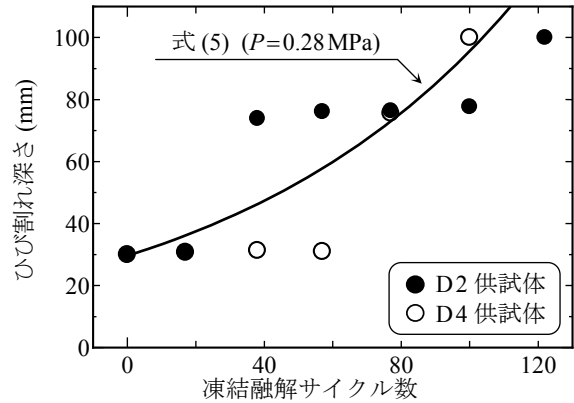
3.2 ひび割れ進展モデル

図-5 に示した凍結融解サイクル数とひび割れ深さの関係を基にして、ひび割れ進展モデルを構築する。前記のように、ひび割れの進展速度はひび割れ深さに影響すると考えられ、また、橋口ら²⁾の研究では、ひび割れ幅の影響は小さいことが報告されている。そこで、解析モデルでは、1 本のひび割れを対象とした線形破壊力学の平面ひずみ問題を考える。著者らの知る限り、コンクリートの可視ひび割れ内部での水の凍結膨張圧を評価した報告がないため、本研究では、図-5 の実験結果に整合するひび割れ内部の凍結膨張圧を同定する。

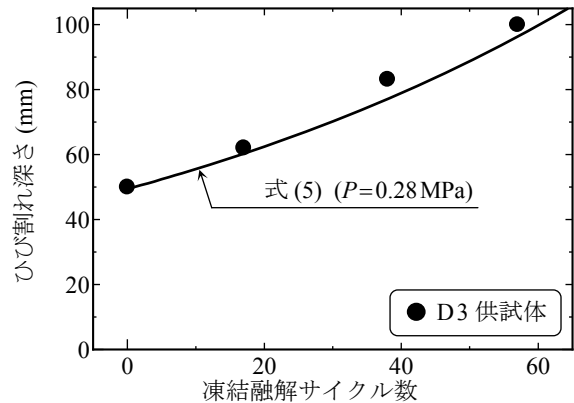
解析モデルの概略図を図-6 に示す。解析モデルを構築する際には、i) コンクリートを弾性体とし、水の凍結膨張圧によってひび割れ先端に生じる応力がコンクリートの引張強度に達する領域を新たなひび割れ進展長さとする、ii) ひび割れ内部における水の凍結膨張圧は一樣とする、iii) ひび割れの進展方向は初期ひび割れの方と同一とする、との仮定を設けた。水の凍結膨張圧 P (MPa) とひび割れの進展長さ Δd (mm) は、図-6 に示すひび割れ先端部の亀裂エネルギーの釣合いから次式によって近似的に計算できる⁶⁾。

$$\Delta d = \frac{2d}{2(\sigma_t/P)^2 - 1} \quad (4)$$

ここで、 d はひび割れ深さ (mm)、 σ_t はコンクリートの



a) 初期ひび割れ 30mm



b) 初期ひび割れ 50mm

図-7 凍結膨張圧の同定

引張強度 (MPa) である。これより、凍結融解サイクル数 n におけるひび割れ深さ d_n (mm) は、サイクル数 $n-1$ のひび割れ深さ d_{n-1} (mm) を用いて、次式によって算定できる。

$$d_n = d_{n-1} \left\{ 1 + \frac{2}{2(\sigma_t/P)^2 - 1} \right\} \quad (5)$$

次に、水の凍結膨張圧 P を図-5 に示す D2, D3, D4 供試体の 3 体の実験結果から同定する。具体的には、図-5 の実験値と式 (5) の計算値 d_n とを比較し、これらの誤差を最小化する P を最小二乗法によって定めた。その結果、凍結膨張圧 $P=0.28$ MPa のときに、式 (5) と 3 体の実験結果が最も良く整合した。実験結果と式 (5) の比較を図-7 に示す。以上より、凍結膨張圧を 0.28 MPa とした式 (5) を用いて、凍結融解作用に伴うコンクリートのひび割れ進展が予測可能となった。

4. コンクリート部材のひび割れ進展解析

4.1 解析概要

提案式 (5) を用いた凍結融解サイクル n の逐次計算により、凍結融解作用を受けるコンクリート部材のひび割れ進展予測を示す。なお、提案式 (5) は、限定された条件下での凍結融解試験の結果から導出している。このため、計算する際には、i) ひび割れ部は常に水に満たされ

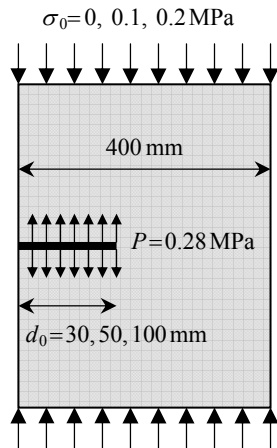


図-8 解析対象

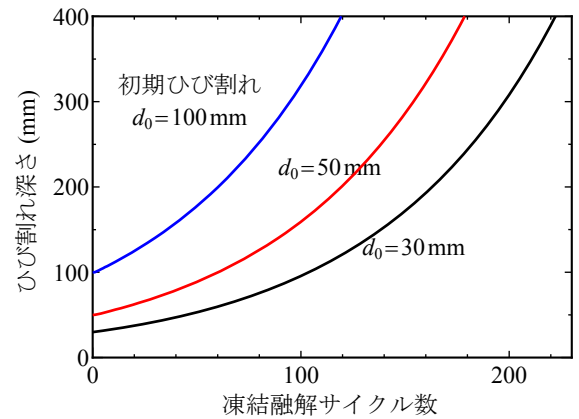
ており、1 サイクルの凍結作用にてひび割れ内部の水が凍結する、ii) 水の凍結膨張圧は凍結融解試験と同様に 0.28 MPa とする、iii) 鉄筋などによる拘束は無視する、との仮定を設けた。なお、本解析では、解析対象地域を特定せずに、凍結融解サイクル数 n をパラメータとして試算した。

解析対象は、図-8 に示すように、圧縮応力 σ_0 が作用し、初期ひび割れ深さ d_0 を有する部材厚さ 400 mm のコンクリート部材とした。解析は 2 次元平面問題として、コンクリートの引張強度 σ_t は 2.85 MPa を仮定した。図-8 のコンクリート部材では、圧縮応力 σ_0 によってひび割れが閉口するため、ひび割れ部には凍結膨張圧 P と逆向きに σ_0 が作用すると仮定する。このため、本解析モデルでは、圧縮応力 σ_0 が 0.28 MPa 以上であればひび割れが進展しない。

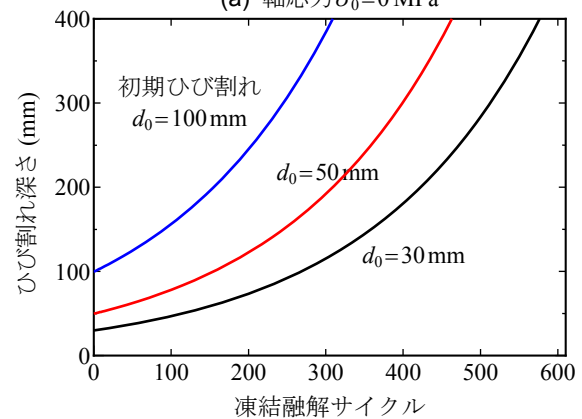
4.2 解析結果

図-8 に示す部材厚さ 400 mm のコンクリート部材に対して、初期ひび割れ深さ d_0 を 30, 50, 100 mm としたひび割れ進展解析を行った。圧縮応力 $\sigma_0=0$ とした解析結果を図-9 (a) に示す。初期ひび割れ深さ d_0 が 100 mm では、30 mm の場合と比較して半分程度のサイクル数でひび割れ深さが部材厚さ 400 mm まで達している。また、初期ひび割れ深さ d_0 を 30 mm とした場合でも、わずか 220 サイクル程度でひび割れ深さが 400 mm に達した。

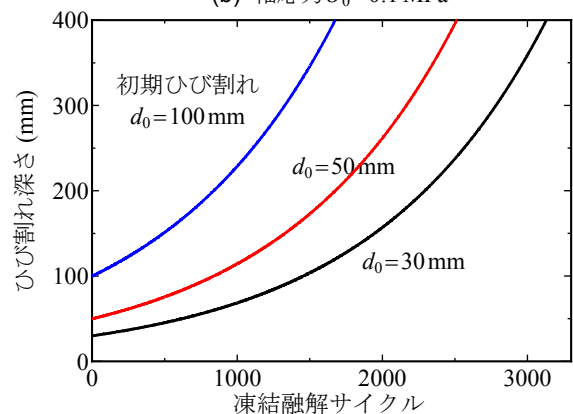
これに対して、図-8 の圧縮応力 σ_0 を 0.1 MPa および 0.2 MPa とした解析結果をそれぞれ図-9 (b) および (c) に示す。圧縮応力 σ_0 がひび割れの開口を抑制するため、図-9 (a) の無拘束の場合と比較して、ひび割れの進展が大きく低減された。特に、図-9 (c) に示す $\sigma_0=0.2$ MPa の場合では、ひび割れ深さ $d_0=30\sim100$ mm に対して、ひび割れ深さが部材厚さ 400 mm に達するまでに 1700～3200 サイクル程度となった。なお、これらの解析でも、初期ひび割れ深さによって、ひび割れが部材厚さまで到



(a) 軸応力 $\sigma_0=0$ MPa



(b) 軸応力 $\sigma_0=0.1$ MPa



(c) 軸応力 $\sigma_0=0.2$ MPa

図-9 ひび割れ進展解析

達する凍結融解サイクルが大きく異なった。

以上より、0.2 MPa 程度の拘束応力によってコンクリート部材のひび割れ進展が大きく抑制される可能性が示唆された。本研究は、基礎的研究として拘束を受けない無筋コンクリートの凍結融解試験を行い、ひび割れ進展モデルを構築したが、今度は鉄筋を配置した供試体や常時荷重を作用させた供試体の凍結融解試験を行い、実験データの収集と解析モデルの拡張を図る必要がある。

5. まとめ

本研究では、初期ひび割れを有するコンクリート供試

体の凍結融解試験を行い，凍結融解作用に伴うコンクリートのひび割れ進展モデルを構築した。また，コンクリート部材のひび割れ進展解析を行い，i) 初期ひび割れ深さがひび割れの進展速度に大きく影響すること，ii) ひび割れ部の水の凍結膨張圧は 0.28 MPa 程度であり，常時軸力や鉄筋などによる拘束応力がひび割れの進展を抑制する可能性があること^{7),8)}，などの知見を得た。

なお，提案モデルは，限定された条件下での凍結融解試験の結果を回帰したものであり，今後，鉄筋などの拘束を含めた広範な供試体諸元や環境条件による検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 例えば，岡本修一，魚本健人：細孔構造からみた凍結融解による劣化機構に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.901-906，1997.7
- 2) 橋口大輔，添田政司，大和竹史：初期に導入したひび割れがコンクリートの耐久性へ及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.729-734，2004.7
- 3) 岡本修一，魚本健人：凍結融解による劣化への初期ひび割れの影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.913-918，1998.7
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書 構造性能照査編，2002.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書 規準編，2005.
- 6) 矢川元基：破壊力学，培風館，1988.
- 7) 田畑雅幸，洪悦郎，鎌田英治：コンクリートの凍害におけるひび割れの役割の考察，日本建築学会構造系論文報告集，No.366，pp.11-17，1986.8
- 8) 杉木六郎：鉄筋コンクリートポールおよびくいに用いるコンクリートの施工方法に関する研究，土木学会論文集，No.88，pp.29-49，1962.12