

論文 圧縮疲労荷重を受けるコンクリートの局所破壊進展に関する実験的研究

小西 麻央*1・上田 尚史*2

要旨：本研究では、一定繰返し圧縮試験を実施し、巨視的な応答と局所的な応答の両面からコンクリートの疲労破壊の評価を試みた。その結果、疲労寿命はおおきくばらつき、供試体の破壊形態は主に 3 つに分けられることが確認された。またコンクリート供試体は上部側の変形が大きく、局所化が生じていることが確認された。局所位置では損傷の蓄積・進展が著しくなることが考えられ、局所位置と破壊形態には何らかの関係があると推定したが、本試験では明確な関係は見られなかった。しかし局所位置では終局時に急激なひずみの増加や、剛性の低下が確認され、破壊時に局所位置から破壊が生じている可能性が推察された。

キーワード：疲労、繰返し載荷、損傷、剛性低下、残留ひずみ、局所化

1. はじめに

コンクリートの疲労に対する研究はこれまで多くの研究者によって行われてきた。例えば、松下ら¹⁾は同一条件下においても大きくばらつく疲労寿命を統計的に扱い、応力比と繰返し回数の関係を提案している。また、伊藤ら²⁾は疲労寿命の他に疲労荷重下における供試体中央部のひずみを計測し、ひずみの増加や剛性低下を明らかにしている。このようにコンクリートの疲労試験は供試体を一様な材料実験として扱われてきた。

しかし、コンクリートは複合材料であるため、厳密には一様な材料として扱うことはできないと考える。繰返し圧縮荷重下のコンクリートでは局所的に生じた微細な損傷が蓄積することで破壊に至ると考えられるため、局所的な挙動を把握することで疲労破壊を評価できる可能性がある。

そこで本研究では、疲労破壊における局所的な挙動を明らかにすることを目的として、疲労荷重下におけるコンクリートに複数個所でひずみを計測し、変形や損傷が局所的に生じていることを確認した。そして、局所位置の挙動と供試体中央部の挙動の違いを明確にした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

供試体はφ100×200mmの円柱供試体で、レディーミクスコンクリートを用いて作製した。表-1に本研究で用いたコンクリートの配合を示す。配合は、水セメント

表-1 コンクリートの配合表

G _{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤 (g/m ³)
			W	C	S	G	
20	57	48.7	177	311	857	935	3300

比を 57%，粗骨材の最大寸法は 20mm とした。供試体は打設の 24 時間後に脱型し、100 日間水中養生した。その後、試験時の供試体の強度増加およびクリープの影響を可能な限り小さくするために、平均温度約 19℃，平均相対湿度約 54%の室内に 3 年間程度静置した。試験は材齢 1214 日（3 年 3 カ月 27 日）目から順次行った。

2.2 載荷条件および計測項目

表-2 に実験ケースおよび試験材齢を示す。本研究では、3 通りの載荷試験を実施した。圧縮強度を求めることを目的とした静的単調圧縮試験(S-1～S-5)，静的載荷時における塑性ひずみおよび剛性変化などの内部状態を把握することを目的とした漸増繰返し載荷試験(SC-1～SC-3)，疲労破壊に至るまでの挙動や破壊形態を把握するための疲労試験(C-1～C-12)である。

疲労載荷には油圧式疲労試験機を使用した。供試体は打設面を上にして設置し、上下端には載荷時の摩擦を排除するためにグリースを塗布したテフロンシートを 2 枚

表-2 実験ケースおよび試験材齢

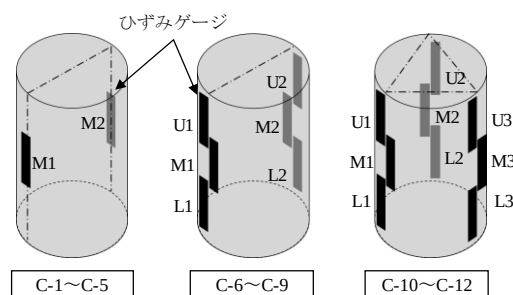
供試体名	供試体数 (本)	載荷方法		試験材齢 (日)	
S-1～S-5	5	静的単調圧縮載荷		1215	
SC-1～SC-3	3	漸増繰返し載荷		1295	
C-1	-	疲労試験	静的載荷 ＋ 動的載荷	1221	
C-2	-			1222	
C-3	-			1231	
C-4	-			1233	
C-5	-				
C-6	-		動的載荷	1250	
C-7	-				
C-8	-			1251	
C-9	-				
C-10	-				
C-11	-				1277
C-12	-				1278
			1279		

*1 関西大学大学院 理工学研究科環境都市工学専攻 (学生会員)

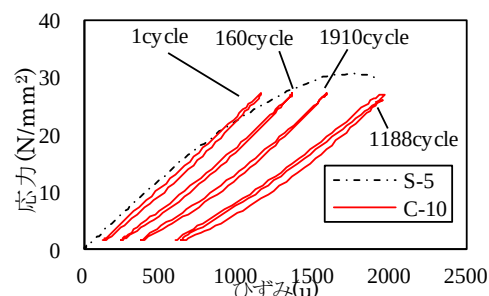
*2 関西大学 環境都市工学部都市システム工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

表－3 疲労寿命と供試体中央部の最大ひずみ、終局ひずみ

供試体名	N_f	$\varepsilon_1(\mu)$	$\varepsilon_{max}(\mu)$	破壊形態	破壊位置	局所位置
C-1	68	1190	2197	-	-	-
C-2	182	1177	1571	-	-	-
C-3	4	1195	1708	すべり破壊	上部から中部	-
C-4	210	1146	1393	局所破壊	上部の一部	-
C-5	196	1254	2323	すべり破壊	上部から下部	-
C-6	98	1206	1352	すべり破壊	上部から下部	U2
C-7	7310	1068	1658 ($N/N_f=0.96$)	粉砕破壊	上部と中部	M2
C-8	560	1128	1639	すべり破壊	上部から中部	U1
C-9	492	1204	1846 ($N/N_f=0.92$)	すべり破壊	上部から下部	U2
C-10	1189	1128	1962	粉砕破壊	上部と中部	U1
C-11	608	1316	2025	粉砕破壊	上部と中部	U2
C-12	1198	1023	1437 ($N/N_f=0.95$)	粉砕破壊	上部	U3



図－1 ひずみ計測箇所図



図－2 応力—供試体中央部ひずみ曲線

重ねて挿入した。載荷応力は上限応力を圧縮強度の85%、下限応力を強度の5%とし、一定繰返し圧縮試験を行った。なお、圧縮強度は5本の静的単調圧縮試験から得られた結果を用いた。5本の平均圧縮強度は31.9(N/mm²)であり、標準偏差は1.22(N/mm²)であった。疲労試験は載荷時に上限応力に達しなくなった時点で疲労破壊したと判断し、その繰返し載荷回数を疲労寿命とした。C-1～C-5は1～10サイクル目までは静的に繰返し載荷を行い、その後は1Hzで断続的に繰返し載荷を行った。C-6～C-12においては1サイクル目から疲労寿命に達するまで、載荷速度1～5Hzで動的に繰返し載荷を行った。ただし、動的載荷においてはサイクルが定常状態に達するまで、応力の小さい範囲で数サイクルの載荷がされる。したがって、本研究では応力が初めて上限応力に達したサイクルを1サイクル目とした。

載荷時の測定項目は、荷重と供試体軸方向のひずみとした。各供試体のひずみの計測箇所を図－1に示す。C-1～C-5は供試体高さ中央部の対称線上にある2線上のひずみを計測した。C-6～C-12は供試体高さ方向における挙動の違いを把握するため、供試体上部、中部、下部のひずみを計測した。ただし、C-6～C-9は対称線上にある2線上のひずみを、C-10～C-12は供試体断面に対して正三角形の頂点にあたる3線上のひずみを計測した。C-10～C-12に対しては、供試体内部の損傷状況を把握するために、載荷初期においては載荷回数25回ごとに、75回目以降はひずみ値に応じて適宜、超音波伝播速度を測定した。超音波伝播速度は供試体上部、中部、下部において2つの探触子を対象となる2線上に配置し、測定した。

3. 疲労試験における巨視的な応答

3.1 応力—ひずみ曲線および疲労寿命

図－2に応力—ひずみ曲線の一例としてS-5、C-10の結果を示す。ただし、C-10は代表的なループとして、1、160、1910、1188サイクル目の応力—ひずみ曲線を示す。全ての疲労試験において、繰返し載荷回数に伴い上限応力時のひずみ（以下、最大ひずみ）および下限応力時のひずみ（以下、最小ひずみ）が増加することが確認された。また、載荷回数の増加に伴い、応力—ひずみ曲線は線形関係から下に凸の形状へと変化した。これらの挙動は、既往の研究^{例えば2)}においても確認されているものであり、本試験においても同様の傾向が確認された。

表－3に各供試体の疲労寿命 N_f および1サイクル目の最大ひずみ ε_1 、疲労破壊に至った際の最大荷重時のひずみ ε_{max} （以下、終局ひずみ）を示す。なお、 $\varepsilon_1, \varepsilon_{max}$ はともに供試体中央部で計測したひずみの平均とした。ただし、疲労破壊時のひずみを計測できなかった供試体については、計測ができたサイクルの最大ひずみを記載している。本研究では、疲労寿命に対する載荷回数の比を正規繰返し載荷回数と定義し、()内にはそのサイクルの正規繰返し載荷回数を示す。表－3より ε_1 はいずれの供試体でも1000 μ ～1300 μ の範囲にあり、ほぼ同程度であった。一方、疲労寿命は大きくばらつき、最も小さいもので4サイクル、最も大きいもので7310サイクルであった。また、 ε_{max} は計測できているものでは、1300～2300 μ の範囲であった。

3.2 繰返し載荷に伴うひずみ増加および剛性低下

図－3に繰返し載荷に伴う供試体中央部の最小ひずみの増加を示す。なお、ひずみは供試体中央部で計測した

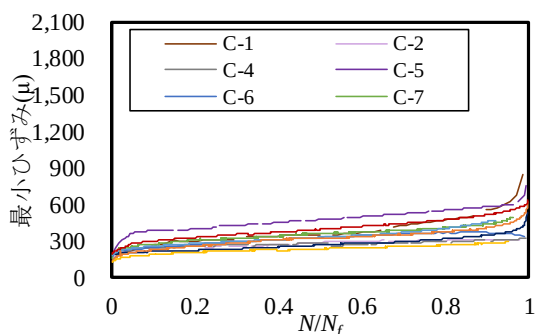


図-3 正規繰返し荷回数と
供試体中央部の最小ひずみの関係

ひずみの平均値とした。図より、各供試体の疲労寿命はばらつくものの、破壊に至るまでのひずみの増加傾向は同様であることが分かる。図に示すように最小ひずみは荷初期において急激に増加し、その後緩やかに増加した後、破壊直前にほとんどの供試体において急激に増加する傾向にあった。このように、疲労破壊に至るまでのひずみの増加を3段階に分離できることは既往の研究においても確認されており、本試験でも同様の傾向が確認された。

図-4 に繰返し荷に伴う供試体中央部の剛性倍率を示す。剛性はそのサイクルにおける上限応力時と除荷後の下限応力時における点の割線剛性とし、1 サイクル目の剛性で除して無次元化した。ただし、前述したように C-1～5 は 1 サイクル目を静的に荷しており、動的荷である C-6～12 とは 1 サイクル目の条件が異なる。したがって、C-1～5 の結果は C-6～12 と比較できないため、図には記載していない。図より全ての供試体において荷初期に大きく剛性が低下し、その後緩やかに低下した。剛性倍率の低下はばらつきが大きく、破壊直前に最も低下したものでは 0.7 程度まで低下した。

3.3 供試体の破壊形態

写真-1 に供試体の破壊形態を示す。また、表-3 に各供試体の破壊形態および破壊位置を示す。ただし、供試体は急速に破壊したため、試験終了後の供試体の状態から破壊位置を判断した。表に示すように、本研究では供試体の破壊形態は主に 3 つに分けられた。一つ目はすべり破壊であり、供試体の上部から中部あるいは下部にかけてせん断帯が形成され破壊した。二つ目は粉碎破壊であり、供試体が細かく砕けるように破壊した。三つ目は局所破壊であり、供試体の一部が局所的に圧壊した。破壊形態は疲労寿命が大きいほど粉碎破壊になる傾向が見られた。これは疲労寿命が大きいほど供試体内部に微細なひび割れが多く発生し、粉碎破壊に至ったためであると考えられる。ただし、この傾向は限られた範囲内での結果であるため、疲労寿命と破壊形態の関係については、さらなる検討が必要である。

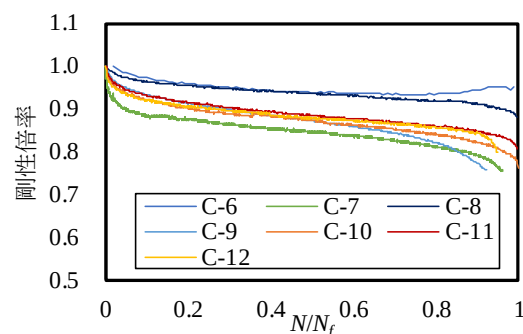
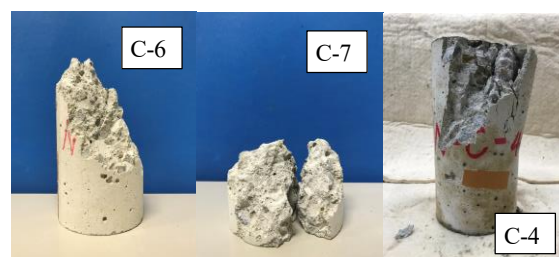


図-4 正規繰返し荷回数と
供試体中央部の剛性倍率の関係



(a) すべり破壊 (b) 粉碎破壊 (c) 局所破壊
写真-1 供試体の破壊形態

コンクリートの圧縮疲労破壊が微視的なひび割れの進展であること³⁾を考慮すると、圧縮荷荷時における供試体内部の応力の不均一性の影響は、静的荷荷時と比較して大きくなることが考えられる。すなわち、繰返し荷荷により局所的に損傷が蓄積されたことにより、特徴的な破壊形態が生じたものと推察される。次章以降では、局所的な応答に着目して疲労破壊を評価することを試みた。

4 疲労試験による局所的な応答

4.1 供試体高さ方向位置による挙動の違い

供試体軸方向の高さ位置における挙動の違いを把握するため、供試体上部、中央部、下部で測定したひずみの平均値を比較した。

図-5 に C-6 および C-8～12 の各高さにおいて測定された最小ひずみの平均値を示す。なお、C-6 は下部のひずみを計測できなかったため結果を上部と中央部の結果のみを記載する。図より、破壊形態に関わらず最小ひずみは上部から順に大きく、下部に向かうほど小さい。つまり、上部側ほど塑性変形が大きく、高さ方向における局所化が生じていることが確認された。一般にコンクリートはブリーディングの影響により、円柱供試体であっても強度特性に空間的なばらつきが存在することが知られている⁴⁾。本実験においても、ブリーディングの影響により供試体上部が脆弱となり、そこでの塑性変形が大きくなったものと推察される。ただし、強度の空間的なばらつきが局所的な挙動に及ぼす影響については、さらなる検討が必要である。

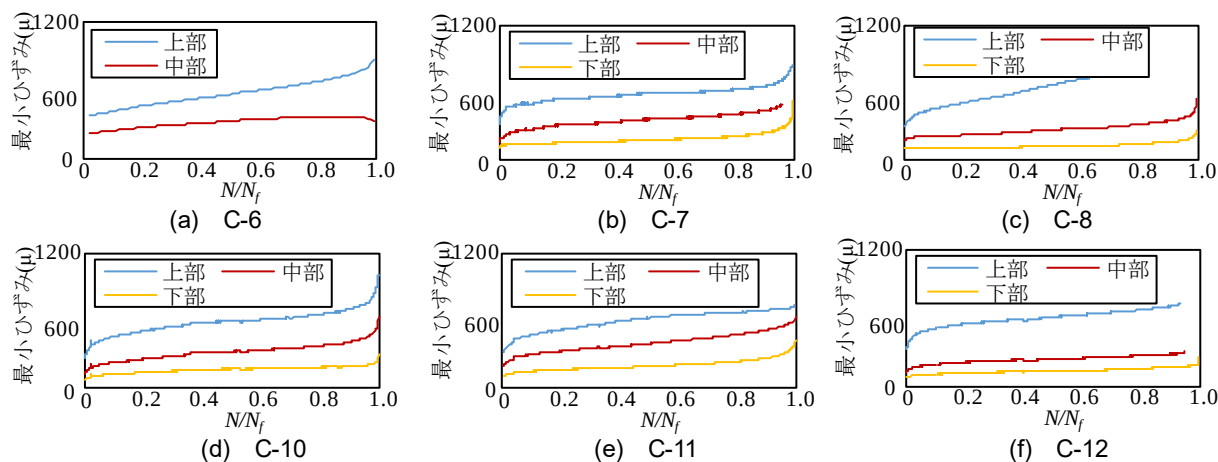


図-5 供試体上部、中部、下部における残留ひずみの増加

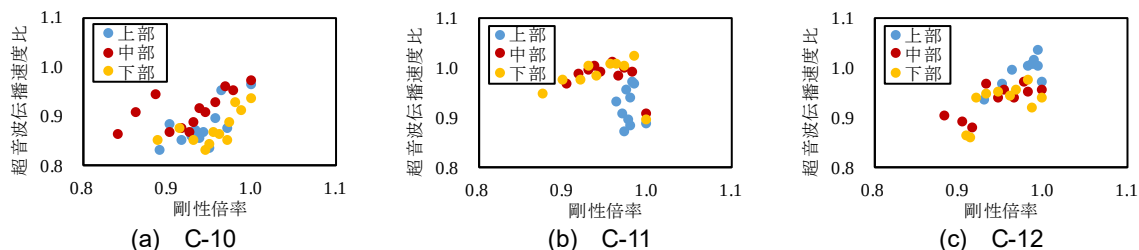


図-6 供試体上部、中部、下部における超音波伝播速度比と剛性倍率の関係

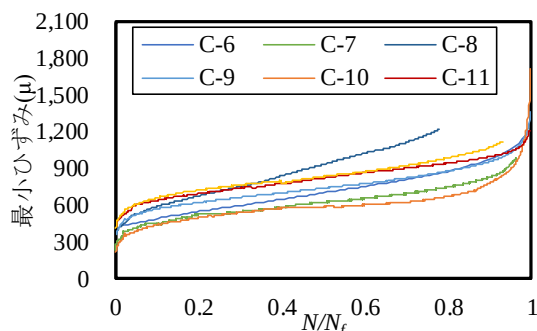


図-7 正規繰返し载荷回数と局所位置の最小ひずみの関係

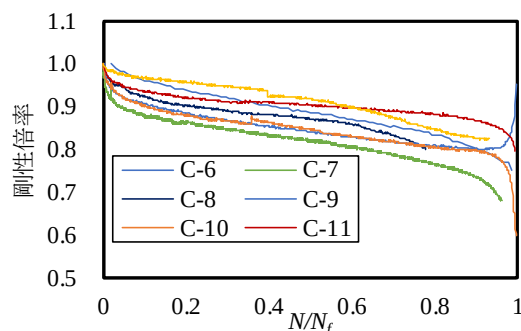


図-8 正規繰返し载荷回数と局所位置の剛性倍率の関係

図-6 に供試体上部、中部、下部の剛性倍率と超音波伝播速度比の関係を示す。なお、縦軸は荷重前の超音波伝播速度に対するそのサイクルにおける超音波伝播速度の比である。中村ら⁹⁾は、ひび割れ密度が大きくなるほど超音波伝播速度比が低下することを明らかにしている。よって損傷を示す剛性の低下率と超音波伝播速度比においても相関関係にあると考えられる。しかし、本試験では剛性倍率と超音波伝播速度比に明確な関係は確認できなかった。今回の測定では、測点数が少なかったため供試体に生じた損傷を適切に評価できなかったためであると考えられる。

4.2 局所位置の最小ひずみの増加と剛性低下

4.1 より供試体上部側で局所化が生じていることが明らかになった。そこで、局所化が生じている箇所に着目し、局所位置における挙動と供試体中央部における挙動を比較した。

表-3 に各供試体の局所位置を、図-7 に繰返し荷重に伴う局所位置の最小ひずみの増加を示す。なお、局所位

置はひずみ増加の第2段階において最も最小ひずみの大きい計測箇所とした。図より局所位置の最小ひずみは、供試体中央部のひずみと同様に、荷重初期に急激に増加し、その後緩やかに増加した後、破壊直前の急激な増加傾向が見られた。また、局所位置の最小ひずみは破壊直前、供試体中央部の最小ひずみの倍近くまで増加していた。

図-8 に繰返し荷重に伴う局所位置の剛性倍率を示す。なお、局所位置は図-7 の最小ひずみと同じ計測箇所とした。図より、局所位置の剛性は供試体中央部と同様に、荷重初期に急激に低下し、その後線形的に低下した後、破壊直前に再び急激に低下する傾向が確認された。

図-9 および図-10 に、それぞれ供試体中央部と局所位置の最小ひずみおよび剛性倍率の変化率を示す。なお、変化率は最小ひずみの増加が安定した $N/N_f=0.1$ から $N/N_f=0.8$ までの最小ひずみおよび剛性倍率を直線近似して算出した。図-9 より、局所位置の最小ひずみの変化率は、供試体中央部のそれと比較して大きい。これよ

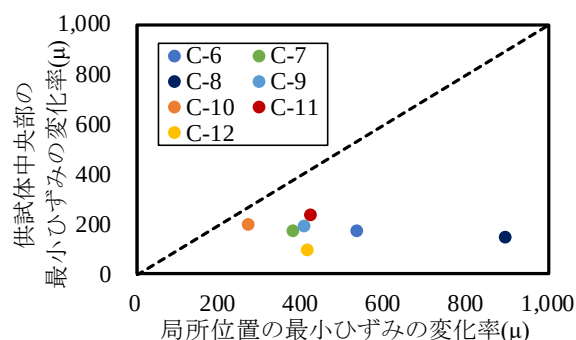


図-9 供試体中央部と局所位置の最小ひずみの変化率

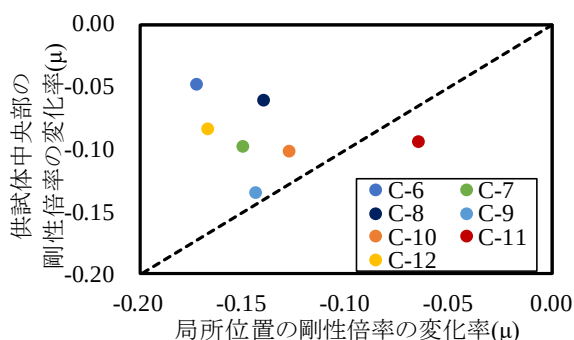


図-10 供試体中央部と局所位置の最小ひずみの変化率

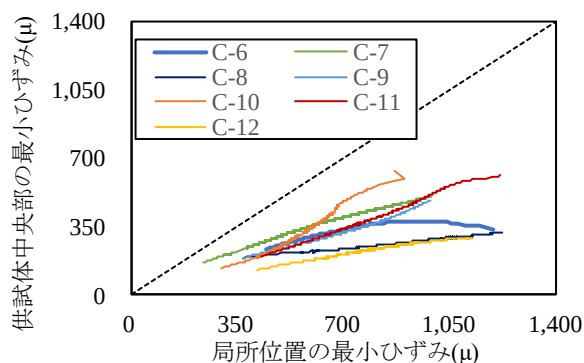


図-11 供試体中央部と局所位置の最小ひずみ

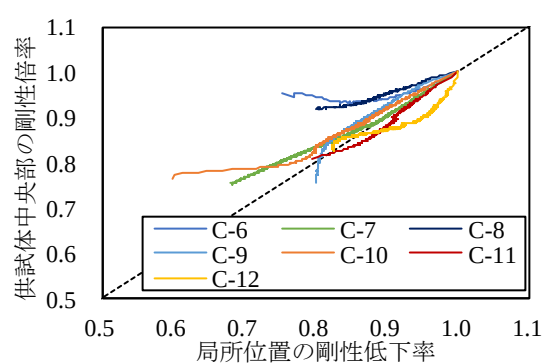


図-12 供試体中央部と局所位置の剛性倍率

り、局所位置では1サイクル当たりの塑性変形が供試体中央部と比較して大きいことが考えられる。図-10より、ほとんどの供試体において剛性倍率の変化率は、供試体中央部より局所位置が大きい。これより、局所位置では供試体中央部と比較すると、1サイクル当たりに与えられる損傷が大きい傾向にあると言える。

このことから、疲労破壊時には局所的に損傷が蓄積されていると推察される。したがって局所的な挙動を把握することで疲労破壊に至るまでの挙動を評価できる可能性がある。

局所位置の損傷が、供試体中央部に対してどの程度の局所化が生じているのかを明らかにするため、供試体中央部と局所位置の最小ひずみおよび剛性倍率の関係を明確にした。

図-11に供試体中央部と局所位置の最小ひずみの関係を示す。なお、供試体中央部の最小ひずみは供試体中央部で計測したひずみの平均値とした。図より全ての供試体において載荷に伴い、供試体中央部に対する局所位置の最小ひずみが大きくなっていく傾向が見られた。またC-6においては、疲労破壊前には急激に局所位置の最小ひずみが増加しており、局所化が著しくなり破壊に至った。

図-12に供試体中央部と局所位置の剛性倍率の関係を示す。なお、供試体中央部の剛性は供試体中央部で計測したひずみの平均値を用いて算定した。図よりC-6～10は常に供試体中央部より局所位置の剛性倍率が大きい。また、C-6、C-10、C-12においては終局時に急激に局

所位置の剛性が低下し、局所化が著しくなった。一方、C-11、C-12のように供試体中央部よりも剛性倍率が小さい局所位置も存在した。

また、局所的に塑性変形が生じていても、かならずしも、剛性も局所的に低下するわけではないことが明らかになった。

また、本実験では局所位置と破壊形態、および破壊位置の関係は確認されなかった。しかし、局所位置からひび割れが進展し破壊が生じることを考えると、局所位置と破壊形態には何らかの関係があると考えられる。これについては今後さらなる実験データを蓄積して検討する必要がある。

4.3 最大ひずみと最小ひずみおよび剛性の関係

前川らの研究⁹⁾により、静的圧縮荷重下のコンクリートの塑性ひずみおよび剛性低下は、過去最大のひずみを用いることで表現できることが明らかにされている。そこで、疲労荷重下における最大ひずみと最小ひずみの関係、最大ひずみと剛性倍率の関係を明らかにした。

図-13、図-14に漸増繰返し載荷試験および、疲労試験より得られた最大ひずみと最小ひずみの関係、最大ひずみと剛性の関係を示す。なお、漸増繰返し載荷試験における最小ひずみとは、荷重が完全に除荷されたときの塑性ひずみとした。漸増繰返し載荷試験の結果は供試体上部、中央部、下部で計測したひずみの平均値であり、剛性はこれらを用いて算定した。疲労試験の結果は4.2節と同様の局所位置のひずみおよび剛性である。なお、図中の曲線は前川ら⁹⁾により提案されている静的試験に

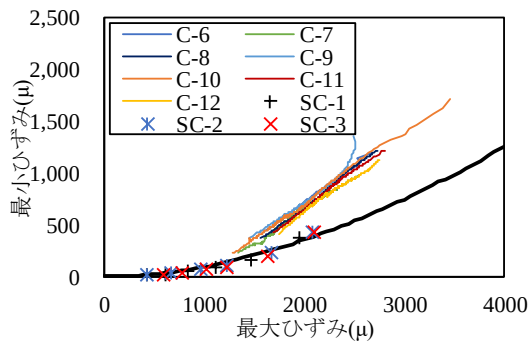


図-13 最大ひずみと最小ひずみの関係

における最大ひずみと塑性ひずみの関係式，最大ひずみと剛性の関係式である。

図-13より，漸増繰返し載荷試験の結果は前川らの提案式と概ね一致した。疲労試験の結果は，すべての供試体において最大ひずみと最小ひずみの関係がおおむね一致し，最大ひずみの増加とともに最小ひずみが増加する傾向を示した。漸増繰返し載荷試験の結果と比較すると最大ひずみに対して最小ひずみの増加が大きい。これは疲労試験の結果は下限応力時のひずみであるのに対して，漸増繰返し載荷試験の結果は塑性ひずみであるためである。また，一般的に疲労試験は静的載荷試験よりも載荷時間が長いため，クリープが生じていると考えられるが，本研究の供試体は材齢が十分に大きく，また供試体は気乾状態であるためクリープが生じていた可能性は低いと考えられる。

図-14より，漸増繰返し載荷試験の結果は前川らの提案式と比較して，最大ひずみに対する剛性の低下率が小さくなった。これは，前川らの式では剛性倍率は初期剛性に対する比であるのに対して，本研究では1サイクル目の除荷剛性に対する比で示しているためと考えられる。また，疲労試験の結果は漸増繰返し載荷試験の結果と比較すると，最大ひずみに対する剛性倍率が大きくなる傾向が見られた。しかし，最大ひずみが1000μ～3000μにおける範囲では，載荷方法によらず剛性倍率の傾きが同程度である。これより，局所位置においても，最大ひずみの進展量が同じであれば，剛性の低下率も同程度であると言える。

5 まとめ

- (1) 疲労試験の結果，供試体上部側の最小ひずみが大きく，繰返し荷重下におけるひずみ進展の局所化が生じていることが明らかになった。このとき，局所位置では供試体中央部と比較すると，1サイクルあたりのひずみ進展が大きいことが分かった。
- (2) 本試験では供試体の破壊形態が主に3つに分けられ，疲労寿命が大きいほど粉砕破壊する傾向が見られ

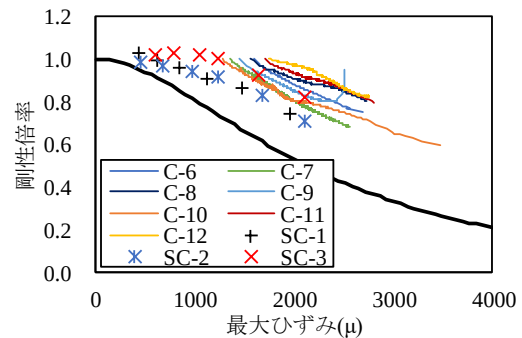


図-14 最大ひずみと剛性倍率の関係

た。また，破壊形態と局所位置の明確な関係は見られなかった。

- (3) 局所位置では，急激な最小ひずみの増加，または急激な剛性の低下など，終局時に局所化が著しくなることが一部の供試体から確認された。これより，破壊時に局所位置のひび割れが顕著になり，破壊が生じている可能性が推察された。
- (4) 最大ひずみと最小ひずみの関係は，疲労荷重下における局所位置でも静的載荷時と同様の傾向にあることが分かった。また，最大ひずみと剛性倍率の関係は，疲労荷重下のコンクリートは最大ひずみに対して剛性倍率が大きいことが確認された。

今後は，供試体内部の損傷状況やひび割れの発生・進展状況を把握することで，局所的な挙動と疲労破壊の関係をより詳細に検討する必要があると考える。

参考文献

- 1) 松下博通，徳光善治：生存確率を考慮したコンクリートの圧縮疲労強度に関する研究，土木学会論文報告集，第284号，pp127-138，1979.4.
- 2) 伊藤益嗣，川満逸男，角掛久雄，大内一：潤滑油中におけるコンクリートの圧縮疲労特性に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.849-854，2007.
- 3) 吉本彰，川上正史：繰返し載荷後のコンクリートの圧縮強度に及ぼすマイクロクラックの影響，材料，24巻，261号，pp.534-539，1975.6.
- 4) 小坂義夫，山田和夫，畑中重光，谷川恭雄：一軸圧縮下のコンクリートの応力-ひずみ関係に関する研究，セメント技術年報，Vol.37，pp.279-282，1983.
- 5) 中村拓郎，谷口円：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.1，pp.435-440，2016.
- 6) 前川宏一，岡村甫：弾塑性破壊モデルに基づくコンクリートの平面応力構成則，コンクリート工学，Vol.21，No.5，pp.97-99，1983.5