

論文 定応力繰返し圧縮载荷を受けた PFC の圧縮特性

林 佑希子*1・中村 拓郎*2・安田 瑛紀*3・二羽 淳一郎*4

要旨：圧縮強度の 30%以上の圧縮応力が作用する定応力繰返し圧縮载荷が無孔性コンクリート (PFC) の圧縮特性に与える影響を実験的に検討した。その結果、繰返し载荷の上限応力や载荷回数増加による PFC の圧縮強度の低下や破壊形態の変化は認められなかった。また、繰返し载荷に伴って静弾性係数はやや低下するものの、圧縮強度の 85%程度の高い圧縮応力が作用した場合でも、応力-ひずみ曲線の形状に顕著な変化は認められず、PFC の圧縮破壊挙動においては、内部の微細ひび割れの発生や進展が一般的なコンクリートと比較して少ないことが示唆された。

キーワード： PFC, 定応力繰返し圧縮载荷, 圧縮強度, 応力-ひずみ曲線, 静弾性係数

1. はじめに

近年、コンクリート構造物に利用するセメント系材料の超高強度化により、部材の薄肉化や断面縮小が可能となり、工期短縮や工費削減、構造物のスパンの長大化等が実現している。こうした超高強度化のなか、圧縮強度が 400N/mm² を超える無孔性コンクリート (以下、PFC) が開発された¹⁾。

一般に超高強度コンクリートでは、空隙を物理的に充填させるために、セメントと超微粒材料のシリカフェームが高性能減水剤とともに少量の水で練り混ぜられている。しかし、粒径差のある 2 成分の粉体から成る結合材では粉体間の空隙が多く残存するため、さらなる緻密化のためにはその空隙を埋める微粒子が必要となる。PFC では、その空隙を埋めるための適切な粉体粒子を加え、最密充填構造となる使用材料と配合が決定されている。また、超高強度コンクリートの結合材は少量の水で練り混ぜられることから、セメントの水和反応に必要な水分が不足するおそれがある。この問題点を解消するため、PFC の製造過程では、図-1 に示す 30 分程度の脱気吸水処理を行うことで、不足していた水分が外部から供試体内部に供給されている。また、その後、90°C の蒸気養生を 48 時間、180°C の乾燥加熱養生を 48 時間行うことによって、水和反応を促進させている。これらによって、流込み成型のできるセメント系材料の中では世界最高となる圧縮強度を達成している。さらに、PFC の超高強度を活用した新しいコンクリート構造物の実現に向けて、鋼繊維補強された PFC の基礎的な力学特性が明らかにされており、圧縮破壊に至るまで圧縮応力に対して弾性的なひずみ挙動を示すことが報告されている²⁾。

さて、圧縮破壊挙動において非線形性を示す普通強度コンクリートや高強度コンクリートに対して、圧縮強度の 35%から 95%の圧縮応力を上限応力とする繰返し圧縮载荷試験を行った場合には、応力-ひずみ曲線、残存強度および静弾性係数などの力学特性が変化することが報告されている³⁾。PFC の場合、単調载荷において、圧縮破壊に至るまでの応力-ひずみ曲線が非線形性をほとんど示さないことから、繰返し圧縮载荷が圧縮破壊挙動に与える影響は一般的なコンクリートとは異なるものと考えられる。

本研究では、定応力繰返し圧縮载荷が PFC の圧縮破壊挙動に及ぼす影響を明らかにすることを目的に、鋼繊維補強された PFC を対象に、圧縮強度の 30%以上の圧縮応力を作用させる定応力繰返し圧縮载荷および繰返し载荷後の圧縮強度試験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料と供試体概要

PFC の使用材料は低熱ポルトランドセメント、シリカフェーム、石英微粉末、珪砂、高性能減水剤、空気量調整剤および鋼繊維である。使用材料の物性等を表-1 に、配合を表-2 に示す。ただし、空気量は練上り直後の実測値である。繊維混入率はコンクリート体積に対して外割で 2%とした。練混ぜには容量 30l のオ



図-1 PFC の脱気吸水処理の様子

*1 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 土木工学コース (学生会員)

*2 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 助教 博(工) (正会員)

*3 太平洋セメント(株) 中央研究所 第2研究部 研究員 修(工) (正会員)

*4 東京工業大学 環境・社会理工学院 土木・環境工学系 教授 博(工) (正会員)

表-1 使用材料の物性等

| 材料 | 名称 | 記号 | 物性等 |
|---------------|--------------|----|---|
| 結合材 (記号：B) | 低熱ポルトランドセメント | LC | 密度 3.22g/cm ³ , 比表面積 3500cm ² /g |
| | 石英微粉末 | Q | 密度 2.71g/cm ³ |
| | シリカフェューム | SF | 密度 2.35g/cm ³ , 比表面積 20m ² /g |
| 細骨材 | 珪砂 | S | 表乾密度 2.63g/cm ³ , F.M. 1.76 |
| 混和剤 | 高性能減水剤 | SP | ポリカルボン酸系 |
| | 空気量調整剤 | DF | ポリグリコール系 |
| 短繊維 | 鋼繊維 | F | 直径 0.2mm, 長さ 15mm, 密度 7.84g/cm ³ , 引張強度 2800N/mm ² , 引張弾性率 210kN/mm ² |

表-2 配合

| W/B (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | S | 繊維 F | 混和剤量 | | 空気量 実測値 (%) |
|------------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|---------|--------|--------|-------------------|
| | W | B | | | | | SP | DF | |
| | | LC | Q | SF | | | | | |
| 15 | 199 | 861 | 362 | 105 | 934 | 2 vol.% | B×1.6% | B×0.1% | 3.7 |

表-3 実験ケース

| | 供試体名 | 応力比 σ_{max}/f_c' | 目標繰返し回数 N | 供試体本数 |
|--------|----------|-------------------------|-----------|---------------|
| シリーズ 1 | C-35-20 | 0.35 | 20 | 4 |
| | C-65-20 | 0.65 | | 4 |
| | C-85-20 | 0.85 | | 4 |
| シリーズ 2 | C-85-5 | 0.85 | 5 | 4 |
| | C-85-20 | | 20 | シリーズ 1 と同じ供試体 |
| | C-85-50 | | 50 | 4 |
| | C-85-100 | | 100 | 3 |

σ_{max} : 繰返し載荷における上限応力, f_c' : 基準強度

ムニミキサを使用し, 打込み後は材齢 48 時間まで 20°C, 80%R.H. の恒温恒湿室にて封緘養生を行った。脱型直後に前述の脱気吸水処理を行った供試体に対して 90°C の蒸気養生と 180°C の乾燥加熱養生をそれぞれ 48 時間順に行い⁴⁾, 載荷試験まで 20°C, 60%R.H. の恒温恒湿室で保管した。供試体には $\phi 50 \times 100$ mm の円柱供試体を使用し, 図-2 に示すように供試体表面に検長 30mm のひずみゲージを高さ方向の中央に 2 枚貼付して実験を行った。なお, 本実験で使用した供試体は全て同一練混ぜバッチから作製されている。

2.2 実験方法および実験ケース

(1) 圧縮強度試験

定応力繰返し圧縮載荷を行う前に, 本実験で使用する供試体の圧縮強度 (以下, 基準強度) を確認するため, JIS A 1108 および JIS A 1149 に準じて, 容量 1000kN の耐圧試験機を用いて圧縮強度試験を実施した。載荷速度は毎秒 0.6N/mm² とした。

(2) 定応力繰返し圧縮載荷試験

載荷には圧縮強度試験と同一の容量 1000kN の耐圧試験機を用い, 繰返し載荷の載荷・除荷時にはいずれも荷重を自動制御した。その載荷・除荷速度は限られた時間内に試験を終了させるために毎秒 2.5N/mm² とした。

実験ケースを表-3, 繰返し載荷の履歴を図-3 に示す。シリーズ 1 では繰返し載荷の上限応力が PFC の圧縮特性に与える影響を確認するために, 繰返し回数

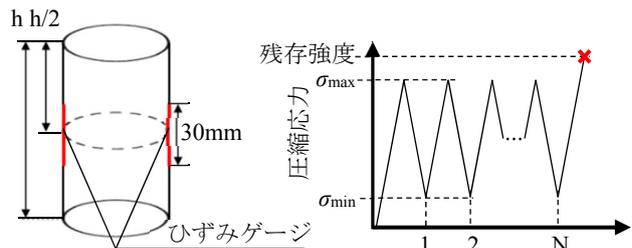


図-2 供試体概略図

図-3 繰返し載荷履歴

N=20 回の一定条件のもと, 繰返し載荷の上限応力と基準強度の比 (以下, 応力比 σ_{max}/f_c') を 0.85, 0.65, 0.35 の 3 水準とした。シリーズ 2 では繰返し回数が PFC の圧縮特性に与える影響を確認するために, 応力比 $\sigma_{max}/f_c'=0.85$ の一定条件のもと, 繰返し回数 N を 5, 20, 50, 100 の 4 水準とした。両シリーズにおける下限応力は基準強度の 1% 程度の応力とした。また, 両シリーズにおいて目標繰返し回数に到達した後に, 載荷速度を毎秒 2.5N/mm² として圧縮強度試験を行い, その時の圧縮強度を残留強度としている。なお, 各水準の供試体本数は 4 体ずつであり, C-85-100 のみ 3 体である。なお, PFC は材齢による強度への影響がほとんどないため⁴⁾, 各供試体の試験材齢は統一していない。

(3) 各数値の計算方法

残留ひずみは 2 つのひずみゲージで計測されたひずみの平均値を用いて式(1)によって算出した。

$$\epsilon_p = \epsilon_{\min(N+1)} - \epsilon_{\min(1)} \quad (1)$$

ここに, ϵ_p : 残留ひずみ, $\epsilon_{\min(N+1)}$: 繰返し載荷 N 回目後の下限応力時ひずみ, $\epsilon_{\min(1)}$: 繰返し載荷 1 回目の下

限応力時ひずみ

上限応力時ひずみの増加量も、残留ひずみと同様に下記の式(2)によって算出した。

$$\varepsilon_u = \varepsilon_{\max(N+1)} - \varepsilon_{\max(1)} \quad (2)$$

ここに、 ε_u ：上限応力時ひずみの増加量、 $\varepsilon_{\max(N+1)}$ ：繰返し载荷 N+1 回目の上限応力時ひずみ、 $\varepsilon_{\max(1)}$ ：繰返し载荷 1 回目の上限応力時ひずみ

静弾性係数は計測した荷重から算出した応力とひずみの平均値を用いて式(3)によって算出した。

$$E_c = (S_1 - S_2) / (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \quad (3)$$

ここに E_c ：静弾性係数(kN/mm²)、 S_1 ：最大荷重の 1/3 に相当する応力(N/mm²)、 S_2 ：供試体の縦ひずみが 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、定応力繰返し圧縮载荷における静弾性係数については、 S_1 、 ε_1 は基準強度の 1/3 に相当する応力とひずみとし、 S_2 、 ε_2 は下限荷重時の応力とひずみとした。

また静弾性係数変化率は式(3)によって算出された静弾性係数を用いて式(4)によって算出した。

$$R_{Ec} = E_{cn} / E_{c1} \quad (4)$$

ここに R_{Ec} ：静弾性係数変化率、 E_{cn} ：繰返し回数 n 回目の静弾性係数($1 \leq n \leq N+1$)、 E_{c1} ：繰返し回数 1 回目の静弾性係数

3. 実験結果と考察

3.1 圧縮強度試験結果

表-4 に単調载荷における圧縮強度試験の結果を示す。この圧縮強度を基準強度として、定応力繰返し圧縮試験における応力比 0.85、0.65 および 0.35 となる上限応力をそれぞれ 271N/mm²、207N/mm² および 111N/mm² と設定した。また、図-4 に応力-ひずみ曲線の一例を示す。全ての供試体において、応力-ひずみ曲線は载荷開始から破壊直前まで線形性を保ったままであり、この結果は既報²⁾と一致する。

全ての供試体において、圧縮強度の 1/2 程度の応力度から供試体表面の剥離が始まり、破壊直前に急激にひび割れが進行する爆裂的な破壊形態を示した。一般に高強度コンクリートの破壊は、モルタル部分が極めて緻密であるため、モルタル中の微細な欠陥から発生したひび割れが伝播し、一部の安定性が崩れると同時に瞬間的に供試体全体が崩壊するとされている⁵⁾。PFC も使用材料および配合の工夫、脱気吸水処理と二段階の熱養生によって緻密化されているため、破壊時の挙動が極めて脆性的になったと考えられる。

また、破壊後の供試体の様子は次の 2 通りであった。

表-4 圧縮強度試験結果

| | 平均値 | 標準偏差 |
|-----------------------------|-------|------|
| 圧縮強度 (N/mm ²) | 319.5 | 9.1 |
| 静弾性係数 (kN/mm ²) | 61.0 | 0.7 |

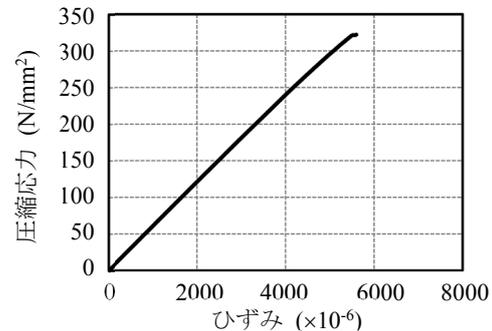


図-4 圧縮強度試験の応力-ひずみ曲線の一例



(a)分裂した供試体 (b)分裂しなかった供試体

図-5 破壊後の供試体の様子

ひとつは供試体を斜めに貫くひび割れに沿って供試体が 2 つに完全に分裂する破壊形態であり、2 つに分裂した供試体のひび割れ面には、繊維がほとんど確認できず、一部の繊維がひび割れ面に平行の向きに残っているだけであった。もう一方は、ひび割れ面を架橋することによって鋼繊維が供試体の分裂を防ぐ役割を果たしていた。

3.2 定応力繰返し圧縮载荷試験

(1) 供試体の破壊形態

図-5 に定応力繰返し圧縮载荷後に圧縮強度試験を行った破壊後の供試体の様子を示す。全ての供試体において、繰返し载荷後の圧縮強度試験における破壊は破壊直前に急激にひび割れが進行する爆裂的なものであった。この破壊形態は繰返し载荷を施していない供試体と同様である。破壊後の供試体の様子も繰返し载荷を施していない供試体と同様に 2 通りであり、定応力繰返し圧縮载荷は PFC の圧縮破壊時の破壊形態には影響しないことを確認した。

(2) 残存強度

図-6 にシリーズ 1, 2 の各水準における残存強度の平均値とその標本標準偏差を示す。

繰返し回数を 20 回とし、応力比を変動させたシリーズ 1 において、応力比 0.65 の供試体では、他の水準と比較して平均残存強度が 5%程度高くなり、応力比 0.35、0.85 の場合では、基準強度と比較して平均残存強度の

増減は1%程度であった。標準偏差は全て7~18N/mm²程度であり、変動係数も2~6%と小さかった。

応力比を0.85とし、繰返し回数を変動させたシリーズ2において、繰返し回数5回するとき、他の水準と比較して平均残存強度が5%程度高くなった。また、繰返し回数20, 50, 100回の際にも基準強度と比較して平均残存強度は低下せず、2%程度増加した。いずれの水準も標準偏差は全て10~20N/mm²程度であり、変動係数も4~6%程度と小さかった。

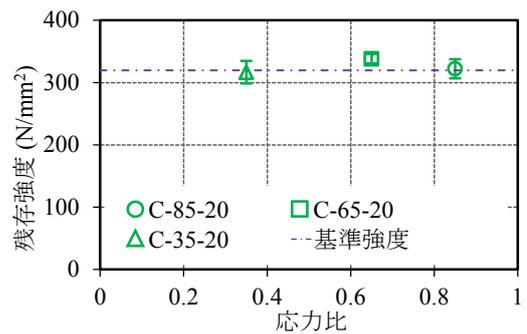
PFCは、圧縮強度の85%という高い圧縮応力が100回程度作用した場合にも、圧縮強度を保持できることが確認された。

(3) 応力-ひずみ曲線とひずみの増加量

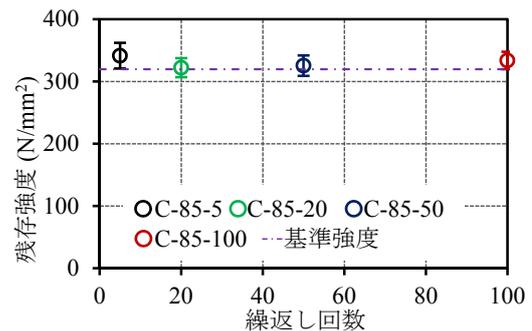
シリーズ1,2の各水準の供試体の応力-ひずみ曲線の一例を図-7に示す。黒線が繰返し1回目の応力-ひずみ曲線であり、赤線が定応力繰返し載荷試験後の圧縮強度試験時の応力-ひずみ曲線である。シリーズ1,2の全ての供試体において、載荷開始から破壊まで応力-ひずみ曲線の形状はほぼ直線を保っていた。一般に繰返し圧縮応力を受けたコンクリートの応力-ひずみ曲線は、加力時の曲線は上に凸の曲線から次第に直線に変化し、最終的に下に凸の曲線に変化するとされている。また除荷曲線は常に下に凸の曲線となる⁶⁾。PFCの場合、応力-ひずみ曲線の形状は加力曲線、減力曲線ともにほぼ直線であり、高い圧縮応力が繰返し作用した場合であっても、その形状の変化は確認されなかった。

図-8に各応力比および繰返し回数に対する残留ひずみ ϵ_p と上限応力時ひずみの増加量 ϵ_u 、それらの線形

近似曲線を示す。繰返し回数を20回としたシリーズ1において、応力比0.35では上限応力時ひずみの増加量が残留ひずみより小さくなった。一方で、応力比0.65と0.85では、応力比が大きくなるほど上限応力時ひずみの増加量と残留ひずみがともに大きくなっており、両者の差も広がる傾向となった。また、シリーズ2においても、繰返し回数が増えるにつれて、上限応力時ひずみの増加量と残留ひずみがともに増加する傾向が認められ、両者の差も広がる傾向が確認された。残存強度に対する繰返し圧縮載荷による影響は確認できな



(a) 上限応力による影響



(b) 繰返し回数による影響

図-6 残存強度

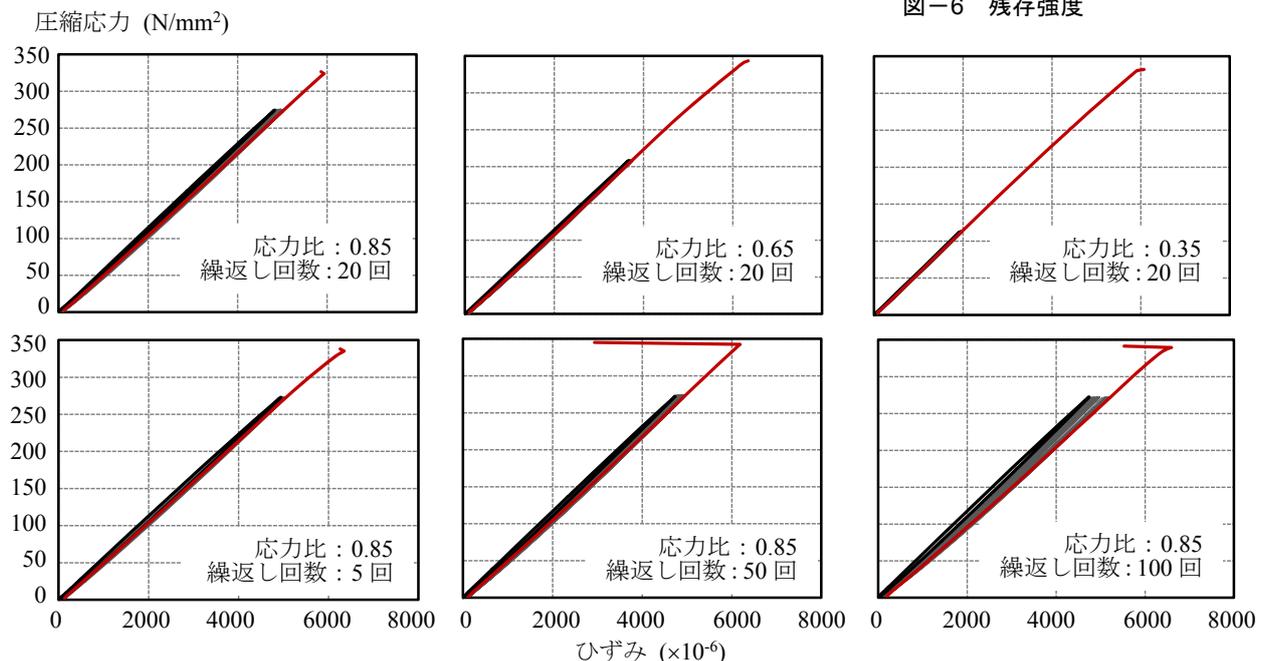


図-7 応力-ひずみ曲線の一例

かったものの、ひずみの増加量では応力比による明確な違いが確認された。しかしながら、応力比 0.85、繰返し回数 100 の供試体の場合であっても、残留ひずみは 200×10^{-6} 程度までしか増加していない。この繰返し载荷後の残留ひずみは非常に小さく、PFC は高応力を繰返し受けても剛性が変化しにくい性質を持っていることが確認された。

(4) 静弾性係数変化率

図-9 に繰返し载荷に伴う各水準の静弾性係数変化率の推移の一例を示す。参考として、応力比 0.85 で圧縮破壊に至った普通強度コンクリートの結果を付記する⁷⁾。この結果は、呼び強度 24N/mm^2 の $\phi 100 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体に対して実施された繰返し圧縮载荷試験の結果であり、载荷速度は毎秒 0.6N/mm^2 、下限応力は基準強度の 3% 程度の応力である。

応力比が同一の場合、静弾性係数変化率の推移は全ての供試体で同様となった。応力比 0.85 および 0.65 のとき、静弾性係数は载荷初期の 2 回目までに 1~3% 程度低下するが、その後は緩やかに低下している。一方で、応力比 0.35 のとき、繰返し回数が増加しても、静弾性係数はほとんど変化しなかった。この载荷初期における静弾性係数の低下の傾向は普通強度コンクリートで確認された傾向と同様のものである。しかし、静弾性係数が低下する割合を比較すると、明らかに PFC の方が普通強度コンクリートより変化が緩やかであった。普通強度コンクリートでは、繰返し回数 39 回目で静弾性係数が 40% 程度低下して破壊に至っているが、PFC では 10% も低下していないことがわかる。また、応力比 0.85 で 100 回繰返し载荷を行った際も、静弾性係数は 10% 程度しか低下しておらず、前述の通り基準強度と同程度の圧縮強度を保持していた。

各応力比および繰返し回数に対する繰返し载荷後の静弾性係数変化率を図-10 に示す。シリーズ 1 の図(図-10(a))には、比較対象として前述の普通強度コンクリートの結果も示しており、応力比は 0.35, 0.65, 0.85 の 3 水準で、繰返し回数は全て 20 回である。

応力比を変動させたシリーズ 1 において、応力比 0.35 では繰返し载荷後の静弾性係数の低下は認められなかった。また、応力比 0.65, 0.85 の場合も、繰返し载荷後の静弾性係数はそれぞれ 3% 程度および 5% 程度しか低下しなかった。一方、普通強度コンクリートにおいては、応力比が高くなるにつれ、繰返し载荷後の静弾性係数は繰返し 1 回目の静弾性係数と比較して大きく低下する傾向となっている。その低下量は PFC と比較して大きく、応力比 0.85 の場合は 30% 近くも低下している。

応力比を 0.85 で一定としたシリーズ 2 では、繰返し

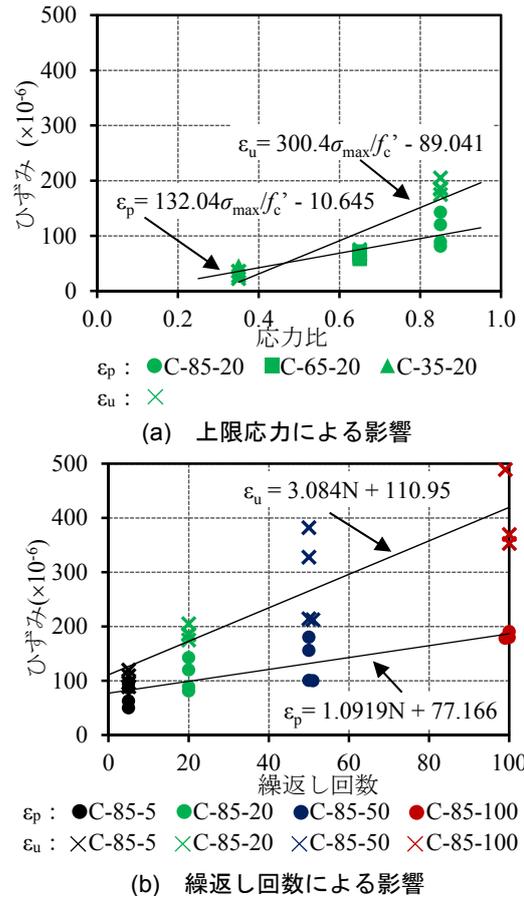


図-8 残留ひずみおよび上限応力時のひずみ増加

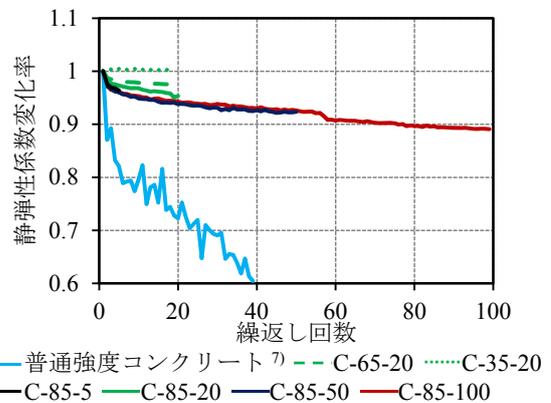


図-9 静弾性係数変化率の推移

回数の増加に応じて静弾性係数は低下する傾向が確認できた。しかし、前述のとおり、応力比 0.85 で 100 回繰返し载荷を受けた供試体であっても、その静弾性係数は繰返し 1 回目の静弾性係数と比較して 10% のみの低下であり、 50kN/mm^2 以上を維持したままであった。

一般に、コンクリートの静弾性係数は内部の微細ひび割れの発生や進展と関連があるとされている⁸⁾。PFC は 100 回の高応力繰返し载荷を受けても静弾性係数に顕著な変化が認められなかったこと、残存強度も基準強度と同程度となっていたことから、圧縮破壊に至るまで内部の微細ひび割れの発生や進展が普通強度コン

クリートと比較して少ないと考えられる。このことは、破壊直前の高応力の状態まで PFC の応力-ひずみ曲線がほぼ線形を保つこととも合致する。

4. まとめ

PFC の円柱供試体に対して圧縮強度の 30%以上の応力が作用する定応力繰返し圧縮荷重試験を実施した後、圧縮強度試験を行い、繰返し荷重を受けた PFC の圧縮特性に関して実験的に検討した。得られた結論を以下に示す。

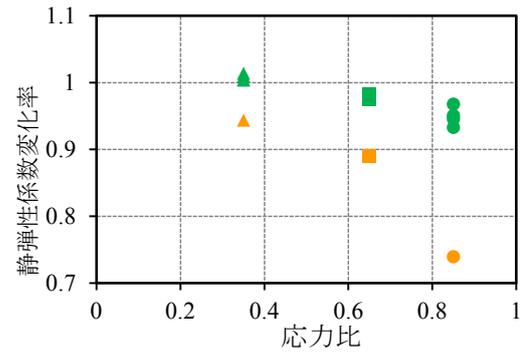
- (1) PFC の圧縮破壊は爆裂的な脆性破壊であり、繰返し荷重による破壊形態の違いは確認されなかった。
- (2) 応力比 0.85 となる 271N/mm² の高応力の圧縮応力が 100 回作用した場合でも、繰返し荷重後の残存強度は荷重履歴のない圧縮強度と同程度であった。
- (3) 繰返し回数の増加に伴い、残留ひずみや上限荷重時ひずみは増加したものの、応力-ひずみ曲線は線形を保ったままであり、普通強度コンクリートのような応力-ひずみ曲線の形状変化は認められなかった。
- (4) 繰返し荷重の上限応力の増加および繰返し荷重回数の増加に伴い、静弾性係数は徐々に低下することが確認できた。しかし、この低下の割合は普通強度コンクリートと比較して著しく小さく、定応力繰返し圧縮荷重における PFC の内部の微細ひび割れの発生や進展が普通強度コンクリートと比較して少ないことが示唆された。

謝辞

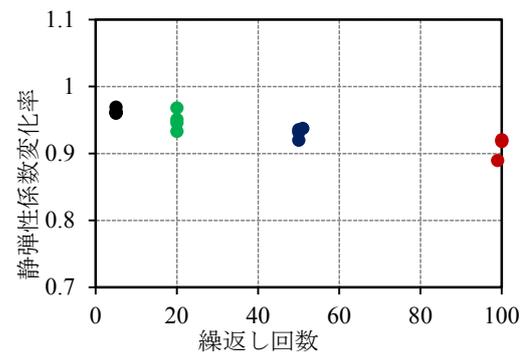
本研究は、公益社団法人日本コンクリート工学会の研究助成を受けて実施しました。また、PFC 供試体の作製は、太平洋セメント株式会社中央研究所の河野克哉氏、森香奈子氏にご協力いただきました。ここに記して深謝いたします。

参考文献

- 1) 河野 克哉, 中山 莉沙, 多田 克彦: 通常流し込み成型で 460N/mm² の圧縮強度を発現する新規セメント硬化体, プレストレストコンクリート工学会, 第 24 回シンポジウム論文集, pp.279-284, 2016
- 2) 柳田 龍平, 中村 拓郎, 河野 克哉, 二羽 淳一郎: 圧縮強度 400N/mm² の最密充填マトリクスを有する繊維補強コンクリートの力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.279-284, 2016
- 3) 例えば, 西田 浩和, 片寄 哲務, 佐藤 幸博,



(a) 上限応力による影響



(b) 繰返し回数による影響

図-10 繰返し荷重後の静弾性係数変化率

寺岡 勝: 定荷重繰返し圧縮荷重を受ける高強度コンクリートの損傷評価の試み, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1181-1186, 2006

- 4) 安田 瑛紀, 森 香奈子, 河野 克哉, 多田 克彦: パネルによる護岸補修工事に適用した圧縮強度 350N/mm² を有する繊維補強コンクリートの基礎性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.2119-2124, 2017
- 5) 三橋 博三, 六郷 恵哲, 国枝 稔: コンクリートのひび割れと破壊の力学, 技報堂出版, 2010
- 6) 六車 熙, 富永 恵: Repeated Over-Load をうけるコンクリートの力学的性質の遷移減少について, 材料, 第 19 巻, 第 200 号, pp.413-422, 1970
- 7) 中村 拓郎, 谷口 円: 繰返し荷重履歴を受けたコンクリートの微細ひび割れと力学特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.435-440, 2016
- 8) 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