論文 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

南里 卓洸*1・中村 光*2・三浦 泰人*3・山本 佳士*4

要旨:本研究では、少数本の初期ひび割れを導入した中実な円柱および角柱供試体を用いて、軸方向の初期 ひび割れ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、圧 縮強度および圧縮破壊エネルギーは、初期ひび割れのひび割れ幅の増加に伴い減少し、その減少の程度は供 試体寸法や断面形状によらずひび割れ幅によって定量的に評価できることを確認した。また、圧縮強度およ び圧縮破壊エネルギーの減少が、初期ひび割れの存在が原因となって生じていることを、圧縮応力下での初 期ひび割れのひび割れ幅推移、および平滑なひび割れを模擬した供試体を用いて確認した。 キーワード:初期ひび割れ、圧縮破壊エネルギー、圧縮強度、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ことが 想定される。圧縮強度については、Collins ら¹⁾や宮原ら ²⁾による、分散したひび割れを導入した板状部材を用い 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。しかしなが ら、柱・梁、および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、あ るいは少数本のひび割れのみが発生するような場合の検 討はされていない。一方で、コンクリートの圧縮破壊エ ネルギーについては Nakamura ら³⁾や Lertsrisakulrat⁴⁾らに よって実験的に検討されており、Nakamura らの研究では、 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。しかし、既往の圧縮破壊エネルギーは、

既存ひび割れがないコンクリートを対象としたものであ るため,既存ひび割れによる影響は明確でない。構造物 は,ひび割れ発生位置で圧縮破壊することも多く,既存 ひび割れが圧縮破壊エネルギーに及ぼす影響の解明が望 まれている。

そこで本研究では、柱・梁部材などの比較的少数のひ び割れが発生した状態で圧縮破壊する場合を対象とし、 形状や寸法を変えた供試体に初期ひび割れを導入し、既 存ひび割れが圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに及ぼす影 響を実験的に評価した。また、既存ひび割れによって生 じると考えられる、供試体形状の変化などによる影響の 検証を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究で用いた供試体概要を表-1 に、実験の流れを 図-1にそれぞれ示す。本研究では、2シリーズの実験を 行った。シリーズ1では、供試体に初期ひび割れを導入 し、コンクリートの圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに初 期ひび割れが及ぼす影響を評価した。供試体の断面高さ 比は、既往の研究³⁾を参考に、圧縮破壊領域が供試体長 さより短くなるよう、すべて3とした。また、供試体形 状や寸法による影響を評価するため、断面が ϕ 100mmの 円柱、100×100mmの角柱(いずれも高さ 300mm)、お よび ϕ 150mmの円柱(高さ 450mm)の3 ケースを用意 した。

本実験で導入した初期ひび割れは、柱・梁部材や棒部 材などの中実な部材に少数本入るひび割れを想定してい る。そのため、初期ひび割れの本数は0本、1本、2本の 3ケースとし、導入はすべて割裂引張試験を用いて行っ た。また、初期ひび割れ2本のケースは、図-1に示す ように、それらが互いに直交するように導入した。シリ ーズ1で用いた2種類の円柱供試体は、供試体長さに応 じて円筒状に切断したボイド管を用い、片側の端部を鋼 板で塞ぎ、もう片側の端部からコンクリートを打設する 方法で作製した。角柱供試体は、鋼製型枠を用いて載荷 面と垂直な面から打設を行った。

シリーズ2では、初期ひび割れの代わりにゴム板を用いた供試体を作製し、初期ひび割れを導入した供試体と ゴム板を導入した供試体の圧縮特性の比較を行った。ゴ ム板の厚さを、シリーズ1で導入した初期ひび割れのひ び割れ幅と同様に扱うため、板厚は0.5mm、1mm、2mm

| *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 | l) |

| 3 (11 - 7) | 。 断面高さ比 | 断面形状 | 高さ <i>H</i> | 初期ひび割れ | ゴム板の | 供試体数 | | 出計は友 |
|------------|---------|---------|-------------|--------|--------|-------|------|-----------|
| ~y-~ | H/D | D(mm) | (mm) | 本数(本) | 板厚(mm) | ピークまで | 終局まで | 快武仲石 |
| | | φ 100 | 300 | 0 | | 7 | 3 | C10-30(0) |
| | | | | 1 | — | 8 | 4 | C10-30(1) |
| | | | | 2 | — | 8 | 8 | C10-30(2) |
| | | 100×100 | 300 | 0 | — | 5 | 2 | P10-30(0) |
| 1 | 3 | | | 1 | — | 7 | 3 | P10-30(1) |
| | | | | 2 | _ | 5 | 1 | P10-30(2) |
| | | φ 150 | 450 | 0 | _ | 3 | 2 | C15-45(0) |
| | | | | 1 | _ | 3 | 1 | C15-45(1) |
| | | | | 2 | — | 3 | 2 | C15-45(2) |
| | 2 | φ 100 | 200 | _ | — | 2 | 1 | R0.0 |
| 2 | | | | | 0.5 | 2 | 2 | R0.5 |
| 2 | | | | | 1.0 | 2 | 1 | R1.0 |
| | | | | | 2.0 | 2 | 2 | R2.0 |

表-1 実験ケース

の3パターンとした。シリーズ2で用いた円柱供試体は, 平滑な面を模擬するため,供試体の作製精度の観点から, ϕ 100×200mmの鋼製型枠を用い,断面を2分するよう に100×200mmの長方形のゴム板を挿入し,板を挟んだ 両側からコンクリートを打設する方法で作製した。

本実験で用いた供試体はすべて、早強セメントを用い て表-2の示方配合をもとに作製した。シリーズ1で用 いた供試体は、材齢2日で脱型後、28日間水中養生を行 い、室温20℃,湿度80%の恒温室の気中に24時間静置 した後、数日にわたり載荷を行った。各載荷日には、¢ 100×200mmの円柱供試体を用いて強度試験を行ったが、 載荷日による圧縮強度のばらつきは確認されなかった。 シリーズ2で用いた供試体は、材齢3日で脱型後、恒温 室内で10日間の湿布養生を行い、1日以内にすべての供 試体の載荷を行った。

2.2 載荷方法および計測方法

初期ひび割れ導入後,各ひび割れに対し,クラックス ケールを用いたひび割れ幅の測定を 50mm 間隔で行った。 各ひび割れのひび割れ幅の平均値を平均ひび割れ幅、平 均ひび割れ幅にひび割れ本数を乗じたものを合計ひび割 れ幅,各ひび割れのうち平均ひび割れ幅の大きい方を最 大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、シリコングリスを塗布した厚さ 0.05mm のテ フロンシートを2枚挿入した。載荷は,2000kN荷重制御 型試験機を用い,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 0.5MPa/s) とした。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のように供試体下部と同じ面に設 置した4つの変位計によって行い、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。なお、本文

表-2 示方配合

| | 単位量(kg/m ³) | | | | | | | |
|-----|-------------------------|-----|-----|-------|-------|-------|-----|--|
| W/C | W | С | S | G(mm) | | | AE | |
| | | | | 5-10 | 10-15 | 15-20 | 剤 | |
| 0.5 | 175 | 350 | 780 | 274 | 366 | 274 | 1.5 | |



図-1 本実験の流れ

中で用いるひずみの値は、供試体変位と載荷前に計測した供試体長さを用いて算出したものである。圧縮破壊エネルギーは、弾性挙動を含む一回目の載荷・除荷履歴を除いた終局点までの応力-変位曲線下の面積の積分値、 すなわち図-1に示す載荷履歴の灰色部の面積として算出した。



表-3 図-2に示した供試体の初期ひび割れ幅

| | 初期ひび割れのひび割れ幅(mm) | | | | |
|-----------|------------------|-------|-------|--|--|
| 供試体名 | 平均 | 最大 | 合計 | | |
| C10-30(1) | 0.26 | 0.26 | 0.26 | | |
| C10-30(2) | 0.29 | 0.48 | 0.58 | | |
| P10-30(1) | 0.065 | 0.065 | 0.065 | | |
| P10-30(2) | 0.048 | 0.079 | 0.096 | | |
| C15-45(1) | 0.32 | 0.32 | 0.32 | | |
| C15-45(2) | 0.28 | 0.48 | 0.56 | | |

本実験で用いた供試体数を表-1 に示す。断面形状が φ100mm の円柱, 100×100mm の角柱は各 10 体, φ 150mmの円柱は各5体の供試体を用意したが、初期ひび 割れ導入時に分離したケースや、軸方向以外のひび割れ が発生してしまった供試体は使用していない。また、圧 縮試験において大きい偏心が見られた供試体の結果も記 載していない。表-1中で、ピークまでと終局までの供 試体数が異なるのは、ポストピーク領域で脆性的に破壊 し,変位が計測できなかった供試体があったためである。

3. 初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮応カ下に おける挙動

3.1 応カーひずみ関係およびひび割れ性状

シリーズ1で得たコンクリートの応力--ひずみ関係を 供試体形状別に図-2に示す。初期ひび割れ0本、1本、 2本の供試体の結果をそれぞれ黒、赤、青の線で示して いる。初期ひび割れを有する供試体は、同形状の供試体 間で平均ひび割れ幅の近いものを抽出して示している。 図-2で用いた供試体の各ひび割れ幅を表-3に示す。ポ ストピーク領域の包絡線は、それぞれの載荷履歴のピー ク値のみを抽出し、直線でつなげたものである。これを 見ると、いずれのケースにおいても、赤および青で示し ている初期ひび割れを有する供試体は、黒で示している 初期ひび割れ0本の供試体に比べ圧縮強度が低減してい ることが分かる。

供試体の形状・寸法がコンクリートの応力-ひずみ曲







(a) C10-30(0)

(C) C10-30(2) 図-3 シリーズ1 供試体のひび割れ性状

線に及ぼす影響について,図-2(a),(b),(c)の比較によ って検討する。供試体寸法による影響に関しては、図-2(c)に示す φ 150×450mm の供試体の方が, 図-2(a) に 示す φ 100×300mm の供試体に比べ,ポストピークの負 勾配が大きく、終局時のひずみが小さくなっていること が分かる。破壊領域が局所化することによる、ひずみの 供試体寸法依存性が確認された。

本実験では、供試体内部のひずみ分布等の計測は行わ なかったため、破壊領域の定量的な評価をすることはで きなかったが、ひび割れの発生領域によって圧縮破壊の 局所化を定性的に評価した。本実験で得られた、終局時 まで圧縮載荷を行った φ 100×300mm の供試体のひび割 れ性状を図-3 に示す。図中の赤線は、割裂引張試験に より導入した初期ひび割れ、青線は圧縮応力作用下で生 じたひび割れを示している。これをみると、図-3(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 3)と同様, ひび割れが発生・進展している領域が集中 しており、供試体下部はひび割れが全く発生していなか った。図-3(b), (c)に示す初期ひび割れを導入した供試 体は,供試体高さ方向に全断面的に初期ひび割れがある にもかかわらず、青で示す圧縮破壊領域は局所化してお り、初期ひび割れを挟む形でつながっていることが確認 された。

3.2 初期ひび割れがコンクリートの圧縮特性を変化させ ていることに関する検証

(1) 供試体形状を変化させた供試体の圧縮性能

圧縮強度は、その形状がスレ ンダーになるにつれ低下してい くことが知られている⁵⁾。割裂 試験により初期ひび割れを導入 したシリーズ1の実験結果には、 初期ひび割れで分割された部分 の形状変化により、供試体がス レンダーになったことによる影 響を含んでいる、との推測も成



り立つ。そこで、シリーズ2において、ゴム板によって コンクリート供試体を分割し、ひび割れではなく平滑な 面で形状を変化させた供試体を用いて、供試体の形状変 化による影響を評価した。シリーズ2で用いた全ての供 試体の応力-ひずみ関係、および各供試体の圧縮強度と ゴム板の板厚の関係を図-4(a)、(b)にそれぞれ示す。ゴ ム板の有無やゴム板厚によらず概ね同様の応力-ひずみ 曲線を描いている。また、図-4(b)に示すように、圧縮 強度のばらつきを考慮すると、ゴム板の板厚によらず概 ね等しい値であることが分かる。3.1 で述べたように、 初期ひび割れを導入した供試体は無損傷のものよりも圧 縮強度が低下していることを考慮すると、圧縮強度の低 下は、供試体の形状変化の影響ではなく、初期ひび割れ の存在による影響が支配的であることが分かる。

(2) 初期ひび割れのひび割れ幅推移

初期ひび割れを1本導入した100×100×300mmの角 柱供試体(平均ひび割れ幅 w_a =0.20mm)を用いて,圧縮応 力下における,導入した初期ひび割れのひび割れ幅推移 を計測した。一方で,初期ひび割れのない供試体におい ても,一軸圧縮応力を受けることで,ポストピーク域に おいて,本実験で導入した初期ひび割れと同様に,供試 体高さ方向のひび割れが入ることも多くある。そこで, 初期ひび割れのない供試体においても同様の計測を行い, 両者を比較することにより,本実験で導入した初期ひび 割れが,初期損傷として適当であるか検証を行った。

実験状況,およびその結果を図-5(a)に示す。初期ひび割れ1本,0本の供試体の結果をそれぞれ左側,右側にまとめて示しており,上から計測状況,圧縮強度までの初期ひび割れ幅の推移,終局までの初期ひび割れ幅の推移を示している。初期ひび割れ1本の供試体のひび割れ幅計測は,ひび割れを導入した面のうち1面を計測面とし,ひび割れを挟むように高さ100mm間隔で4箇所の位置を計測点として,50mm π 型ゲージを各点にとりつけて行った。初期ひび割れ0本の供試体は,ひび割れが進展する面の特定ができないため,図-5(a)に示すように直交する2面を計測面とした。計測点は初期ひび割れを導入した供試体と同様に設定し,計8点で計測を行





った。図中左側の面を面 1,右側の面を面 2 とする。なお,各測定面のひび割れ幅の測定点を図中上から(1),(2),(3),(4)とした。

ひび割れ幅推移を示した図-5(b),(c)は、横軸がひび 割れ幅(ひび割れが開く方向を正とする),縦軸が応力を 各供試体の最大応力で正規化したものを示している。な お、初期ひび割れを有する供試体のひび割れ幅は、圧縮



載荷開始時のひび割れ幅を 0mm として示している。

圧縮強度までのひび割れ幅推移をみると、初期ひび割 れ1本導入した供試体は圧縮強度の30%程度から若干の 増加がみられたが、両者とも圧縮強度の80%付近から一 部の計測点で急激に増加した。ひび割れ幅の増加が見ら れた測定点の位置には、圧縮荷重によって生じた微細な ひび割れが確認された。また、その推移幅は、初期ひび 割れ1本の供試体に導入したひび割れ幅の40%程度と小 さく、初期ひび割れの有無による差異は見られなかった。

終局までのひび割れ幅の推移は,破壊領域内でひび割 れ幅が顕著に推移した測定点の結果を示している。また, 各載荷サイクル内の最大応力を示す点のみを抽出して示 しており,ひび割れ幅が増加し始めた 3~4 サイクルのみ, 載荷・除荷中の推移も併せて示している。初期ひび割れ 0本,1本の供試体ともに,各載荷サイクル内の最大応力 がピーク応力の80%まで低下した点からひび割れ幅が増 加し始め,終局に至るまで,応力の低下とともに単調に 増加したことが分かる。また,載荷・除荷中のひび割れ 幅の推移をみると,両者とも除荷段階,および各載荷サ イクルにおける最大応力に比べ小さい応力レベルにおけ る載荷段階においてはほとんど変化が見られず,各ピー クに近い段階から急激に増加していることが分かる。

3.2(1)および(2)より、本実験において導入した初期ひ び割れが初期損傷として妥当であり、同ひび割れが終局 に至るまでのコンクリートの圧縮性能を変化させる重要 な要因であること、およびその変化が、ひび割れによっ て生じる形状変化など他の要因によるものではないこと が示された。

4. 圧縮強度・圧縮破壊エネルギーに初期ひび割れが及ぼ す影響評価

4.1 初期ひび割れの圧縮強度への影響評価

3 章で述べたように、本実験で対象としたような初期 ひび割れの存在によっても、圧縮強度の低減が確認され た。そこで、シリーズ1で行った計9パターンの供試体 に関して、平均・最大・合計ひび割れ幅とコンクリート の圧縮強度の関係を図-6 に示す。横軸は各ひび割れ幅 を,縦軸は,各供試体の圧縮強度を,同じ形状・寸法で ある供試体のうち、初期ひび割れのない供試体で得た圧 縮強度の平均値でそれぞれ正規化したものである。初期 ひび割れの本数が0本,1本,2本の供試体の結果をそれ ぞれ黒,赤,青で示しており,断面形状がφ100mm,100 ×100mm, φ150mm の供試体の結果をそれぞれ○, □, △で示している。これによると、いずれのひび割れ幅で 整理しても,初期ひび割れ幅が約0.5mm以下の小さい領 域では、ひび割れ幅の減少に伴い圧縮強度が徐々に低下 していき,それ以上の初期ひび割れ幅を有する供試体は, 初期ひび割れ幅の大きさによらず一定値に収束する傾向 を示すことが分かる。また、いずれのひび割れ幅指標に おいても、赤および青で表したひび割れ本数の違いによ らず,同様の傾向を示している。さらに,この傾向は〇, □,および△で示している,供試体形状や寸法の違いに よらず、同様であることが確認される。

Collins ら¹⁾や宮原ら²⁾は、板部材を模擬し、多数の初 期ひび割れを導入した供試体を対象とした実験から、ひ び割れを含む平均ひずみにより圧縮強度の低減を評価す る式を提案している。しかし、今回対象とした円柱形の 供試体は、初期ひび割れのひび割れ幅から平均ひずみへ の変換が困難なものであり、平均ひずみの概念を適用で きない。また、数値解析的には、有限要素法において、 無筋領域の要素にひび割れが入ると,ひずみ軟化挙動に よるひずみの局所化が生じ、ひずみの要素寸法依存性が 発生するため、ひずみ値の大きさ自体が意味のないもの となる。そこで、宮原らの実験で得られた平均、合計ひ び割れ幅と圧縮強度の関係を図−6 に◆で併せて示す。 宮原らの結果は、本実験の実験結果と同様の傾向を示し ていることが分かる。これらのことを考慮すると、今回 の実験で寸法・形状に依存しないことが確認され、ひず みによる要素寸法依存性も回避できる、ひび割れ幅によ る評価の方が妥当である可能性を示す結果と言える。た だし、本実験の範囲では、いずれのひび割れ幅による評 価が最も適当であるかは明確にならず、供試体数が少な



いものもあったため、今後さらなる検討を行う必要があ ると考えられる。

4.2 初期ひび割れの圧縮破壊エネルギーへの影響評価

Nakamura らは、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³⁾。

| $Gf_c = 8.8\sqrt{f'_c}$ | (1) |
|-------------------------|---------------------|
| ただし, <i>Gf</i> c | : 圧縮破壊エネルギー(MPa・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同形の供試体か ら得た値の平均値によりそれぞれ正規化した値と、初期 ひび割れ幅の関係を図-7 に示す。これより、圧縮破壊 エネルギーは、圧縮強度と初期ひび割れ幅の関係と同様 に、ひび割れ幅が 0.5mm 程度までは、初期ひび割れ幅の 増加に伴い低下し、それ以上初期ひび割れ幅が増加した 供試体は,一定値に収束していることがわかる。また, 赤および青で示している、初期ひび割れ本数の異なる供 試体においても同様な傾向であった。さらに、○,□, および△で示している,形状・寸法の異なる供試体にお いても、一様に評価できることが確認された。ここで、 図-2 に示した各供試体の応力-ひずみ関係を見ると, 初期ひび割れのある供試体は、初期ひび割れ0本の供試 体に比べ圧縮強度は低下している一方で、終局に至った 時のひずみ(変位)の値はほとんど変わらないことがわ かる。この影響により, 圧縮破壊エネルギーが圧縮強度 と同様の傾向で、初期ひび割れによって低減したと考え られる。

5. まとめ

本研究では、少数本の初期ひび割れを導入し、形状や 寸法を変えた供試体を用いて圧縮試験を行い、初期ひび 割れ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。以下に本研究において得られた知見を示す。 1) 初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮強度は、供 試体形状や寸法、およびひび割れ本数によらず、初期ひ び割れの平均・最大・合計ひび割れ幅によってその減少 を整理できることを示した。また,圧縮強度の低減は平 均ひずみよりいずれかのひび割れ幅を用いて評価する方 が妥当である可能性を示した。

2) 初期ひび割れを有するコンクリートの圧縮破壊エネ ルギーは、初期ひび割れの存在によって減少することを 示した。また、その減少量は、供試体形状や寸法、およ びひび割れ本数によらず、圧縮強度の低下と概ね同様に 評価できることを示した。

新状変化させた供試体による圧縮試験や、圧縮応力下の初期ひび割れのひび割れ幅推移を計測することにより、
1)、2)で示した結果が、初期ひび割れの存在によって生じていることを示した。

ただし,供試体数が少数であったケースや,いずれの 初期ひび割れ幅指標が適当であるか等に関して,今後さ らなる検討が必要とされる。

参考文献

- Collins, M. P. and Vecchio, F.: An International Competition to Predict the Response of Reinforced Concrete Panels, Festschrift Prof. Dr. Bruno Thurli-mann 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
- 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
- Lertsrisakulrat, T "Concept of localized compressive failure of concrete and its application, " Doctoral thesis, Tokyo institute of technology, 2001
- 5) 岡田清, 六車熙:コンクリートハンドブック, 朝倉 書店, 1981