

[119] 水中でのコンクリート系部材の低サイクル疲労

正会員 六車 熙 (京都大学工学部)  
 張 耀凱 (中国冶金部建築研究院)  
 正会員 ○安井雅明 (大林組構造設計部)

1 まえがき

コンクリートは、海洋で広く用いられているが、最近では石油プラットフォーム、浮棧橋等が多く、そこでは波浪、風および寒冷地における流水等によりかなりの疲労荷重を受ける。従来、コンクリートおよびコンクリート系部材の疲労性状に関して、水の悪影響の事実が報告されているが、その原因に関してはいまだ不明の点が多い。本論文は、水中でのコンクリート系部材の曲げ疲労強度劣化の原因を究明する事を目的としており、水中でのコンクリートシリンダーの圧縮疲労試験およびRC、PRCおよびPC曲げ材の曲げ疲労試験結果より興味あるいくつかの結論を得た。

2 供試体および養生、試験時環境条件

使用した供試体は、φ10×20 cmのシリンダーおよび図1に示すようなRC、PRCおよびPCはりである。シリンダーの疲労試験条件を記号とともに以下に示す。DA：標準養生空気中試験 DW：標準養生水中試験 WA：水中養生空気中試験 WW：水中養生水中試験 UA：DA試験+超音波伝播速度計測 UW：DW試験+超音波伝播速度計測、なお標準養生とは、本文では、脱型後10週間20℃水中養生し、以後試験開始材令(14週~20週)まで空気中に放置したものをさす。水中養生とは、標準養生の後、空気中に放置したものを、試験開始前2~3週間再び水中に入れそのまま試験に供したものをさす。本報告における供試体名称の1例を下に示す。

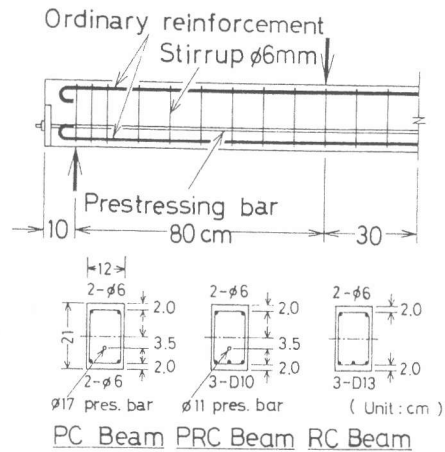


図1 はり供試体の詳細

DA 901 — DA：養生，試験時環境条件

90：上限応力比(%)

1：同一条件での供試体番号

次にはりの疲労試験条件を記号とともに以下に示す。S：標準養生空気中静的試件 A：標準養生空気中試験 W：標準養生水中試験 hW：標準養生中立軸以下水中試験 WA：水中養生空気中試験、なお標準養生とは、脱型後4週間湿布養生し、以後試験開始材令(13週~16週)まで空気中に放置したものをさす。水中養生とは、標準養生の後、空気中に放置したものを、試験開始前3週間水中に入れ、そのまま試験に供したものをさす。本報告におけるはり供試体名称の1例を下に示す。

PRC-WA — PRC：PRCはり

WA：養生，試験時環境条件

使用コンクリートは、山砂、川砂利を用いた普通コンクリートで、その配合および試験材令時性質を表1に示

表1 コンクリートの配合および力学的性質

	Cylinder		Beam	
	DA, DW, UA, UW	WA, WW	S, A, W, hW	WA
The age of tests in weeks	14-20	17	11-16	19
Mix proportion by weight	1:1.99:3.22			
Water cement ratio in %	51			
Measured slump at casting in cm	2.5	3.2	2.1	
Compressive strength in kgf/cm <sup>2</sup>	537	400	416	396
Elastic modulus in x10 <sup>5</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	3.63	2.82	2.62	2.92

表2 PC鋼材および普通鉄筋の機械的性質

	Grade	Diameter in mm	Sectional area in cm <sup>2</sup>	Yield stress in Kgf/cm <sup>2</sup>	Tensile stress in Kgf/cm <sup>2</sup>	Elastic modulus in Kgf/cm <sup>2</sup>
Prestressing steel bar	B1	φ11	0.9503	14153	14542	1.95x10
	C1	φ17	2.27	10396	11674	1.99x10
Ordinary reinforcement	SR24	φ6	0.2827	2076	2767	—
	SD35	φ10	0.7135	5075	7024	2.02x10
	SD35	φ13	1.267	4736	6314	2.00x10

す。P C鋼材および普通鉄筋の機械的性質を表2に示す。P CおよびP R Cはり供試体は、材令4週でプレストレス力の導入を行い、導入後直ちに水セメント比45%のセメントペーストでグラフトを行った。導入および試験時有効プレストレス力を表3に示す。

### 3 試験方法

シリンダーの疲労試験において、荷重は上限応力比を66~90%、下限応力を25.5 kgf/cm<sup>2</sup> (静的強度の約5%)とする正弦波による繰返し荷重とした。なお上限応力比とは、静的圧縮試験により得られた応力ひずみ曲線において、静的強度のA%に対応するひずみを上限応力設定基準とした場合のAの値のことである。測定は、たてひずみをシリンダーの中心に埋込んだ検長60mmのストレインゲージで行った。U AおよびU Wシリーズでは、たてひずみとともにシリンダーの直径方向の超音波伝播速度を測定した。

はりの疲労試験において、荷重は図1に示したように、支点間距離220cm、曲げスパン60cm、せん断スパン80cmの3分点荷重とした。上限荷重はR CおよびP Cはりでは、初荷重時上縁ひずみが1.3‰、P R Cはりでは1.6‰に達したときの荷重(いずれも静的耐力の約80%)とし、下限荷重は0.6tonとした正弦波による繰返し荷重とした。測定は、中央たわみ、曲げスパン相対たわみおよび曲げスパン内に検長50cmで埋め込んだボルトによる上縁および下縁ひずみについて行った。なおこれら上下縁ひずみより曲率を求めた。

### 4 結果および考察

(a) シリンダー試験 図2は、繰返し荷重の上限応力比S(%)と破壊に至るまでの荷重繰返し回数Nの関係を示すものである。図より標準養生供試体においては、明らかに水中の疲労強度が空気中のそれより劣ることがわかる。例えば200万回疲労強度についてみ

れば、空気中疲労強度が約65%であるのに対し、水中疲労強度は約55%と考えられる。水中養生供試体においては、水中と空気中の疲労強度には顕著な差は認められない。繰返し応力とひずみの関係の実測例を図3に示す。繰返し回数が増すにつれて加力曲線は、上に凸の曲線から直線、さらに下に凹の曲線へと変化し、履歴曲線の描く面積も増大し破壊に至っている。なおこの破壊に至るまでの加力減力ループの形状変化に関しては、標準養生供試体と水中養生供試体あるいは水中と空気中の試験条件の違いによる差はほとんど認められなかった。図4にはW AおよびW Wシリーズの、図5にはD AおよびD Wシリーズの繰返し回数と上限応力時ひずみの関係の実測例を示す。水中養生供試体を示した図4では、水中と空気中の差はほとんど認められない。標準養生供試体を示した図5では、初荷重時ひずみが大きい(上限荷重が大きい)ものは、水中においては早期よりひずみが増大し、空気中との差が明らかとなっているのに対し、初荷重時ひずみが小さい(上限荷重が小さい)ものは、水中も空気中も途中までは差がなく、あるところから急激に水中でのひずみが増大している。これはあるクリティカルなひずみ(図5では1.3~1.5‰程度)を越えると内部の疲労損傷が大きくなり、急激に水の悪影響が現われるものと考えられる。内部の疲労損傷の程度を知る目的で、超音波伝播速度を測定したが、その結果を図6お

表3 導入および有効プレストレス力

	Prestressing force in tons		Effective ratio in %
	Transferred	Effective	
PC-S	14.97	14.09	94.1
PC-A	13.55	12.09	89.2
PC-W	15.85	12.69	91.6
PC-WA	14.85	13.93	93.8
PC-hW	14.47	12.85	88.8
PRC-S	7.02	—	—
PRC-A	7.34	6.91	94.1
PRC-W	6.51	6.15	94.5
PRC-WA	5.71	5.07	88.4
PRC-hW	5.25	4.71	90.1

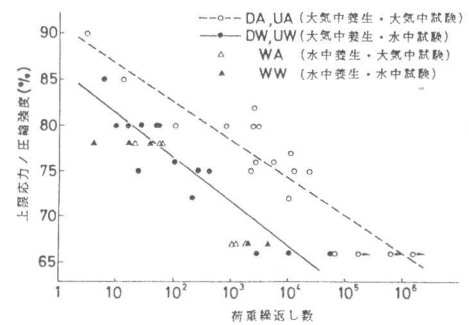


図2 S-N関係

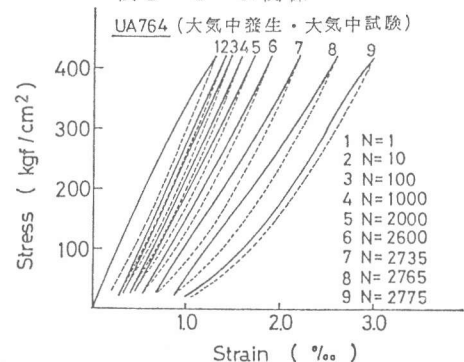


図3 応力ひずみ曲線の形状変化

よび図7に示す。図6は、上限応力時ひずみと各サイクルにおける除荷後の伝播時間の関係を示したもので、ひずみが1.4%程度までは伝播時間はほぼ一定で、それを超えると、ひずみの増大とともに伝播時間が長くなっている。伝播時間が長くなるということは、すなわちコンクリートの内部にひびわれまたは空隙が生じ、超音波伝播速度が遅くなったことを示している。また1.4%程度という値は、図5の水の悪影響が明らかとなり始めるひずみの値にほぼ一致している。図7は繰返し回数と上の伝播時間の関係を示すものだが、同じ供試体の

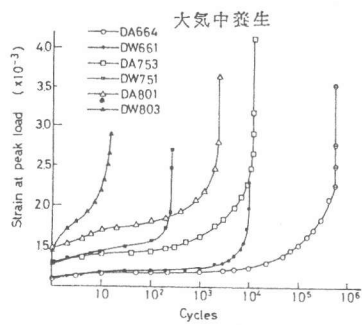


図4 繰返し回数とひずみの関係

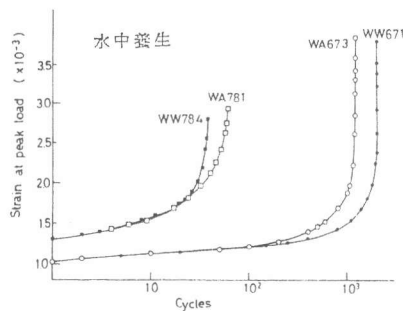


図5 繰返し回数とひずみの関係

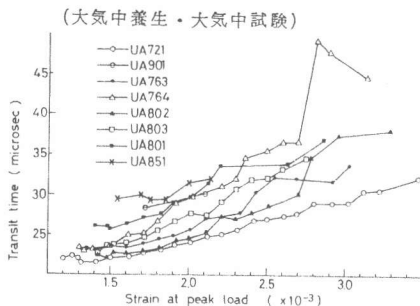


図6 ひずみと伝播時間の関係

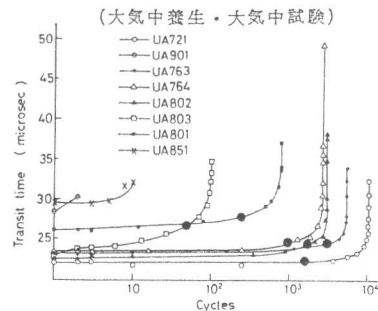


図7 繰返し回数と伝播時間の関係

繰返し回数と上限応力時ひずみの関係を示す図8と比較して、ほとんど相似形をしている。これは図6の結果とあわせて考えると、内部にひびわれまたは空隙が生じ、超音波伝播速度が遅くなり始めるひずみを越えれば、ひずみの値自身が疲労損傷の指標になることを示している。

(b) はり試験 はりの試験結果を表4にまとめて示す。破壊は、RC-hW 供試体のせん断破壊の一例を除いて他はすべてコンクリートの曲げ圧縮破壊であった。図9は、繰返し回数と上限荷重時の曲げスパンコンクリートの圧縮縁ひずみの関係を示したものである。各供試体とも繰返し回数の増加とともに、徐々に圧縮縁ひずみも増大し、破壊近くなると急激に増大している。これは、圧縮縁ひずみだけでなく、引張縁ひずみ、中央たわみとも同様の傾向を示した。なおせん断で破壊したRC-hW 供試体は、破壊前の圧縮縁ひずみの急増はみられない。またPC-WA 供試体は、2回目からすでに圧縮縁ひずみの急増がみられ、極端に疲労強度が弱くなっているが原因は不明である。このPC-WA 供試体を除けば、各供試体ともAシリーズと比較して、W, hWおよびWAシリーズはおよそ1~2けたの破壊に至るまでの繰返し回数が少なくなっている。図10は、繰返し回数と中立軸深さの関係を示すものである。空気中試験のRC-A 供試体は、初回から破壊の直前まで中立軸深さに多少の上下はみられるが、ほぼ一定のまま破壊の直前で急激に上がっている。PC-A 供試体は、初期から破壊に至るまでなだらかに上がっており、PRC-A 供試体は、PCとPCの間動的な動きをしている。Aシリーズの中で、

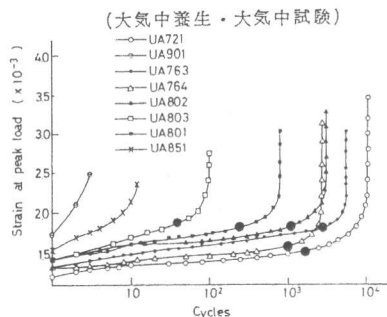


図8 繰返し回数とひずみの関係

表4 はりの試験結果一覧

	Maximum load in tons	Cycles to failure	Cracking load in tons
RC-S	7.50*	—	0.96
RC-A	6.64	84845	0.92
RC-W	6.55	15564	0.72
RC-hW	7.05	10380	1.10
RC-WA	6.79	14873	1.50
PRC-S	8.50*	—	—
PRC-A	7.11	20570	2.30
PRC-W	7.37	367	2.08
PRC-hW	7.90	226	2.24
PRC-WA	7.11	359	2.45
PC-S	7.30*	—	3.64
PC-A	6.11	14434	3.84
PC-W	6.40	1537	3.70
PC-hW	6.35	2013	3.70
PC-WA	6.10	12	3.96

\* Static load carrying capacity

中立軸深さの変化にこのような差がみられるが、中立軸が上がって破壊に至っているという点で共通している。一方水中試験のRC-WおよびPC-W供試体は、破壊前までわずかに中立軸が上がり、破壊近くで急激に下がっている。PRC-W供試体では、急激な降下はみられないが、中立軸が下がって破壊に至っているという点で共通している。破壊前に中立軸が下がるということは、コンクリートの受け持つべき圧縮力を、今の圧縮部分で

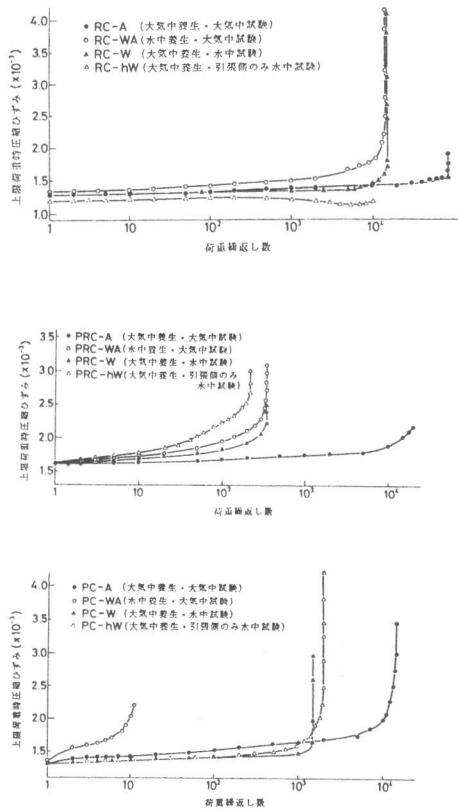


図9 繰返し回数と圧縮縁ひずみの関係

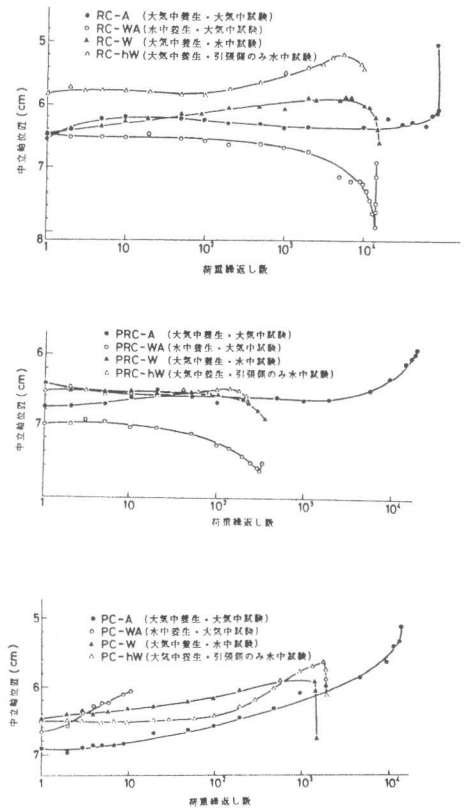


図10 繰返し回数と中立軸深さの関係

はささえきれず、その面積が増加したことであり、圧縮側コンクリートが水中での疲労により著しく強度劣化したことを意味している。従来水中でのコンクリート系部材の曲げ疲労強度は、ひびわれ開口部における水のくさび作用で、空気中と比較して弱くなるといわれていた。もし水のくさび作用が水中での曲げ疲労強度劣化に大きく影響するとすれば、空気中に比べて水中ではひびわれの進展が促進され、中立軸の上がり方が速いはずである。しかし本実験に関する限り、RC-W供試体にわずかにその傾向がみられるのを除けば、そのような現象は認められない。hWシリーズは、ひびわれが開閉する中立軸以下を水中で試験したものだが、中立軸の上がり方が空中試験のAシリーズより特に速いというようなことはなく、ここでも水のくさび作用は明らかでない。そしてhWシリーズが水中試験のWシリーズと似た中立軸の動きをしているのは、実験中空気中に出たコンクリートの上縁から水がしみ出るのが観察出来たことを考えあわせると、圧縮側コンクリートにしみ込んだ水による疲労強度劣化現象が現われたと考えられる。また水中養生供試体の空気中試験のWAシリーズでは、PC-WA供試体を除いて水中試験のWシリーズと似た中立軸の動きをしている。これも圧縮側コンクリートに含まれた水により、疲労強度が劣化したものと考えられる。

5 結論

- (1) 水中でのコンクリートの圧縮疲労強度は空気中と比較して著しく劣化する。
- (2) 水中でのコンクリート系部材の曲げ疲労強度劣化の原因は、ひびわれ開口部に侵入した水のくさび作用だけでなく、圧縮側コンクリートの水中での疲労強度劣化に著しく関係する。

(参考文献)

Ben. C. Gerwick : High-Amplitude Low-Cycle Fatigue in Concrete Sea Structures. PCI Journal vol. 26. No. 5 sept/oct. 1981 pp. 82 - 96.