

論文 繰返し載荷履歴を受けたコンクリートの微細ひび割れと力学特性

中村 拓郎*1・谷口 円*2

要旨: コンクリートの微細ひび割れと力学特性の関係を検討するために、繰返し載荷によって損傷を与えたコンクリートに対して、数 μm 以上のひび割れ幅を有するひび割れの観察と強度試験および静弾性係数試験を実施した。その結果、コンクリートの損傷度を直接的に評価するひび割れ密度と超音波伝播速度に相関があることを確認した。また、ひび割れ密度は、静弾性係数、損失エネルギー、残留ひずみとも相関関係にあり、ひび割れ観察によってコンクリートの状態を評価することで、損傷を受けたコンクリートの力学特性を推定できる可能性が示された。

キーワード: 微細ひび割れ、応力-ひずみ関係、静弾性係数、損失エネルギー、超音波伝播速度

1. はじめに

コンクリート構造物の合理的な維持管理による社会負担軽減のためには、構造物の現状を適切に把握し、将来の構造物の状態や保有性能を予測、評価する技術が求められる。供用期間中の力学作用や環境作用によって生じるコンクリート内部の変化のひとつが微細ひび割れであり、コンクリートの破壊過程や劣化程度と関連深いことが多くの研究者によって報告されている。最知ら¹⁾は、加力によって生じたコンクリート中のひび割れ数がポアソン分布に従う確率変数となることを示すとともに、加力に応じたひび割れの出現状態が予測可能なことを示唆している。また、松村ら²⁾は、凍害を受けたコンクリートで観察される微細ひび割れ本数と相対動弾性係数が対応すること示し、ひび割れ観察による凍害劣化度評価法と劣化の進行予測法を提案している。このように、いくつかの既往研究において、微細ひび割れを評価することによってコンクリートの力学特性や耐久性を評価、予測できる可能性が示されている。

一方、岡田ら³⁾は、供試体に加えられる外力仕事は、供試体に蓄えられる弾性ひずみエネルギーと内部ひび割れの進展や液相内の粘性摩擦などに消費される損失エネルギーになるという考えを示し、エネルギーの観点から含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程を検討している。また、尾上ら⁴⁾は、供試体の変形特性やエネルギー吸収特性に着目し、液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度の低下を説明している。外力によって生じる微細ひび割れの発生と進展がコンクリート内部のエネルギーの変換過程の一部であるとすれば、実際にコンクリート内部に生じている微細ひび割れとコンクリートの変形特性は関連付けられる可能性が高い。

本研究では、数 μm 以上のひび割れ幅を有するひび割

れと最大荷重到達前のコンクリートの力学特性に着目し、繰返し載荷によって損傷を受けたコンクリート供試体に対して、微細ひび割れ観察、超音波伝播速度の計測、強度試験または静弾性係数試験を実施し、損傷を受けたコンクリートの微細ひび割れと力学特性に関する実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

供試体は、普通ポルトランドセメントを使用した呼び強度 24、スランブ 18cm、空気量 4.5%のレディーミクストコンクリートの $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 円柱供試体とした。使用材料を表-1に、コンクリートの配合および練り上がり性状を表-2に示す。コンクリートは、レディーミクストコンクリート工場からトラックアジテータにて輸送し、実験室にて打設した。打設後の供試体は、封かん状態のまま 20°C の恒温室にて養生し、材齢 216 日から 272 日

表-1 使用材料

材料	記号	種類	物性等
セメント	C	普通ポルトランドセメント	密度: 3.16g/cm ³
水	W	地下水	-
細骨材	S	当麻産陸砂	表乾密度: 2.58g/cm ³ 粗粒率: 2.72% 吸水率: 2.17%
粗骨材	G	当麻産碎石	最大粒径: 20mm 表乾密度: 2.65g/cm ³ 実積率: 61.1% 吸水率: 1.48%
混和剤	Ad	AE 減水剤	変性リグニンスルホン酸化合物

表-2 コンクリートの配合と練り上がり性状

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Slump (cm)	Air (%)
		C	W	S	G	Ad		
59.8	50.5	304	182	882	888	3.04	20.5	6.2

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*2 (地独)北海道立総合研究機構 建築研究本部北方建築総合研究所主査(建築保全) 博(工) (正会員)

の間に脱型して各試験を実施した。

2.2 微細ひび割れの導入と実験ケース

(1) 実験ケース

本研究では、繰返し載荷によって導入する微細ひび割れ量を供試体毎に調整するために、繰返し載荷における上限荷重と繰返し載荷数を組み合わせた実験ケースを設定した。上限荷重の決定に際して、3体の基準供試体の圧縮強度試験を実施し、それらの圧縮強度の平均値(38.3N/mm²)を繰返し載荷における上限荷重の基準値とした。上限荷重は繰返し載荷時の作用応力と基準値の比(以下、応力比)で35%、65%、85%の3水準とした。

実験ケースを表-3、表-4に示す。実験ケースIでは、微細ひび割れを有するコンクリートの残存圧縮強度を確認することを目的に、3水準の応力比にて繰返し載荷を1回、5回、10回と行った後、最大荷重まで載荷した。実験ケースIIでは、微細ひび割れとコンクリートの力学特性の関係を確認することを目的に、3水準の応力比にて繰返し載荷を1回、5回、10回、20回、40回と行った後、静弾性係数を計測するために応力比35%まで1回載荷し、その後、微細ひび割れ観察を実施した。なお、応力比85%で繰返し載荷数40回を目標としたF085-39供試体、F085-40供試体は、それぞれ繰返し載荷数39回、40回で所定の応力比に到達する前に最大荷重に到達して破壊した。また、繰返し載荷を実施した供試体とは別に、無載荷の供試体(000-00供試体)と繰返し載荷は行わずに最大荷重まで載荷した供試体(100-01供試体、基準供試体3体を含む)についても微細ひび割れ観察を実施した。

(2) 載荷方法と計測項目

載荷には5000kN自動耐圧試験機を用いた。載荷速度は、繰返し載荷における載除荷行程、圧縮強度および静弾性係数計測の載荷行程のいずれも応力制御で毎秒0.6N/mm²一定とした。なお、繰返し載荷数20回、40回を目標とした載荷では、試験機の自動繰返し載荷機能を利用して下限荷重を基準供試体の圧縮強度の平均値の約3%(1.3N/mm²)に設定し、繰返し載荷数10回に1回程度の頻度で完全に除荷した。

載荷時の測定項目は、荷重、載荷方向の縦ひずみ、載荷直角方向の変位量とした。荷重は耐圧試験機の電圧出力、縦ひずみは供試体高さの1/2の位置に対称線上に専用接着剤で貼り付けたひずみゲージ(検長60mm)のひずみ、載荷直角方向の変位量は供試体中央部を水平方向に挟み込むように設置した2台の接触式ひずみ変換型変位計の出力値とし、データロガーを介して2Hzまたは5Hzで収録した。また、図-1に示すとおり、載荷の前後で載荷直角方向に供試体上端より2cm間隔で9測線の透過法による超音波伝播速度の測定(振動数54kHz、センサー

表-3 実験ケースI：残存圧縮強度の確認

供試体名	載荷条件		標本数(体)
	応力比(%)	繰返し載荷数	
035-01	35	1	3
035-05		5	3
035-10		10	3
065-01	65	1	3
065-05		5	3
065-10		10	3
085-01	85	1	3
085-05		5	3
085-10		10	3

表-4 実験ケースII：微細ひび割れ観察

供試体名	載荷条件		標本数(体)
	応力比(%)	繰返し載荷数	
000-00	-	-	2
100-01	100	-	4
C035-01	35	1	2
C035-05		5	2
C035-10		10	2
C035-20		20	1
C065-01	65	1	2
C065-05		5	2
C065-10		10	2
C065-20		20	1
C085-01	85	1	2
C085-05		5	2
C085-10		10	2
C085-20		20	1
F085-39		39*	1
F085-40	40*	1	

* 繰返し載荷中に最大荷重に到達して破壊

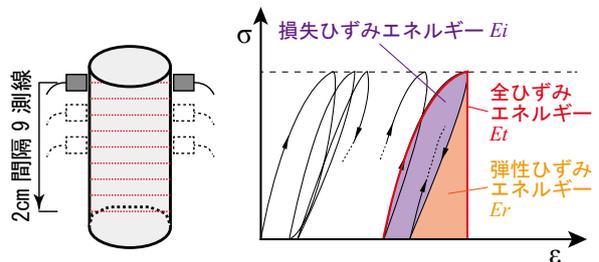


図-1 超音波測定位置 図-2 ひずみエネルギー概念図

径25mm)を行った。

2.3 材料特性値の評価方法

(1) 静弾性係数

本研究における静弾性係数は、荷重から算出した応力と縦ひずみの平均値を用いて式(1)によって算出した。

$$E_c = (S_1 - S_2) / (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (1)$$

ここに、 E_c ：静弾性係数(N/mm²)、 S_1 ：最大荷重の1/3に相当する応力(N/mm²)、 S_2 ：供試体の縦ひずみ 50×10^{-6} のときの応力(N/mm²)、 ϵ_1 ：応力 S_1 によって生じる供試体の縦ひずみ、 ϵ_2 ： 50×10^{-6}

ただし、繰返し載荷中の静弾性係数については、 S_1 は基準供試体の圧縮強度の1/3相当の応力から算出し、下限荷重を設定して自動繰返し載荷を行った供試体では、無載荷の状態からのひずみ 50×10^{-6} の点が不明なため、 S_2 、 ϵ_2 には下限荷重時の応力とひずみを用いた。

(2) ひずみエネルギー

外力によって供試体に加えられたひずみエネルギー E_t は、図-2に示すとおり弾性ひずみエネルギー E_r と損失エネルギー E_i に変換され、これらの関係は式(2)のとおりとなる⁴⁾。

$$E_t = E_r + E_i \quad (2)$$

ここに、 E_t ：全ひずみエネルギー(N・m)、 E_r ：弾性ひずみエネルギー(N・m)、 E_i ：損失エネルギー(N・m)

本研究では、微細ひび割れと損失エネルギーの関係を確認するために、荷重から算出した応力と縦ひずみの平均値から得られる台形面積の総和に供試体体積を乗じて各エネルギーを算出した。なお、下限荷重を設定して繰返し載荷を行った供試体では、下限荷重以上の応力とひずみの値から各エネルギー値を算出した。

2.4 微細ひび割れ観察

(1) ひび割れ観察面の作製

本研究では、載荷後の供試体をコンクリートカッターによって載荷直角方向に上端から8cmの位置で切断した断面をひび割れ観察面とした。また、繰返し載荷を行わずに最大荷重まで載荷した供試体のうち1体(100-01-4供試体)では、供試体上端から4, 8, 12, 16cmの位置でもひび割れ観察を行った。供試体を切断後、観察面を平滑な平面とするために、#80, #320, #800の研磨砂を用いて湿式研磨を行い、その後、超音波洗浄機で観察面を洗浄し、実験室内にて気中乾燥させ、観察面に市販の水性蛍光塗料を塗布した。塗料の硬化後、粗骨材表面の塗料が無くなる程度に再研磨し、再度、超音波洗浄を行った。

(2) 観察方法とひび割れ密度の算出

ひび割れ観察およびひび割れ密度の算出は松村らの手法²⁾に準じて行った。ひび割れ観察時には、観察面に対して紫外線ランプを照射してひび割れに残った蛍光塗料を際立たせ、画面上の倍率が約240倍となるカメラを搭載した顕微鏡を用いて測線上を横切るひび割れ本数を数えた。観察面の代表性についてはASTM C457/C457M-12のリニアトラバース法の骨材最大寸法による測線長と測定面積の考え方を準用し、本研究では側線間隔を3mmとした測線を設定し、1断面における総測線長を

2413mm以上とした。また、供試体毎のひび割れ量を評価するために、観察から得られたひび割れ本数と総測線長を用いて式(3)からひび割れ密度を算出した。

$$C_n = N/L \quad (3)$$

ここに、 C_n ：ひび割れ密度(本/mm)、 N ：測線を横切るひび割れの総本数(本)、 L ：総測線長(mm)

3 実験結果と考察

3.1 繰返し載荷による力学特性の変化

(1) 応力-ひずみ曲線

応力比35%, 65%, 85%で繰返し載荷を10回行った供試体と応力比85%で繰返し載荷39回目に最大荷重に到達した供試体の応力-ひずみ曲線を一例として図-3に示す。実験ケースI, IIを通じた全体的な傾向として、繰返し載荷数が増えるにつれて、上限荷重時のひずみと残留ひずみは増加し、また、上限荷重が大きくなるほど上限荷重時のひずみと残留ひずみの増加量が大きくなる傾向が認められた。繰返し圧縮応力を受けたコンクリートの応力-ひずみ曲線は、上に凸の曲線から次第に直線状に変化し、最終的には下に凸の曲線に変化することを多くの研究者が確認しており⁵⁾、本研究においても応力比が大きいほどその傾向は顕著に現れていた。

(2) 残存圧縮強度と静弾性係数

基準供試体および繰返し載荷後の残存圧縮強度と静弾性係数を表-5に示す。なお、表中の値は供試体3体の平均値である。繰返し載荷を行った供試体の残存圧縮

表-5 残存圧縮強度と静弾性係数

供試体名	応力比 (%)	繰返し載荷数	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
基準供試体	-	なし	38.3	25.1
035-01	35	1	36.9	26.0
035-05		5	36.5	26.1
035-10		10	35.8	25.9
065-01	65	1	37.9	24.7
065-05		5	37.4	23.1
065-10		10	38.2	21.8
085-01	85	1	38.6	22.0
085-05		5	38.4	18.7
085-10		10	38.5	19.4

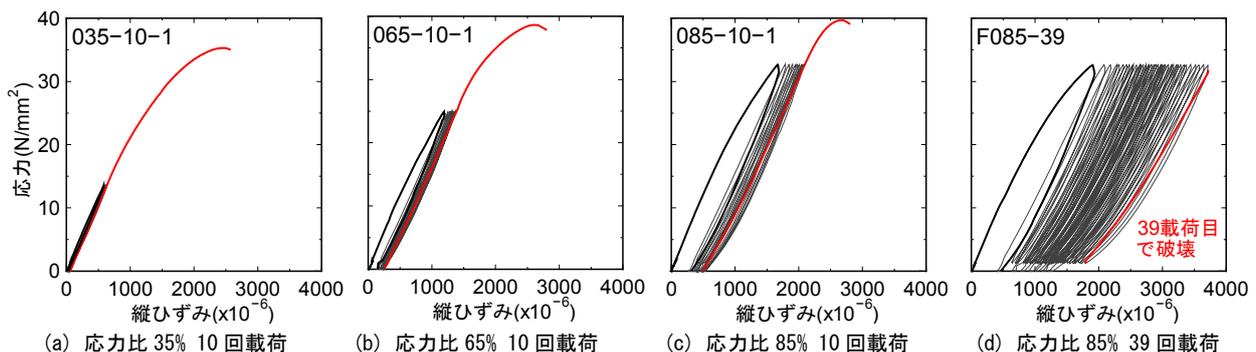


図-3 応力-ひずみ曲線の一例

強度は、応力比 35%の供試体でやや小さめの値を示しているものの、応力比 65%、85%の供試体では基準供試体と同程度となっており、実験ケース I の荷重条件の範囲内では、繰返し荷重による顕著な強度低下は認められなかったと判断した。小柳ら⁹⁾は、内部組織の変化に関わらず、ある限界まではその荷重方向の荷重履歴後の残存圧縮強度には低下が認められなかったと報告しており、白川ら⁷⁾は、疲労寿命と比較してかなり少ない繰返し荷重数では荷重方向に平行な残存強度はやや増加すると報告している。本研究においても、10 回程度の少ない繰返し荷重では明確な強度低下は認められなかった。

一方、静弾性係数は、応力比が大きく、繰返し荷重数が多いほど明らかに低下する傾向を示している。繰返し荷重を 20 回まで実施した供試体と応力比 85%で繰返し荷重数 39 回時に破壊した供試体の荷重 1 回目の静弾性係数に対する比(以下、静弾性係数比)の変化を図-4 に示す。応力比 35%では、静弾性係数に大きな変化が認められないものの、応力比 65%では荷重 1 回目に静弾性係数が 1 割程度低下し、その後、ほぼ同程度の値を示している。また、応力比 85%では、荷重初期に静弾性係数が大きく低下し、荷重数の増加とともに緩やかに低下する傾向が認められた。こうした静弾性係数の変化は、応力比や繰返し荷重数に応じたコンクリート中の微細ひび割れの発生、進展に起因していると考えられる。

(3) 繰返し荷重による損失エネルギーの変化

繰返し荷重を 20 回まで実施した供試体と応力比 85%で繰返し荷重 39 回時に破壊した供試体の損失エネルギーの変化を図-5 に示す。応力比 35%の供試体では、損失エネルギーも微小であり、繰返し荷重中の変動も認められない。応力比 65%、85%の供試体では、荷重 1 回目の損失エネルギーが大きく、その後、ある一定値に収束していく傾向を示した。また、応力比 85%の繰返し荷重で破壊に至った F085-39 供試体では、荷重 30 サイクル以降で損失エネルギーの微増が認められた。実験ケース I、II を通じた全体的な傾向として、応力比に応じて初回の損失エネルギー、収束後の損失エネルギーも大きくなる傾向が確認され、この傾向は既往の知見^{3),4)}と一致する。

(4) 繰返し荷重による供試体の破壊

応力比 85%で目標繰返し荷重数前に破壊した F085-39 供試体と F085-40 供試体における繰返し荷重数と上限荷重時のひずみの関係を図-6 に示す。なお、横ひずみは、供試体直径を基準長として荷重直角方向の変位量から算出している。どちらの供試体も荷重初期にひずみの増加量が安定し、その後、荷重数 30 回付近で、ひずみの増加量が大きくなる傾向を示しており、その傾向は横ひずみにおいて顕著になっている。本研究では明確な区分を行っていないが、既報⁴⁾にて確認されているような疲労破

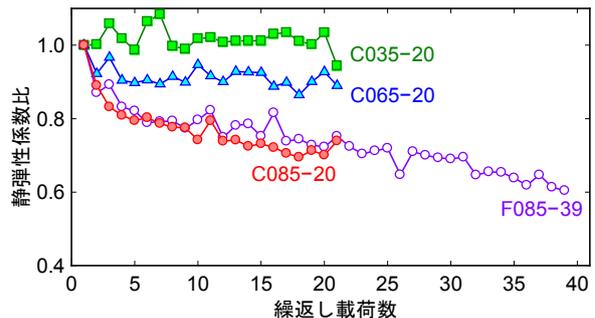


図-4 繰返し荷重による静弾性係数比の低下

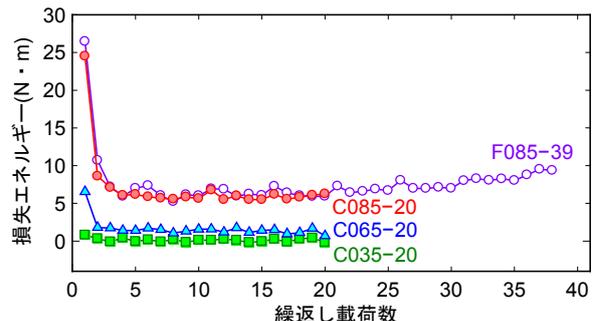


図-5 繰返し荷重による損失エネルギーの変化

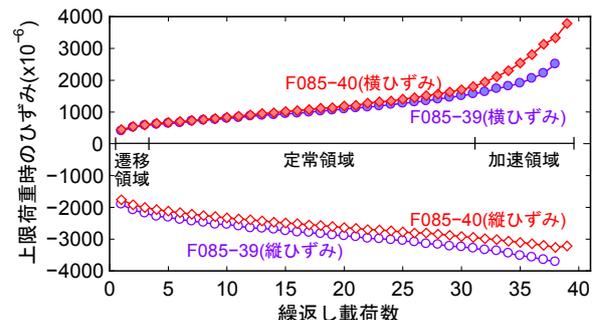


図-6 繰返し荷重による上限荷重時のひずみの変化

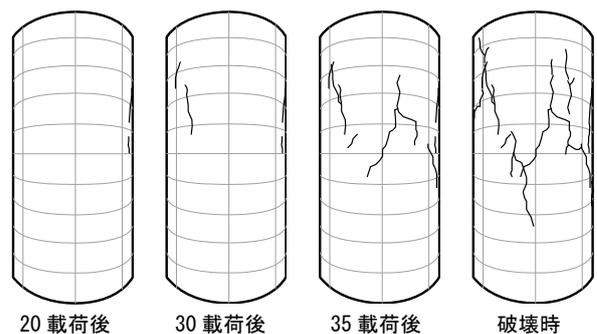


図-7 繰返し荷重数と表面ひび割れ (F085-40 供試体)

壊過程におけるひずみの遷移領域、定常領域、加速領域と思われる領域の存在が認められた。

次に、F085-40 供試体の荷重中に目視確認できた供試体表面のひび割れ性状を図-7 に示す。繰返し荷重数 30 回程度までは、供試体表面のひび割れはほぼ認められなかったが、荷重数 30 回以降では、繰返し荷重にともなって供試体表面のひび割れの発生が顕著となり、前述したひずみが増大する時期と概ね一致する。なお、F085-39 供試体、F085-40 供試体以外の供試体では、繰返し荷重中の

供試体表面でのひび割れは目視確認できなかった。

3.2 微細ひび割れと損傷度および力学特性との関係

(1) 微細ひび割れの発生状況

微細ひび割れ観察における観察面の一例を図-8に示す。観察を行ったいずれの供試体においても、骨材界面およびペースト中に数 μm から 1/10mm 程度のひび割れ幅を有するひび割れを観察することができた。また、無荷荷の供試体においても微細ひび割れは観察され、外力を受けていないコンクリート内部にもひび割れが存在するという既報¹⁾²⁾と一致する。本研究ではひび割れ幅やひび割れ位置などの定量的な確認は行っていないことから観察者の主観となるが、応力比が大きい供試体ほど骨材界面のひび割れは大きくなり、ペースト中へのひび割れの進展やその拡幅も認められ、供試体の外周部ほどひび割れが顕著となる傾向が確認された。

(2) 超音波伝播速度比とひび割れ密度の関係

荷重前後の超音波伝播速度の比(以下、超音波伝播速度比)の分布の一例を図-9(a)に示す。応力比 35%で繰返し荷重を 20 回受けた供試体では超音波伝播速度に低下は認められず、応力比 65%の供試体では約 5%~10%の低下が確認された。また、応力比 85%で繰返し荷重を受けた供試体では、繰返し荷重数 10 回で約 10%の低下、繰返し荷重数 20 回では約 40%の低下、破壊時には約 60%も低下する箇所が認められた。

最大荷重まで荷重を行った 100-01 供試体のうち 1 体(100-01-4 供試体)の超音波伝播速度比とひび割れ密度の分布を図-9(b)に示す。繰返し荷重によって破壊に至った F085-39 供試体, F085-40 供試体を含めた圧縮破壊後の供試体では、供試体上下方向で超音波伝播速度比に分布が認められ、供試体中央よりも上端側の超音波伝播速度比の低下が著しくなる傾向となった。これは、前述の供試体表面でのひび割れ発生位置と概ね一致する。また、微細ひび割れ観察から得られたひび割れ密度と超音波伝播速度比の供試体上下方向での分布を比較すると、概ね同様の分布となった。

次に、本研究で微細ひび割れ観察を実施したすべての供試体におけるひび割れ観察断面位置での超音波伝播速度比とひび割れ密度の関係を図-10に示す。ひび割れ密度が大きくなるほど超音波伝播速度比は低下する傾向が認められ、コンクリートの損傷度を直接的に評価するひび割れ密度と超音波伝播速度には良好な相関があることが明らかになった。

(3) ひび割れ密度と損傷度および力学特性の関係

残留ひずみとひび割れ密度の関係を図-11に示す。荷重方向の縦ひずみ、荷重直角方向の横ひずみともに、ひび割れ密度が大きくなるほど残留ひずみが大きくなる関係が確認された。残留縦ひずみはひび割れ密度に対して

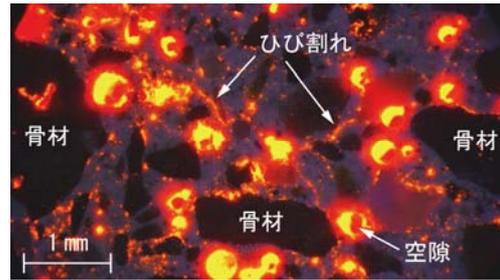


図-8 ひび割れ観察例(C085-10 供試体)

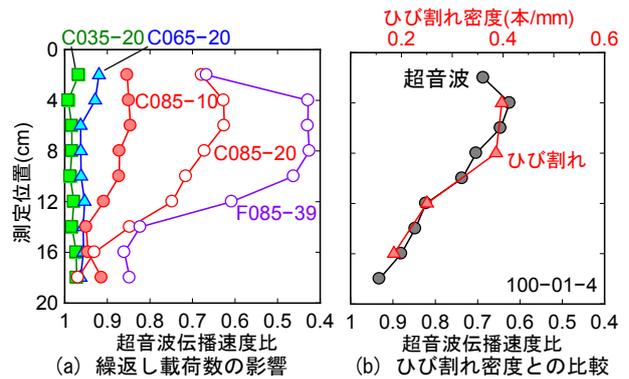


図-9 荷重後の超音波伝播速度比の分布

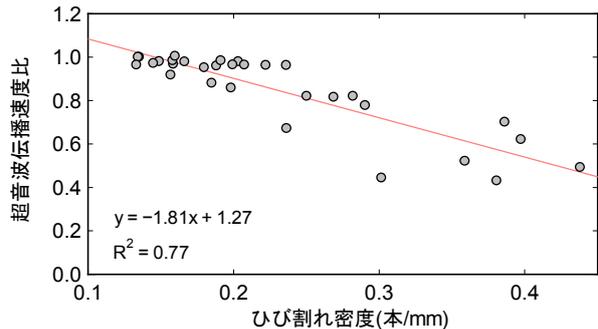


図-10 超音波伝播速度比とひび割れ密度の関係

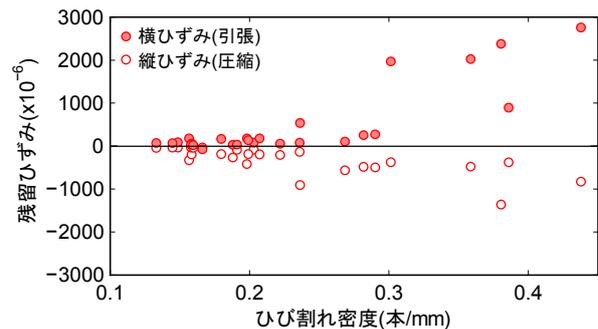


図-11 残留ひずみとひび割れ密度の関係

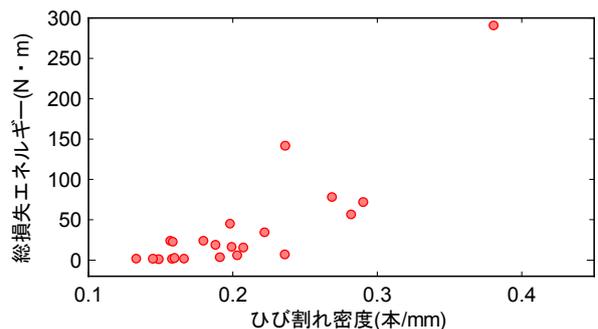


図-12 総損失エネルギーとひび割れ密度の関係

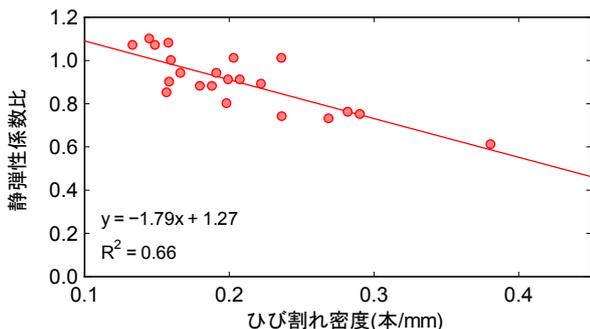


図-13 静弾性係数比とひび割れ密度の関係

ほぼ直線的に分布し、残留横ひずみはひび割れ密度が約 0.2 本/mm 以上で大きく増加した。次に、総損失エネルギーとひび割れ密度の関係を図-12 に示す。残留横ひずみと同様にひび割れ密度が約 0.2 本/mm 以上となるときに総損失エネルギーも増加する傾向が認められた。損傷度が大きくなると微細ひび割れの発生、進展にエネルギーが消費される割合が大きくなり、ある限界点以降でひび割れが拡大していくものと推察される。なお、本研究におけるひび割れ密度には、ひび割れの長さ、幅、分布は考慮されていない。このため、コンクリートの損傷度が大きくなるほど、これらの影響が顕著となり、ひび割れ密度と残留ひずみや損失エネルギーとの相関性が低下し、そのばらつきが大きくなったと考えられる。

最後に、静弾性係数比とひび割れ密度の関係を図-13 に示す。ひび割れ密度が大きくなるほど静弾性係数は低下する傾向を示しており、コンクリート内部の微細ひび割れの発生と進展が、コンクリートの静弾性係数に大きく影響を及ぼすことを示している。ただし、谷口ら⁸⁾は繰返し載荷を最大荷重到達前で行った供試体に比べて最大荷重到達以降に行った供試体ではひび割れ密度に対して静弾性係数比が著しく低下することを報告しており、最大荷重以降の圧縮軟化域を含めたひび割れ密度と力学特性の関係については、今後、更なる検討が必要である。

以上の実験結果から、ある程度のばらつきは認められたものの、微細ひび割れ観察から得られるひび割れ密度によってコンクリートの状態を評価することで、損傷を受けたコンクリートの力学特性を推定できる可能性が示された。ただし、微細ひび割れを有するコンクリートの力学特性や耐久性とひび割れ状態を精度よく関連付けるためには、ひび割れの長さ、幅、分布等の影響やひび割れの経時変化について検討する必要がある。

4 まとめ

本研究では、繰返し載荷によって損傷を受けたコンクリートの微細ひび割れと力学特性の関係を検討した。本研究で得られた成果は次のとおりである。

(1) 圧縮強度を基準とした 3 水準の上限荷重での繰返し

載荷の結果、圧縮強度の低下が認められなかった供試体においても、応力比が大きく、繰返し載荷数が多いほど、静弾性係数が低下する傾向が認められた。

- (2) 繰返し載荷によって圧縮破壊に至る場合、損失エネルギーやひずみが増大する点が存在し、これは供試体表面のひび割れが顕在化する点と概ね一致した。
- (3) 微細ひび割れ観察によってコンクリートの損傷度を直接的に評価するひび割れ密度と超音波伝播速度に相関が認められた。
- (4) 微細ひび割れ観察から得られるひび割れ密度は、繰返し載荷を受けるコンクリートの静弾性係数比、総損失エネルギー、残留ひずみと相関関係にあることを確認した。
- (5) ひび割れ観察によってコンクリートの状態を直接的に評価することで、損傷を受けたコンクリートの力学特性を推定できる可能性が示された。

参考文献

- 1) 最知正芳, 四戸英男, 三橋博三: 外力によるダメージを受けたコンクリートに生じる微細き裂の分布特性について, コンクリート工学論文集, Vol.12, No.1, pp.75-87, 2001.1
- 2) 松村 宇, 桂 修, 吉野利幸: 凍害を受けたコンクリートの性状と劣化度評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 563 号, pp.9-13, 2003.1
- 3) 岡田 清, 小柳 治, 六郷恵哲: 含水量の異なるコンクリートの圧縮破壊過程に関するエネルギー的考察, 土木学会論文報告集, 第 248 号, pp.129-136, 1976.4
- 4) 尾上幸造, 松下博通: 液体浸漬によるコンクリートの圧縮疲労強度低下に関するエネルギー的考察, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.2, pp.166-178, 2010.4
- 5) 例えば, 吉川弘道, 大井祥之, 丸本 智: 繰返し圧縮荷重を受けるコンクリートの強度劣化と鉄筋コンクリート部材の信頼性解析, 土木学会論文集, No.520, V-28, pp.55-65, 1995.8
- 6) 小柳 治, 六郷恵哲, 鄭 貴斗: 高荷重載荷履歴とコンクリートの破壊, 土木学会第 28 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, pp.179-180, 1973
- 7) 白川淳一, 松下博通: 繰返し荷重をうけたコンクリートの残存強度に関する研究, 土木学会第 33 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部門, pp.313-314, 1978
- 8) 谷口 円, 桂 修, 伊庭千恵美: 繰返し載荷によるコンクリート内部の微細ひび割れと力学特性, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.487-488, 2012.9