

正会員 松下 博通 (九州大学工学部)

○ 牧角 龍恵 ()

1. まえがき

コンクリートは、繰返し荷重などの荷重履歴を受けた場合、静的漸増荷重時における変形状とは異なる変形状を示す。これは、コンクリートの内部組織、すなわち荷重によりコンクリート内部に発生したひびわれの状態が、荷重繰返しとともに変化するためと考えられる。疲労破壊がこのコンクリート内部ひびわれの累積的成長過程の結果として生ずることを考慮すれば、疲労破壊機構を説明するには、繰返し荷重下のコンクリートの変形状を明確に把握する必要がある。この観点のもとに、本研究では、疲労破壊に至る範囲で繰返し応力の大きさを種々変化させた高サイクル圧縮疲労試験を行ない、任意繰返し回数後のひずみ変化ならびに超音波伝播速度の変化を調べ、それら変形状と疲労寿命あるいは疲労破壊との相関について検討考察したものである。

2. 試験方法

供試体は、 $\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$ コンクリート円柱供試体で、その配合を表-1に、使用材料を表-2に示す。材令は5ヶ月以上とし、打設後標準養生を行なった後、試験20日前から実験室内に放置して気乾状態を保ち、試験に供した。疲労試験に先立ち静的荷重試験を行ない(静的圧縮強度、約 330 kg/cm^2)その結果をもとに繰返し応力を定めた。繰返し荷重は、森試験機製作所製疲労試験機(荷重繰返し速度300回分)を使用し、繰返し応力の大きさは、その変形状に及ぼす影響をとらえるため、最大および最小繰返し応力をも種々変化させて行った。

表-1. コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	Gmax. (mm)	単 位 量 (kg/m ³)			
			W	C	S	G
70	44	20	180	257	807	1164

表-2. 使用材料

	種 類	比 率	吸水率	F.M.
細骨材	海砂	2.59	1.09	2.73
粗骨材	角閃岩砕石	2.95	1.78	6.60
セメント	普通ポルト	3.16	$\sigma_{28} = 398 \text{ kg/cm}^2$	

ひずみ測定は、供試体側面に貼付したワイヤーストレインゲージ、PL-60を用いて、超音波伝播速度測定にはパルジットを用いて行った。荷重方向に直角方向の超音波伝播速度測定には、 $5 \times 5 \times 15 \text{ cm}$ 角柱供試体を用いた。任意繰返し回数後、試験機をとめて除荷し、最大繰返し応力までの静的荷重により変形を測定し、その後繰返し荷重を続行した。

3. 応力-ひずみ曲線の変化

各繰返し回数後における応力と縦ひずみおよび横ひずみの関係の一例を図-1~3に示す。加力曲線は、縦および横ひずみいずれの場合も、最初上に凸であるが、繰返し初期において下に凸となり、その勾配も繰返し回数とともに変化している。ヒステリシスの面積は、第1回目の荷重時がそれ以後のものにくらべてかなり大きく、荷重繰返し回数とともにその面積は減少するが、破壊近傍になると再び増加している。また、繰返し最大応力が大きいほどその面積も大きくなっており、特に横ひずみにおいてその傾向が顕著である。この横ひずみにおける応力-ひずみ曲線の変化は、弾性変形のポアソン効果以外に内部ひびわれの量が大きく影響するものと考えられ、このことは縦ひずみより大きなヒス

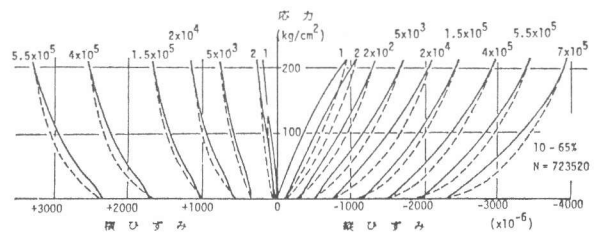


図-1. 応力-ひずみ曲線 (S=10~65%)

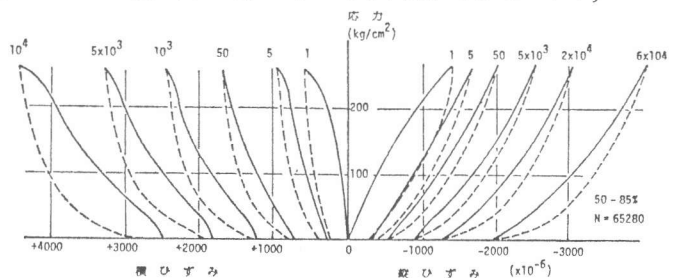


図-2. 応力-ひずみ曲線 (S=50~85%)

テリシスがみられることからもうかがえる。図-3は、繰返し回数200万回で破壊しなかった供試体の応力-ひずみ曲線であるが、縦および横ひずみいずれも直線に近い曲線を示し、ヒステリシスならびに除荷時の残留ひずみも小さい。すなわち、載荷により内部ひびわれは発生しているが、また破壊に至らせるような不安定なひびわれ状態あるいはひびわれ量にはなっていないと考えられる。図-4は100万回繰返し後静的に破壊された供試体の応力-ひずみ曲線であるが、実線で示す処女供試体の曲線とはかなり異なっている。ただし、体積ひずみの変曲点である80%前後では、縦、横ひずみいずれも残留ひずみを除けば、処女供試体のそれと同程度の値を示しており、また強度は処女供試体のそれより5%上回っていた。先に報告した残存強度試験結果においても、強度増加がほとんどであり、残留ひずみの増加（内部ひびわれの増加）はある程度までは、コンクリートの耐力を弱めるよりむしろ強める働きがあると考えられる。次に、残留ひずみを除いた応力-ひずみ曲線の、異なる繰返し応力下で近似した形状がみられる一例を図-5に示す。繰返し応力の大きさあるいは繰返し回数が異なるにしろ、よく一致しており、またそれらの応力-ひずみ曲線が生じる繰返し回数の疲労寿命Nに対する比も同程度であった。応力-ひずみ曲線が荷重繰返しとともに徐々に変化することを考えれば、さらに多くの同一形状の曲線が生じることが予想され、このことから、繰返し応力や疲労寿命が異なる場合でも、コンクリートが疲労破壊に至るまでの内部ひびわれの挙動は、同じ性質を有するものと考えられる。

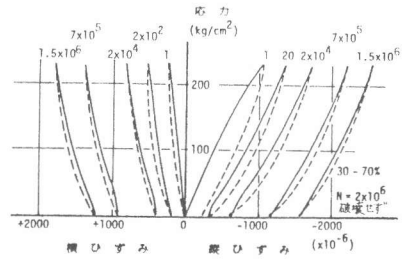


図-3. 応力-ひずみ曲線 ($S_2=30\sim70\%$)

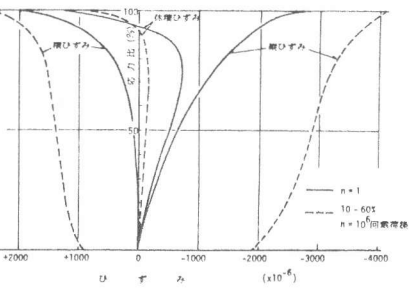


図-4. 荷重繰返し後の応力-ひずみ曲線

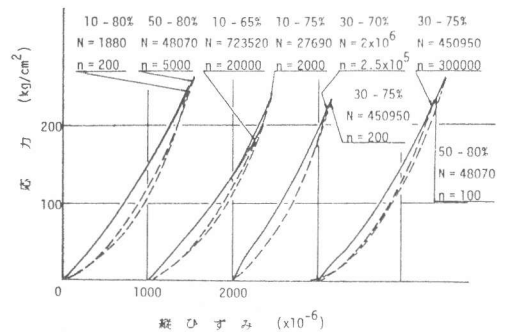


図-5. 近似した形状の応力-ひずみ曲線

4. 最大ひずみおよび残留ひずみの変化

繰返し回数にともなう最大ひずみ（繰返し最大応力時のひずみ）

および残留ひずみの変化の一例を図-6, 7に示す。横軸には、各繰返し応力における疲労寿命Nに対する繰返し回数の比を用いている。いずれの場合も、 $n/N = 0.1$ 程度までの初期繰返しでひずみは急激にのび、その後緩やかな一定勾配を保ちながら増加し、 $n/N = 0.8 \sim 0.9$ 程度から再び急激な増加を示して、破壊に至っている。残留ひずみも同様の傾向を示しながら増加しており、特に一定勾配の領域（定常領域）では、最大ひずみと残留ひずみの増加は、ほぼ等しくなっている。

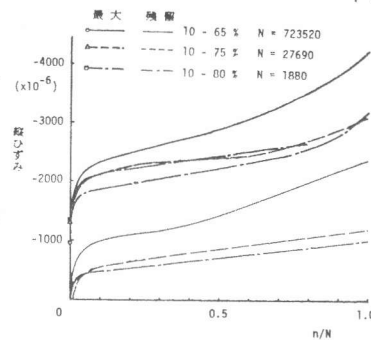


図-6. 最大および残留ひずみの変化

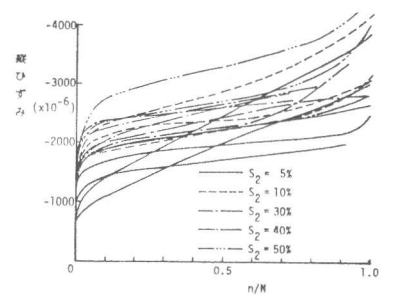


図-8. 最大縦ひずみの変化

次に、各繰返し応力における最大ひずみの変化を図-8に示す。繰返し応力の大きさにかかわらず、同様の傾向はみられるが、疲労破壊時ひずみ量はかなりばらっている。

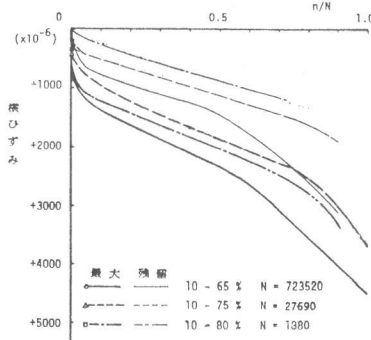


図-7. 最大および残留ひずみの変化

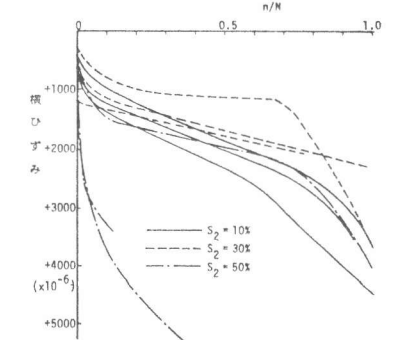


図-9. 最大横ひずみの変化

これは、疲労寿命の長短に影響されるためと考えられるが、いずれの場合においても、処女供試体の静的破壊時ひずみより大きく、

3000 ~ 4000 × 10⁶以上の広い範囲となっている。また、図-9は、横ひずみの変化であるが、その変化率は縦ひずみのそれより急な傾向を示している。この各繰返し応力における縦ひずみと横ひずみとの関係を図-10に示す。縦ひずみが 1500 × 10⁻⁶程度までは、ポアソン比が 0.25 前後の関係を示しているが、縦ひずみが 2000 × 10⁻⁶前後になると、ほとんどがポアソン比 0.5 以上の関係を示し、それ以上の縦ひずみにおいては、ごくわずかの縦ひずみの増加に対してかなりの増加を示すようになる。2000 × 10⁻⁶前後は、処女供試体の静的破壊時ひずみにはほぼ相当するが、松井⁽²⁾はその付近で繰返し荷重下の供試体に可視キ裂が発生すると報告しており、横ひずみの急増は、このひびわりの増加をあらわすものと考えられる。また、図-8にみられる定率領域は、図-10中の $\nu=0.25$ と $\nu=1.0$ の範囲内であった。さらに、ひずみが急増して破壊に至る領域では、ほとんど $\nu=1.0$ 以上の関係がみられ、体積ひずみがかなりの膨張ひずみを示し、すなわち、静的載荷時にはあらわれない内部ひびわりの状態になることが推定される。

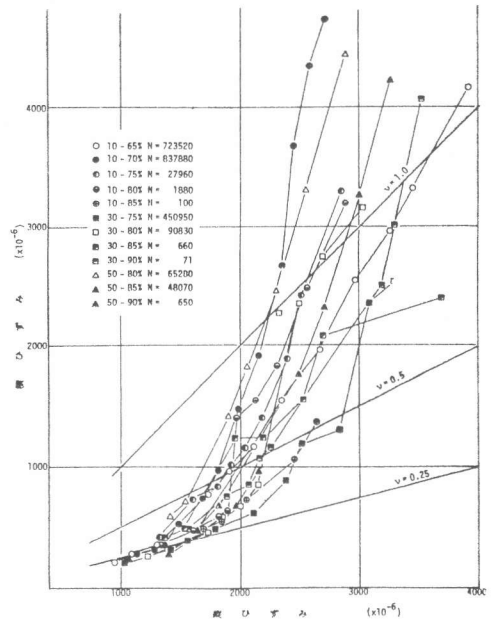


図-10. 縦ひずみと横ひずみの関係

このように、かなりの横ひずみが生じて、コンクリートは繰返し応力に耐えうるが、疲労破壊に対して、縦ひずみの破壊時あるいは破壊近傍の弾性ひずみにどのような傾向があるか求めてみた。表-3に各繰返し応力における疲労寿命とそれらのひずみ量を示す。この弾性ひずみは最大ひずみから残留ひずみを差し引いた値であるが、破壊時最大ひずみ同様、かなりのばらつきを示し一定の傾向は認められない。ちなみに、処女供試体の静的載荷時のイニシャル係数から求めた破壊時弾性ひずみは 1020 ~ 1340 × 10⁻⁶ の範囲であった。次に、図-11に

第1回目の載荷時の弾性ひずみを ϵ_{e0} 、 n 回荷重繰返し後の弾性ひずみを ϵ_{en} とし、そのひずみ増加率 $\Delta\epsilon_e$ と繰返し回数の関係を示す。軽量コンクリートにおいては、 $\Delta\epsilon_e$ が 13% あたりで破壊が生ずるとの報告があるが、本実験においては、図に示されるように、かなりのひずみ増加率を示し、しかも、各繰返し応力によりその値も大きくばらつきており一定の傾向はみられない。また、弾性ひずみと残留ひずみの変化を図-12に示すが、それらひずみの関係と繰返し回数比とは一定の傾向はみられない。ただし、Mehmel⁽⁴⁾とHein⁽⁵⁾が示すように、繰返し回数がある程度以上になると、残留ひずみの方が弾性ひずみより大きくなる傾向は認められる。

表-3. 破壊近傍弾性ひずみと破壊時最大ひずみ

S(%)	N	ϵ_e^*	ϵ_f^{**}
10-65	723520	1640	4200
10-70	837880	1300	3640
10-75	27690	1600	3100
10-80	1880	1810	3140
10-85	100	1700	3300
10-90	29	-	3500
30-70	2000000	1090	-
30-75	450950	1450	3400
30-80	90830	-	3380
30-85	660	1740	3700
30-90	71	1990	3530
50-80	65280	2270	4490
50-85	48070	2230	4000
50-90	650	2050	3590

* 破壊近傍の弾性ひずみ (10⁻⁶)
** 破壊時の最大ひずみ

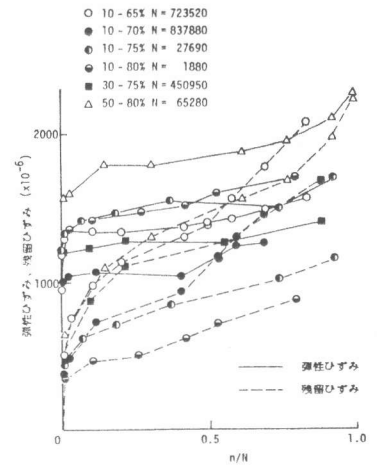


図-12. 弾性ひずみと残留ひずみ

図-13に1サイクルの載荷における割線弾性係数の変化を、 $n=1$ にお

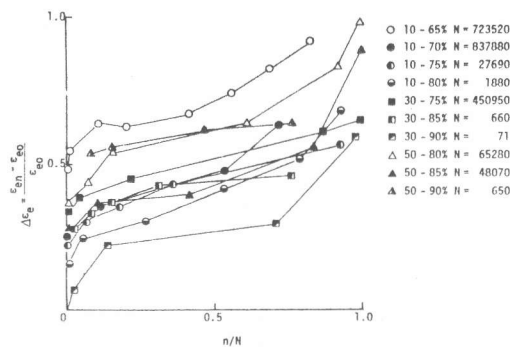


図-11. 弾性ひずみの増加率

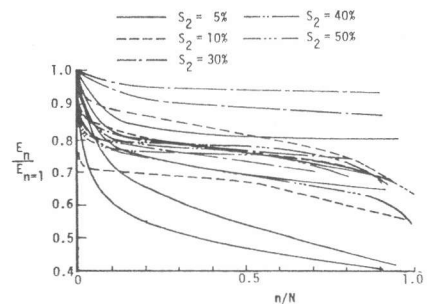


図-13. 割線弾性係数の変化

ける値に対する比で示している。やはり、繰返し初期において急激な減少を示し、その後徐々に減少し、破壊時近傍でさらに急激な低下を示しているが、その減少率はかなりばらつきしており、破壊時近傍で、弾性係数比が0.4~0.9前後となっている。また、図-14に示すポアソン比の変化においても同様に一定の傾向はみられない。これらのことから、ひずみの絶対値あるいはそれに類する値で疲労破壊を定義することは不明確であるといえるが、これは図-8に示すような急激なひずみ増加（不安定なひびわれ増加）の過程を経るためと考えられる。

ここで、疲労寿命に対して、かなり大きな比率を示す定常領域でのひずみ変化をみるに、そのひずみ速度と疲労寿命Nとの間には、図-15に示すような直線関係がみられた。この関係は、繰返し応力の大きさにかわらず一定であり、定常領域初期のひずみ変化で疲労寿命を推定できる有効な手段となりうる。このことから推察すると、定常領域は、繰返し载荷により与えられるひずみエネルギーが、コンクリート内部の各所に発生したひびわれのゆるやかな成長により消費される段階であり、それらひびわれが蓄積できるエネルギーの許容限度を越えた時、ひびわれの急速な成長による不安定な状態になり、破壊に至ると考えられる。その許容量が定常領域におけるひずみ増加分にあらわれるため、図-15にみられる直線関係が成立するものと考えられる。

5. 超音波伝播速度の変化

図-16に荷重繰返しに伴う超音波伝播速度の変化を示す。伝播速度は、繰返し初期において急激な減少を示し、その後徐々に低下した後、破壊時近傍でさらに低下している。また、载荷方向と直角に測定した伝播速度は、平行に測定したものの2~3倍以上の低下を示している。これは、コンクリート内部のひびわれが、载荷方向と平行な方向により多く発生成長していることを示し、また、伝播速度の低下率が繰返し回数とともに変化するのよ、それら内部ひびわれの状態や成長過程が荷重繰返しとともに変化するを示している。図-17に応力と伝播速度の関係の変化を示すが、2回目の载荷から処女载荷時と異なる曲線を示し、かなり低い応力で伝播速度が最小になる傾向がみられる。また、除荷時に処女载荷時にくらべかなり小さな値を示すのは、コンクリートの内部に発生したひびわれが残存するためと考えられ、これらのひびわれが低応力で再び開くため、荷重繰返し後の伝播速度はごくわずかの応力で急激な低下を示し、その後応力の増加に伴い、弾性変形などにより内部組織が密になるため逆に増加すると考えられる。このことは、応力-ひずみ曲線が下に凸の形状を示したすと密接な関係があると考えられる。

参考文献

- (1) 白川淳一、松下博通：“繰返し荷重を受けたコンクリートの残存強度に関する研究” 才33回土木学会報告集第5部、(2) 松井嘉孝、笠井芳夫：“コンクリートの疲労に関する実験的研究”、(3) 渡田純夫、成岡昌夫：“軽量コンクリートの圧縮疲労強度に関する実験” 土木学会論文報告集第176号、(4) A. Melmel、(5) K.E. Heim : G. M. Nardy "Fatigue of Concrete - A Review of Research" より引用

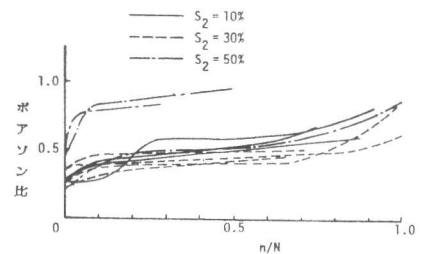


図-14. ポアソン比の変化

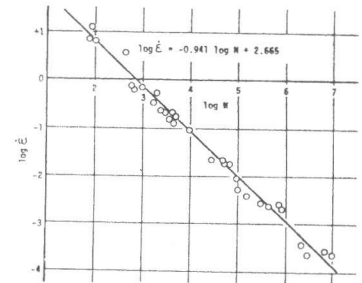


図-15. ひずみ速度と疲労寿命

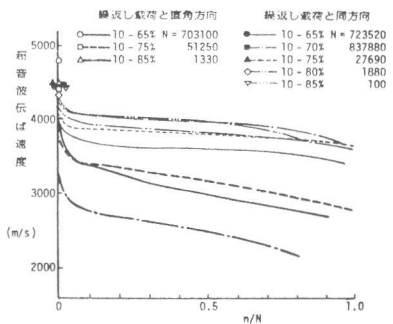
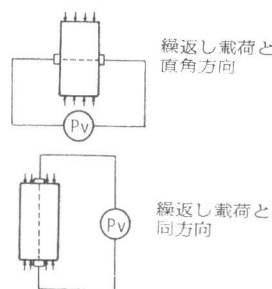


図-16. 超音波伝播速度の変化

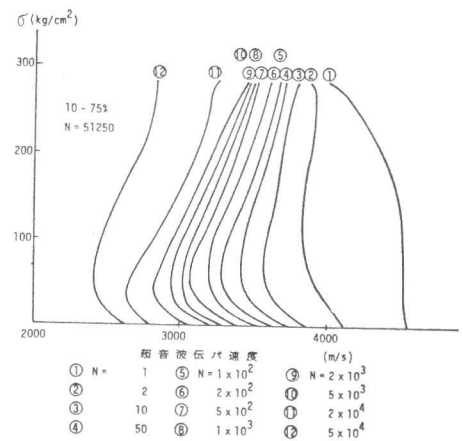


図-17. 応力-伝播速度の関係