

論文 初期ひび割れ角度がコンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響評価

南里 卓洗*1・中村 光*2・三浦 泰人*3・山本 佳士*4

要旨：本研究では、圧縮主応力方向と垂直な面に対して 8 パターンの角度を有する初期ひび割れを 1 本導入した角柱供試体を用いて、初期ひび割れ角度がコンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響を実験的に評価した。その結果、ひび割れ角度が 0°~30°の範囲においては、初期のひび割れ幅が大きい場合においても、圧縮強度の低減はわずかであり、圧縮破壊エネルギーは低減しないこと、ひび割れ角度が 45°~90°の範囲においては、初期のひび割れ幅が小さい場合においても、圧縮強度・圧縮破壊エネルギーともに減少すること、また、ひび割れ角度が大きいものほどその減少率が大きいことが明らかとなった。

キーワード：初期ひび割れ、ひび割れ角度、圧縮強度、圧縮破壊エネルギー、圧縮軟化、破壊領域

1. はじめに

コンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーなどの力学パラメータは、既存ひび割れの影響を受けると考えられる。圧縮強度については、Collins et al.¹⁾や宮原ら²⁾による、分散したひび割れを有する板状部材を用いた実験によりその影響が明確にされ、平均ひずみを用いた圧縮強度低減を表す式が提案されている。著者ら³⁾は、少数本のひび割れを導入した円柱・角柱供試体を用いて、柱、梁、棒部材などのように、中実である程度の断面積があり、ひび割れが規則的に分布しない場合においても、初期ひび割れが圧縮強度に及ぼす影響を、ひび割れ幅指標によって評価できることを示した。圧縮破壊エネルギーについては Nakamura et al.⁴⁾や Lertsrisakulrat et al.⁵⁾によって実験的に検討されており、Nakamura et al.⁴⁾の研究では、圧縮破壊エネルギーは供試体の形状・寸法によらず、圧縮強度の関数で表されることが示され、その算定式が提案されている。また、著者ら³⁾は、軸方向の少数の初期ひび割れによって圧縮破壊エネルギーが減少することを示し、ひび割れ幅指標を用いて定量的に評価した。

しかし、RC 梁に繰返しせん断力が作用する場合⁶⁾や、乾燥収縮や温度応力、せん断補強筋の腐食による初期ひび割れが存在する場合に、せん断力を受ける際⁷⁾には、圧縮主応力方向と初期ひび割れの発生方向が一致していない場合も少なくないと考えられるが、コンクリートの圧縮強度や圧縮破壊エネルギーに初期ひび割れ角度が及ぼす影響については十分な知見が得られていない。また、数値解析においては、ひび割れ面方向で座標系を設定し、多軸応力下では、主応力方向はひび割れ面と異なる方向となり、ひび割れ座標系と主応力方向の相違の影響を考

慮すべきと考えられる。しかし、初期ひび割れによる圧縮強度・圧縮破壊エネルギーの低減は、ひび割れを含む平均ひずみにより評価されており、ひび割れ角度の影響は考慮されていない。構造物は、ひび割れ発生位置で圧縮破壊することも多く、コンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに既存ひび割れが及ぼす影響のより詳細な解明が望まれている。

そこで本研究では、柱・梁部材などに、圧縮主応力方向と異なる角度の、比較的少数の支配的な初期ひび割れが発生した状態で圧縮破壊する場合を対象とし、角柱供試体にひび割れ角度を変えた初期ひび割れを導入し、既存ひび割れ角度が圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響を実験的に評価した。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体概要を表-1 に、実験の流れを図-1 にそれぞれ示す。供試体は、圧縮破壊領域が供試体長さより短くなることを想定し、断面高さ比が 3 である、断面 100×100mm、高さ 300mm の角柱供試体とした。導入した初期ひび割れは、柱、梁、棒部材などの中実な部材に、主応力方向と異なる角度で存在する、少数本の支配的なひび割れを想定している。そのため、初期ひび割れは 1 本とし、その角度は、主応力方向と垂直な平面に対して 0°、15°、30°、45°、60°、66°、72°、90°とした。なお、初期ひび割れ角度 90°のケースは、著者らが既往の研究³⁾において示した角柱供試体の結果であり、コンクリートの配合が他のケースと異なっている。

初期ひび割れは、すべて割裂試験を用いて導入した。

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博(工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 博(工) (正会員)

*4 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博(工) (正会員)

図-1(a)に示すように、供試体を上下から挟むように丸鋼を設置し、2本の丸鋼と供試体の長軸方向に角度をつけることにより、角度の異なる初期ひび割れを導入した。

供試体以外はすべて、早強セメントを用い、初期ひび割れ角度90°のケースを除きすべて、表-2の示方配合をもとに、鋼製型枠の載荷面と直行する面から打設した。材齢2日で脱型後、14日間の水中養生を行い、室温20°C、湿度80%の恒温室に24時間静置した後、載荷を行った。

2.2 載荷および計測方法

初期ひび割れ導入後、載荷面以外の4面において、図-1(b)に示すように、横方向に33mm間隔で計測点を設定した。各計測点におけるひび割れ幅を、クラックスケールを用いて測定し、その平均値を平均ひび割れ幅として記録した。

供試体の設置時には、一軸圧縮状態を精度よく再現するため、供試体端面と載荷版の間に、2枚のテフロンシート（厚さ0.05mm）の間にシリコングリスを塗布した摩擦低減シートを挿入した。載荷は、2000kN高剛性荷重制御型試験機を用い、図-1(d)に破線で示すように、最大応力到達と同時に除荷を開始する、漸増変位一方向繰返し載荷（載荷・除荷速度 $0.6 \pm 0.4 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$ ）とした。各載荷サイクル内の最大応力が、各供試体の圧縮強度の20%まで低下した点を終局とし、載荷を終了した。変位の測定は、図-1(c)のように供試体下面と同じ平面に設置した4つの変位計により行い、上下の鋼板間の変位を測定し、その平均値を供試体変位とした。載荷中は、4つの変位計の値を注視し、その最大値と最小値の差が0.1mm以上（本研究においては、約 333μ ）となった供試体は、偏心破壊と判断し、使用していない。

供試体のひずみは、供試体変位と載荷前に計測した供試体高さを用いた平均ひずみとして算出した。ポストピーク領域においては、図-1(d)に実線で示すように各載荷履歴の包絡線を応力-変位（ひずみ）曲線とした。

圧縮破壊エネルギーは、平井ら⁸⁾によって提案された、

表-1 実験ケース

初期ひび割れ		供試体数		
本数	角度	ピークまで	終局まで	せん断破壊系
0	—	5	5	—
1	0	3	3	—
	15	2	2	—
	30	3	3	—
	45	3	3	—
	60	2	2	1
	66	—	—	1
	72	—	—	2
90	7	3	—	

表-2 示方配合

W/C	単位量(kg/m ³)						
	W	C	S	G(mm)			AE 剤
				5-10	10-15	15-20	
0.6	175	291	802	282	376	282	0.8

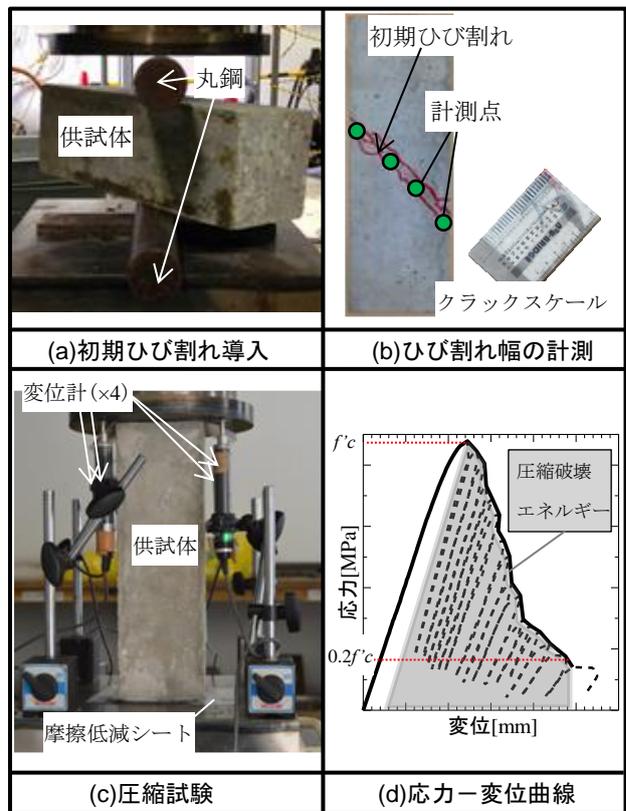


図-1 本実験の流れ

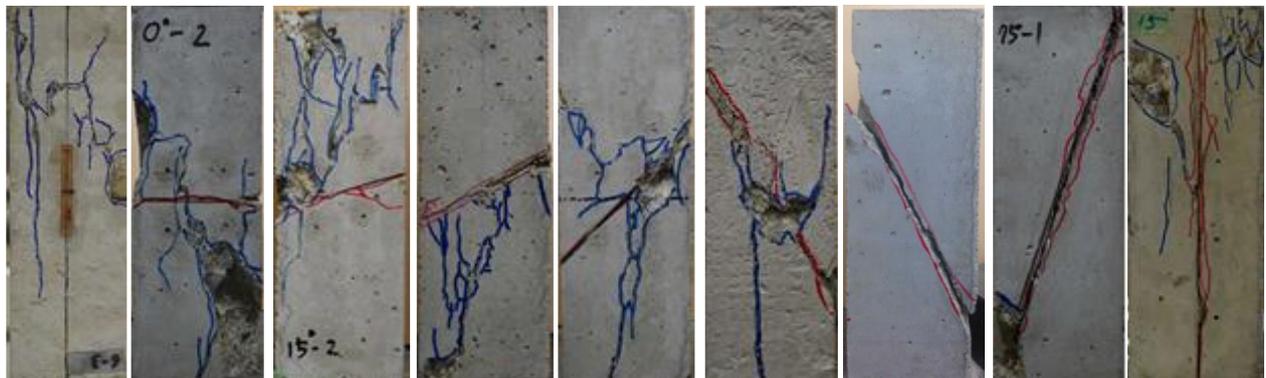


図-2 初期ひび割れ各角度ケースのひび割れ性状

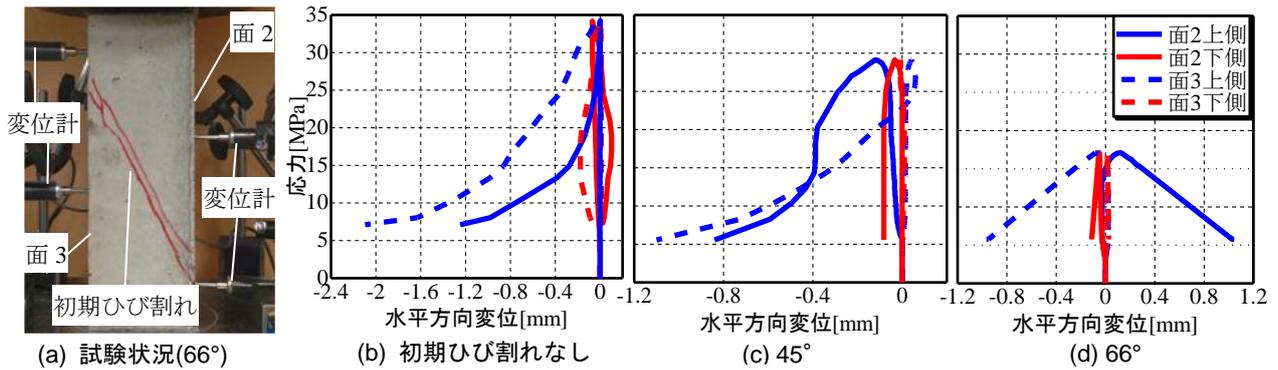


図-3 水平変位-応力関係

弾性挙動を含む一回目の荷重・除荷履歴を除いた終局点までの応力-変位曲線下の面積（図-1(d)における灰色部分の面積）として算出した。

2.3 異なる角度の初期ひび割れを有するコンクリートの破壊形態評価

(1) ひび割れ性状

供試体の終局時におけるひび割れ性状をひび割れ角度別に図-2に示す。赤線は導入した初期ひび割れ、青線は圧縮応力作用下で生じたひび割れをそれぞれ示している。これをみると、図-2(a)に示す初期ひび割れを導入していない供試体は、既往の研究⁴⁾と同様、ひび割れが発生している領域が局所化していることが確認される。図-2(b)に示す初期ひび割れ角度 0°の供試体は、初期ひび割れをまたぐ形で圧縮荷重によるひび割れが発生していることが分かる。図-2(c)~(f)に示す初期ひび割れ角度 15°、30°、45°、60°の供試体は、初期ひび割れを挟んで上側、下側のいずれか片側のみに圧縮荷重によるひび割れが集中する傾向であることが分かる。また、初期ひび割れ角度 90°の供試体では、初期ひび割れを挟む形で圧縮破壊領域が局所化していることが分かる。

図-2(g)、(h)に示す初期ひび割れ角度 66°および 72°の供試体は、青で示す圧縮応力下で発生したひび割れが発生していない。また、初期ひび割れ角度 60°の供試体においても、計3体用意した内の1体で、これらと同様、圧縮応力下におけるひび割れの発生が全く確認されなかったものがあった。また、ここでは示していないが、これらの供試体の初期剛性および最大応力は、初期ひび割れがない供試体の 40%程度と他の供試体に比べ極端に小さくなっていった。このことから、これらの供試体は、他の供試体と破壊形態が異なり、初期ひび割れ面を界面としたせん断型の破壊となったことが推察される。

(2) 圧縮応力下における水平方向変位

ひび割れ性状から、一般的な圧縮破壊とともに、ひび割れ面でのせん断すべり破壊も観察されたため、圧縮応力下における供試体の水平方向変位を測定し、破壊モードの相違を定量的に評価した。ここでは、初期ひび割れ

なし、初期ひび割れ角度 45°（平均ひび割れ幅 0.29mm）、および圧縮応力下におけるひび割れが発生しなかった、初期ひび割れ角度 66°（平均ひび割れ幅 0.18mm）の3つの供試体を用いる。初期ひび割れのある2つの供試体では、図-3(a)のように、初期ひび割れが水平方向に観察される対面となる2面（面2、面3とする）において、ひび割れによって隔たれている上下各領域の中央の点を計測点とし、変位計を水平に設置した。初期ひび割れなしの供試体は、向かい合う1組の面において、高さ方向に100mm間隔で計測点を設定し、変位計を設置した。

各供試体の応力-水平変位関係を、引張変形の方角を正として図-3(b)~(d)にそれぞれ示す。それぞれのピークまでは、図-3に示すすべての供試体において水平変位がほとんど出ていないことが分かる。ポストピーク領域では、図-3(b)、(c)に示す、初期ひび割れのない供試体および初期ひび割れ角度 45°の供試体は、各荷重サイクル内の最大応力付近で、青で示す上側の変位計の値がともに減少し、赤で示す供試体下側の変位はほとんどでていないことが分かる。これは、いずれの供試体も、供試体上側が破壊局所化領域となり、横方向に膨らんだためと考えられる。一方、初期ひび割れ角度 66°の供試体は、各荷重サイクル内の最大応力付近で、図-3(d)に青線で示す供試体上部の変位が、一方は増加し、もう一方は減少していることがわかる。さらに、両者の変位量の絶対値がほとんど同じであることから、この供試体は他2体の供試体とは異なり、圧縮破壊ではなくすべりを伴うせん断によって破壊していることが明らかとなった。

また、この供試体と同様に、ひび割れ界面でせん断破壊をしてしまったと考えられる供試体は、表-1に示すように、ひび割れ角度 60°、66°で各1体、72°で2体あった。なお、初期ひび割れ角度 60°の供試体でせん断型の破壊をしてしまった供試体の平均ひび割れ幅が 0.74mmであり、圧縮破壊をした供試体はともに、平均ひび割れ幅が 0.5mm以下であったことから、初期ひび割れ角度が 60°程度の領域においては、その平均ひび割れ幅に応じて破壊形態も変わる可能性が示唆された。しかし、このよ

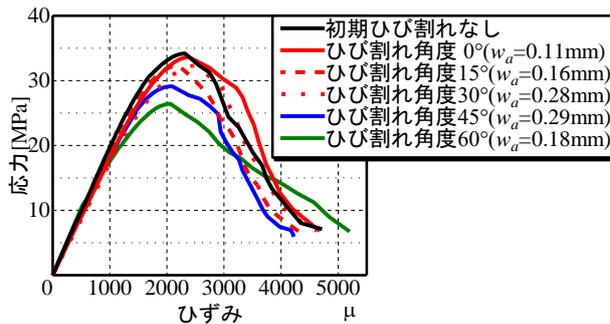


図-4 応力-ひずみ関係

うな破壊形態は、本研究の対象ではないため、以下では、表-1 に示す圧縮破壊をした供試体についてのみ論じることとする。

3. 角度の異なる初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮応力下における挙動

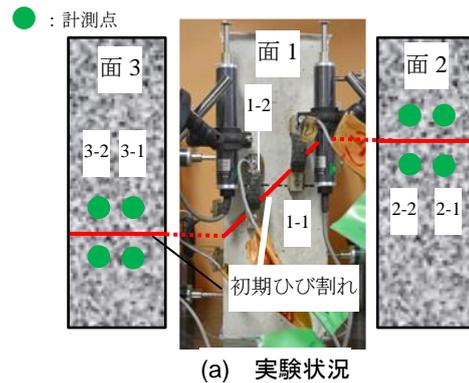
3.1 応力-ひずみ関係

本研究で得られた初期ひび割れ角度 0° , 15° , 30° , 45° , 60° の供試体および初期ひび割れを導入していない供試体の応力-ひずみ関係の 1 部を図-4 に示す。初期ひび割れを導入した供試体は、その平均ひび割れ幅の近いものを抽出している(平均ひび割れ幅はそれぞれ、0.11, 0.16, 0.28, 0.29, 0.18mm)。なお、初期ひび割れ角度 90° の供試体は、他の供試体とコンクリートの配合が異なり、初期ひび割れのない供試体の圧縮強度が異なるため、掲載していない。また、いずれの供試体においても、荷重開始後、テフロンシートの影響がなくなる 7MPa 時点、および 10MPa 時点のひずみ量をもとに初期剛性を算出し、補正を施している。そのため、後述する図-5 で示す初期ひび割れの閉じ量から得られたひずみは、図-4 には含まれていない。

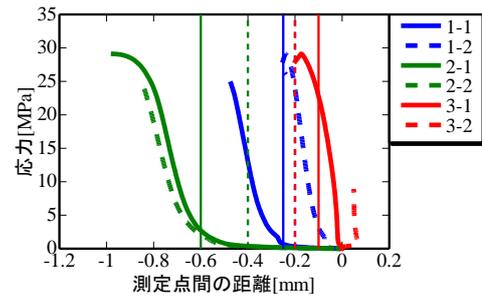
図-4 をみると、初期ひび割れのない供試体に比べ、赤で示す初期ひび割れ角度 0° , 15° , 30° の供試体では、圧縮強度の低減は明確には確認されず、ポストピークにおいても概ね同様の曲線となっている。一方、青、緑で示す初期ひび割れ角度 45° , 60° の供試体では、圧縮強度の低下が確認され、ポストピークの勾配が緩やかになっていることがわかる。このことから、初期ひび割れ角度は、コンクリートの圧縮強度、圧縮破壊エネルギーに影響を及ぼし得る重要な要因であると考えられる。

3.2 圧縮応力下における初期ひび割れの挙動

圧縮応力下における初期ひび割れの挙動を評価する。ここでは、図-4 に示した初期ひび割れ角度 45° の供試体(平均ひび割れ幅 0.29mm)を用いる。図-5(a)に示すように、初期ひび割れが斜め方向に観察される面(面 1 とする)、および水平方向に観察される、向かい合う 2 面(面 2, 面 3 とする)の計 3 面を計測面とした。各計測面にお



(a) 実験状況



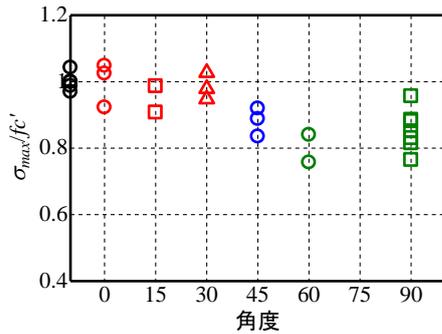
(b) 実験結果

図-5 圧縮応力下における初期ひび割れの挙動

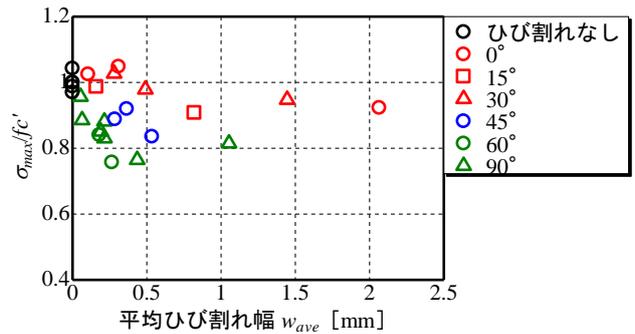
いて、初期ひび割れのひび割れ幅計測点上に、ひび割れを供試体高さ方向にまたぐように 50mm π 型ゲージをとりつけ、ひび割れ幅の推移を計測した。各面向かって右側、左側のゲージをそれぞれゲージ 1、ゲージ 2 とし、(面番号 - ゲージ番号) と称する。ひび割れ幅-応力関係をひび割れが閉じる方向を負として図-5(b)に示す。荷重途中でゲージが外れてしまったものは、外れる直前までの結果を示しており、圧縮荷重開始時のひび割れ幅を 0 として示している。各計測点のひび割れ幅は、計測点 1-1 から順に 0.25, 0.2, 0.6, 0.4, 0.1, 0.2mm であり、図-4 中に同色・同種の細い線で併せて示している。

これより、複数の計測点において、荷重がかかり始める段階で初期のひび割れ幅を超えていること、すなわち、初期ひび割れが閉じきった直後から荷重が上がり始めていることが分かる。なお、同段階において、ひび割れが大きく閉じる挙動を示した面 2 の、対面である面 3 では、ひび割れの動きがごく小さい、もしくは広がる方向に推移している。これは、初期ひび割れによる供試体のゆがみが矯正されたためと考えられる。

荷重が上がり始めてからピークまでの段階においては、ひび割れが閉じる挙動だけでなく、計測点間のコンクリート部の圧縮分も含まれるため、すべての計測点において、ひび割れが閉じる方向に推移している。ただ、その挙動は一様ではなく、赤で示すひび割れが比較的小さい面 3 に比べ、緑で示す初期ひび割れ幅が比較的大きい面 2 では、その傾きが緩やかであり、ピーク付近における変形量が大きいことが見て取れる。図-2(b)-(f)に示した

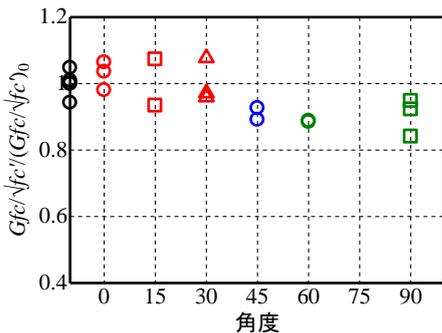


(a) ひび割れ角度と圧縮強度の関係

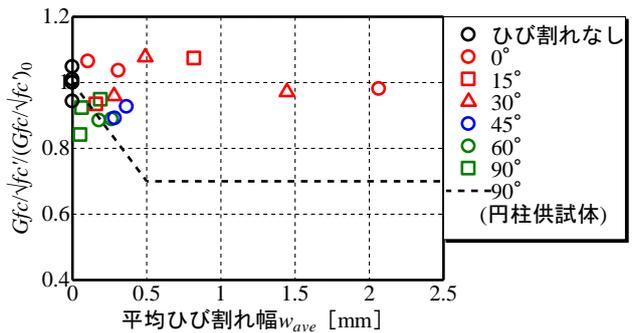


(b) 平均ひび割れ幅と圧縮強度の関係

図-6 初期ひび割れ角度が圧縮強度に及ぼす影響評価



(a) ひび割れ角度と圧縮破壊エネルギーの関係



(b) 平均ひび割れ幅と圧縮破壊エネルギーの関係

図-7 初期ひび割れ角度が圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響評価

ように、初期ひび割れ周辺に圧縮応力によるひび割れが発生する傾向にあること、図-4 に示したように、初期ひび割れ角度 45°、60°の供試体では圧縮強度が低下していることも考慮すると、見かけ上初期ひび割れが閉じた後であっても、初期ひび割れはコンクリートの圧縮性能に影響を及ぼしていること、また、そのひび割れ幅が破壊挙動に影響を及ぼし得ることが示唆された。

4. 初期ひび割れ角度がコンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響評価

4.1 初期ひび割れ角度の圧縮強度への影響評価

3章で示したように、本研究で対象とした初期ひび割れ角度によっても、圧縮強度の低減が確認された。また、著者らの既往の研究³⁾でも示したように、初期ひび割れのあるコンクリートの圧縮強度は、そのひび割れ幅との相関も強い。そこで、圧縮破壊した計7ケースの供試体に関して、初期ひび割れ角度と圧縮強度の関係および平均ひび割れ幅と圧縮強度の関係を図-6(a), (b)にそれぞれ示す。これらの図の横軸は、初期ひび割れ角度および平均ひび割れ幅である。縦軸はいずれの図も、各供試体の圧縮強度を、初期ひび割れのない供試体から得られた圧縮強度の平均値（ひび割れ角度 90°以外：32.8、ひび割れ角度 90°：46.6）でそれぞれ正規化したものである。なお、初期ひび割れを導入していない供試体の結果は図中の左端に○で示している。これより、赤で示す初期ひび

割れ角度 0°、15°、30°の供試体では、平均ひび割れ幅が 0.5mm 程度までは変わらず、そこから 1.0mm 程度にかけて緩やかに減少し、それを超えるとひび割れ幅に依らず 90%程度に収束する傾向があることがわかる。一方で青、緑で示す初期ひび割れ角度 45°、60°、90°の供試体では、平均ひび割れ幅が小さい領域においてもその平均ひび割れ幅に応じて明らかに圧縮強度が低減している。初期ひび割れ角度 60°、90°ではともに、平均ひび割れ幅が約 0.5mm にかけて線形に減少し、それを超えると初期ひび割れ幅に依らず 75%程度に収束する傾向であることが分かる。また、初期ひび割れ角度 45°の供試体は、初期ひび割れ角度 60°、90°の2ケースに比べ、ひび割れ幅 0.5mm 程度までの低減の傾きが緩やかであることがわかる。

4.2 初期ひび割れ角度の圧縮破壊エネルギーへの影響評価

Nakamura et al. は、圧縮強度を用いた圧縮破壊エネルギーの算定式を式(1)のように提案している⁴⁾。

$$Gf'_c = 8.8\sqrt{f'_c} \quad (1)$$

ただし、 Gf'_c : 圧縮破壊エネルギー(N/mm)

f'_c : 圧縮強度(MPa)

本実験で用いた各供試体の結果から、式(1)における右辺の係数を算出し、初期ひび割れがない供試体から得た係数の平均値（ひび割れ角度 90°以外：4.0、ひび割れ角度 90°：3.2）によりそれぞれ正規化した値と、初期ひび割れ角度、および平均ひび割れ幅の関係を図-7(a), (b)

にそれぞれ示す。図中のプロットは、初期ひび割れと圧縮強度の関係を示した図-6と同様であり、初期ひび割れのない供試体の結果を各図左端に示している。

これより、圧縮破壊エネルギーは、赤で示す初期ひび割れ角度 0°, 15°, 30°の供試体においては、平均ひび割れ幅に依らず初期ひび割れを導入していない供試体と概ね等しく、青、緑で示す初期ひび割れ角度 45°, 60°, 90°の供試体は、初期ひび割れ幅に応じて減少する傾向を示すことが分かる。また、圧縮強度と同様に、初期ひび割れ角度 60°と 90°のケースは、減少の程度が概ね等しく、45°のケースは、わずかではあるが、60°, 90°のケースに比べ緩やかであると考えられる。

また、図-7(b)に著者らの既往の研究³⁾で得られた、円柱供試体に角度 90°の初期ひび割れを導入した場合、圧縮破壊エネルギーは平均ひび割れ幅 0.5mm にかけて線形に減少し、それ以上のひび割れ幅では 70%程度に収束するという結果を破線で示しているが、初期ひび割れ角度 60°, 90°のケースでは既往の研究³⁾と概ね同じ傾向となることが分かった。

これらのことから、初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーは、ひび割れ幅に加え、ひび割れ角度による影響も大きく、これらの指標を用いて定量的に評価できることが分かった。

ただし、圧縮強度・圧縮破壊エネルギーへの影響の度合いが変わると考えられる、初期ひび割れ角度 30°~60°の範囲における、より多くの角度ケースの実施、45°の供試体における、0.5mm 以上の大きいひび割れ幅を有する供試体の実施等、より詳細な検討が求められる。

5. まとめ

本研究では、圧縮主応力方向に垂直な平面とひび割れ方向間の角度が異なる初期ひび割れを 1 本導入した角柱供試体を用いて圧縮試験を行い、ひび割れ角度がコンクリートの圧縮性能に及ぼす影響について評価した。以下に本研究で得られた知見を示す。ただし、本研究は限られた供試体から得られた結果であるため、ひび割れ角度、ひび割れ幅を変えたより多くの供試体の実施や、斜めひび割れによって圧縮強度・圧縮破壊エネルギーが低減するメカニズムの詳細な検討が求められる。

- 1) 初期ひび割れは、圧縮載荷初期段階で閉じる挙動を示すが、コンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに影響を及ぼすものであることが明らかとなり、ひび割れ角度とひび割れ幅を用いて、圧縮強度・圧縮破壊エネルギーを定量的に評価できることが分かった。
- 2) 圧縮強度は、初期ひび割れがない供試体に比べ、ひび割れ角度 0°~30°の範囲では、平均ひび割れ幅が 0.5mm 程度までは同等であり、1mm 程度にかけて緩やかに減

少し、それを超えると 90%程度に収束すること、ひび割れ角度 45°, 60°, 90°では、平均ひび割れ幅が 0.5mm 程度にかけて線形に減少し、それ以上の場合には 75%程度に収束すること、また、ひび割れ角度 45°ではひび割れ幅 0.5mm までの傾きが 60°, 90°に比べ緩やかであることが分かった。

- 3) 圧縮破壊エネルギーは、初期ひび割れがない供試体に比べ、ひび割れ角度 0°~30°の範囲では同等であり、45°, 60°, 90°では、平均ひび割れ幅が 0.5mm 程度にかけて 70%程度まで減少する回帰線に従い、その傾きは、60°, 90°のケースに比べると、45°のケースは緩やかであることが分かった。
- 4) ひび割れ角度が 60°~90°の比較的大きい範囲では、今回対象としていないせん断すべりを伴う破壊が確認されたが、他の供試体では圧縮破壊をしていることを示した。

参考文献

- 1) Collins, M. P. and Vecchio, F. : An International Competition to Predict the Response of Reinforced Concrete Panels, Festschrift Prof. Dr. Bruno Thurlimann zum 60. Geburtstag, pp. 471-491, 1983
- 2) 宮原長久, 川原泰司, 前川宏一 : ひび割れを含む鉄筋コンクリート板要素の一軸圧縮応力下における非線形挙動, 土木学会論文集, 第 378 号, pp. 249-258, 1987
- 3) 南里卓洗, 中村光, 三浦泰人, 山本佳士 : 初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 2, pp. 115-120, 2016
- 4) Nakamura, H and Higai, T: Compressive fracture energy and fracture zone length of concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 5) Lertsrisakulrat, T "Concept of localized compressive failure of concrete and its application, " Doctoral thesis, Tokyo Institute of Technology, 2001
- 6) 例えば, 水野要, 中村光, 檜貝勇 : 繰り返し荷重を受けせん断破壊する RC 部材の挙動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol. 19, No. 2, pp. 795-800, 1997
- 7) 例えば, 伊藤賢, 松本浩嗣, 中村拓郎, 二羽淳一郎 : せん断補強筋に沿った模擬腐食ひび割れを有する RC はりのせん断挙動, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 1149-1154, 2016
- 8) 平井圭, 中村光, 檜貝勇 : コンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp. 339-344, 1995