

[2048] 塩害を受けて補修されたスラブの疲労特性に関する実験的考察

市川 廣 (東京ガス工務部)

正会員 田淵 博 (東亜建設工業技術研究所)

正会員 ○守分 敦郎 (東亜建設工業技術研究所)

1 はじめに

近年、海洋環境下あるいは海岸地域における鉄筋コンクリート構造物の塩害が大きな問題となってきた。塩害を受けた構造物は、被害が発見された時点において引張鉄筋の腐食による断面減少あるいは孔食によるピットの形成等、構造上大きな弱点を有している。この様な塩害劣化した構造物の補修は、その構造物の要求される耐用年数と残存する耐力との関係を考慮して適切な補修方法を採用する必要がある。しかし、その手法に関してはまだ確立されたものがないのが現状である。

筆者らは、東京湾沿岸にある塩害を受けたコンクリート構造物に対する補修方法に関して、静的載荷試験を通して種々の検討を加えてきた[1][2]。本報告は、塩害劣化した鉄筋コンクリートスラブを、ポリマーセメントモルタル系およびエポキシ樹脂系の注入によるプレキャストコンクリートにより補修し、これらの疲労特性に関して実験的に検討を加えその知見について報告するものである。本実験において、劣化スラブの疲労特性は、劣化鉄筋の疲労およびそれを取囲む補修材の疲労に支配される。しかし、それらの疲労に対する相互作用の分離が困難であると予想されたため、実験に先だち、補修材自体の補修効果についての知見を得ることを目的として、梁モデルによる疲労試験を行い検討を加えた。

2 実験の概要

実験は、梁モデルによる疲労試験と劣化スラブによる疲労試験の2種類に大別される。検討対象とした補修材は、「ポリマーセメントモルタル注入によるプレキャストコンクリート」(以下P.P.C.と呼ぶ)及び「エポキシ樹脂注入によるプレキャストコンクリート」(以下E.P.C.と呼ぶ)の2種類である。表-1に供試体に用いられたコンクリート及び補修材の試験時における物性値を示す。表-2に鉄筋の引張り試験結果を示す。さらに図-

表-1 供試体のコンクリート及び各補修材の材料試験結果

材 料 名	圧縮強度 [kgf/cm ²]	引張強度 [kgf/cm ²]	ヤング率 ×10 ⁹ * [kgf/cm ²]
供試体のコンクリート	242	20	2.67
既設コンクリート**	274	—	2.49
ポリマーセメントモルタル注入によるプレキャストコンクリート(P.P.C.)	386	23	3.10
エポキシ樹脂注入によるプレキャストコンクリート(E.P.C.)	750	72	1.30

*ヤング率の試験はJIS原案によった。

**コア供試体による試験結果。

表-2 鉄筋引張試験結果

鉄筋種	P _y [kgf/m ²]	P _{max} [kgf/m ²]	伸び [%]	ヤング率 [kgf/m ²]
腐食鉄筋	35.6	53.5	18	1.77×10 ⁴
新規鉄筋	37.8	55.3	20	1.93×10 ⁴

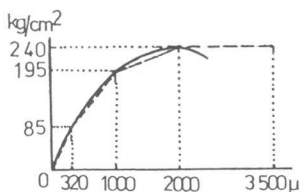


図-1 コンクリートの
応力-歪曲線

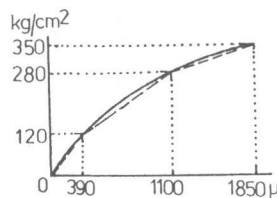


図-2 P.P.C.の
応力-歪曲線

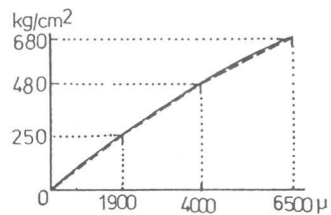


図-3 E.P.C.の
応力-歪曲線

1～図-3に各材料の応力-歪曲線の一例を示す。

2-1 梁モデルによる疲労試験

供試体の形状を図-4に示す。荷重方法あるいは模擬劣化部の補修方法等は既に報告した静的荷重試験と全く同様である[1]。荷重は3等分点荷重とし、供試体は表-3に示す3ケースとした。いずれの供試体においても引張鉄筋は腐食劣化のない健全なものを使用した。荷重荷重は、引張側鉄筋の疲労寿命が 10^6 回程度を目標に1000 μ 程度の歪振幅が発生する様に計画し、事前の静的荷重試験の結果から上限荷重9.5tonf、下限荷重0.5tonfの片振り荷重とした。荷重試験は、ローゼンハウゼン型バルセーター式疲労試験機により荷重速度約5Hz（毎分約300回）で 10^6 回まで荷重した。計測については各疲労段階において静的に上限荷重及び下限荷重を荷重し、供試体中央の変位、鉄筋・コンクリートの歪、コンタクトゲージによるひびわれ幅の変化等の測定を行った。また、各疲労段階におけるひびわれパターンの追跡も同時に行った。

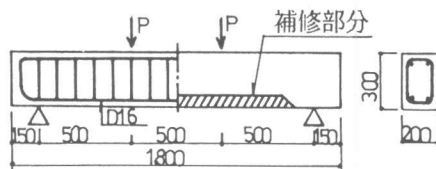


図-4 梁供試体の形状寸法

表-3 梁供試体ケース一覧表

ケース	供試体仕様(補修材種別)
A	健全な梁(補修なし)
B	P. P. C. 補修梁
C	E. P. C. 補修梁

2-2 劣化スラブによる疲労試験

実験対象とした劣化スラブは、東京湾内に位置し海上に400m程度突出した車道橋の床版であり、建設後約15年を経過しており塩害による鉄筋の断面欠損もかなり進んでいたものを使用した[1][2]。試験に用いた供試体の形状を図-5に示す。試験には、表-4に示す4種類の供試体を用いた。ケースA供試体は新規に対照用として製作したものである。ケースB～ケースDに使用したスラブ供試体は現場における劣化診断調査結果に示す様に[1]、いずれの供試体においてもスラブ下面全体にうき、はく離が発生しており、主鉄筋断面の残存率は表-5に示す様であった。

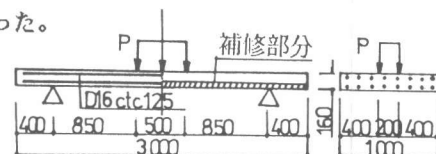


図-5 劣化スラブ供試体の形状寸法

表-4 劣化スラブ供試体ケース一覧表

ケース	供試体仕様
A	新規製作(普通鉄筋使用)
B	P. P. C. 補修スラブ
C	E. P. C. 補修スラブ
D	劣化スラブ無補修

荷重方法あるいは補修方法については静的荷重試験の場合と同様である[2]。荷重荷重は、梁による疲労試験の場合と同様な思想のもとに、静的荷重試験の結果より、上限荷重9.0 tonf 下限荷重0.5 tonfの片振り荷重荷重とした。計測方法及び計測項目は、梁供試体の場合と同様である。

3 実験結果及び考察

3-1 梁モデルの実験結果

試験の結果いずれの供試体も 10^6 回まで疲労破壊の発生は見られなかった。

図-6～図-8に、供試体中央の上限変位、変位振幅、下限変位を示す。比較のために、「コンクリート標準示方書(昭和61年制定)」(以下示方書と呼ぶ)に示された換算断面二次モーメントを用いて算定した梁中央部変位量の値も同図中に破線で示す。

疲労試験初期の段階においては、E.P.C.補修による供試体は、上限変位、変位振幅とも他の供試体に比較して50%程度の値を示しており、引張強度の高いE.P.C.が引張り力を負担することにより、断面の剛性が高まっていることがわかる。しかし、 $N=10^6$ 回に対してはいずれの供試体

表-5 鉄筋断面残存率

ケース	残存率(平均)%
B	88
C	98
D	90

においてもその変位量の差は見られない。下限変位については、いずれの供試体においても疲労の進行が進むに従って大きく増加している。

表-6に、上限変位の計算値と測定結果を比較したもの、及び荷重繰り返し回数による上限変位の増加の割合を示している。同表においては、初期の段階における変位量は計算値とよく一致しているが、 $N=10^6$ 回においては、計算値の1.2~1.4倍の値を示している。

図-9に鉄筋及びコンクリートの歪の測定結果を疲労試験の初期と末期についてプロットしたものを示す。また同図には、各材料のヤング係数を図-1~図-3の破線で示した折れ線で近似して計算した歪分布も合わせて示してある。この図より、純曲げ領域においては、ケースCを除き、繰り返し载荷による引張鉄筋の歪の増加は見られず、その値は計算値あるいはそれ以下の値を示している。一方ケースCは同様な位置において、初期はE.P.C.が下側引張力を負担した場合の鉄筋歪分布を示しているが、末期においては他の供試体同様引張側断面を無視した計算値に近い値を示している。

表-6 上限変位の比較とその増加の割合

	A	B	C
初期測定値			
計算値	0.94	0.94	0.51
$N=10^6$ 回の測定値			
計算値	1.31	1.40	1.26
測定値の差			
$\frac{[(N=10^6) - (\text{初期})]}{\log N}$ (mm)	0.10	0.13	0.22

一方曲げせん断領域においては、特に支点付近で疲労の進展により引張鉄筋に大きな歪が発生している。これは、図-10に示す支点付近のせん断ひびわれにより、モーメントがシフトしたためと考えられる。

図-10のひびわれ図においてケースA, Bのひびわれ

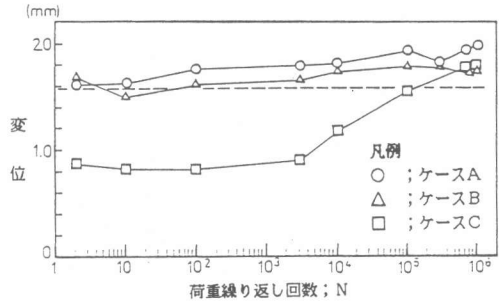


図-6 梁供試体の上限変位の変化

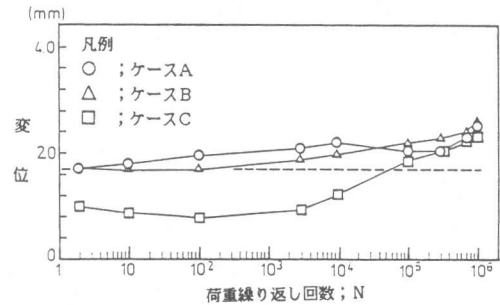


図-7 梁供試体の変位振幅の変化

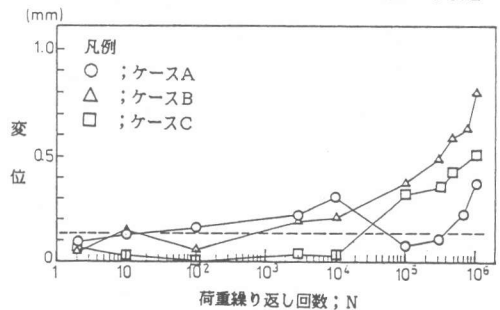


図-8 梁供試体の下限変位の変化

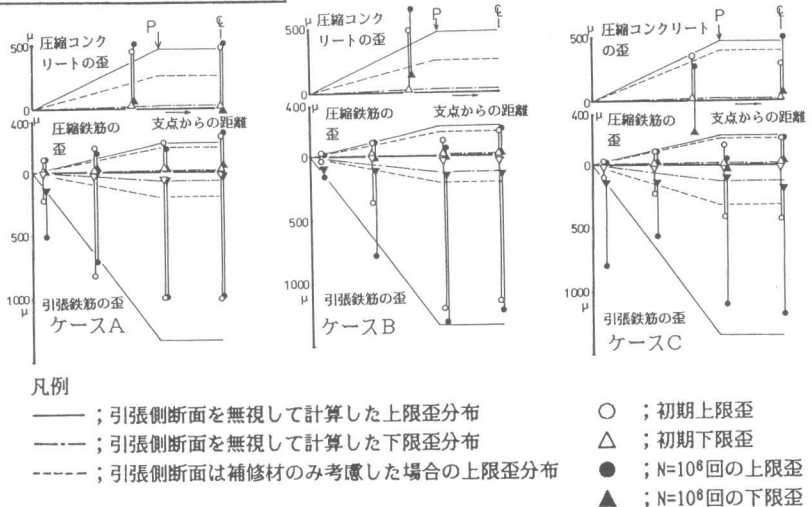


図-9 梁供試体の疲労による各測定点の値の変化

れパターンがよく似ており、コンクリートの物性値に近いP.P.C.による補修で、部材は原断面と同程度に修復されることがわかる。一方ヤング係数の小さいE.P.C.補修材では支点付近において補修部境界面でせん断ひびわれを誘発している。ひびわれ幅に関しては、疲労試験末期においては、いずれの供試体も同程度の値を示している（図-11）。

3-2 劣化スラブの実験結果

劣化スラブに関する疲労試験結果を表-7に示す。ケースB, C, Dは引張側鉄筋に腐食による断面減少や孔食等が見られ、これらの供試体はケースCを除き早期に疲労破壊が発生している。これらの疲労耐力の差は、表-5に示した引張側鉄筋の腐食状態の相違による所が大であるが、一方、補修材の引張強度等の物性値にも影響を受けていることが推測される。また、静的載荷試験においては、いずれの供試体においてもその耐力は16 ton 付近にあり大きな差は見られなかったにもかかわらず[2]、表-7 劣化スラブ疲労試験においては供試体によってその寿命に17倍もの差が見られた。この事実から、塩害劣化した構造物の耐力診断は、静的載荷試験だけでは不十分であることが理解されるところに、本研究に用いられた供試体の様に塩

ケース	破断回数
A	$N = 9.65 \times 10^5$ 回 引張鉄筋疲労破壊
B	$N = 5.80 \times 10^4$ 回 引張鉄筋疲労破壊
C	$N = 10^6$ 回において も破断なし
D	$N = 3.1 \times 10^5$ 回 引張鉄筋疲労破壊

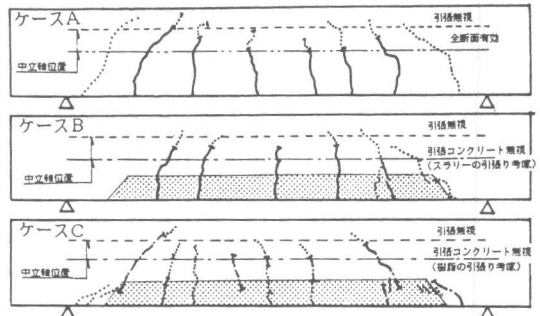


図-10 ひびわれ分布

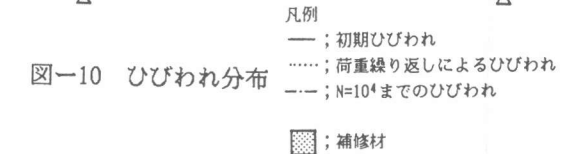


図-11 ひびわれ幅の変化

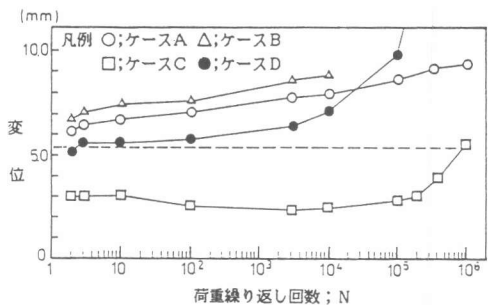


図-12 劣化スラブ供試体の上限変位の変化

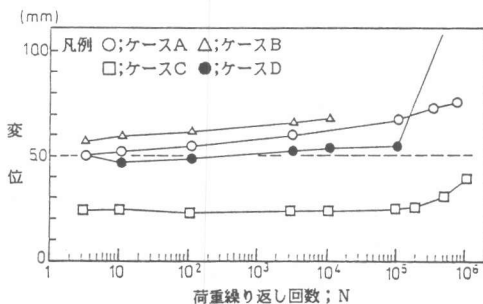


図-13 劣化スラブ供試体の変位振幅の変化

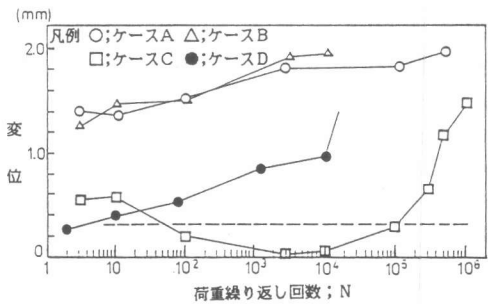


図-14 劣化スラブ供試体の下限変位の変化

害によって鉄筋が腐食している構造物は、疲労耐力的には大きな弱点を有することが推測される。

図-12~図-14に、供試体中央の上限変位、変位振幅、下限変位を示す。同図中においても梁供試体の場合と同様に換算断面二次モーメントを用いて求めた計算結果を示してある。但し、引張側鉄筋は断面減少のないものとして計算してある。

上限変位量は、梁モデルの場合と同様に、E.P.C.補修による供試体の変位量が他の供試体の変位量の50%程度となっており、断面剛性が高くなっていることがわかる。他の供試体においては、上限変位量は疲労試験初期においては計算値と比較的良好一致を示しているが、疲労が進むに従って計算値から大きくずれている。変位振幅に関しても上限変位と同様の傾向を示している。表-8に計算値と実測値を比較したものを示してある。ケースCを除いた他の供試体においては、疲労寿命が大きく異なっているにもかかわらず、破断直前の上限変位量と計算値との比はいずれも1.5付近にある。同表の示す荷重繰り返し回数に伴う上限変位の増加量は、ケースDが他の供試体の2倍程度の値を示しており、無補修スラブの疲労の進展に伴う変位の増加の激しいことが理解される。

図-15に、鉄筋及びコンクリートの歪を、疲労試験の初期と末期についてプロットしたものを示す。また同図には、

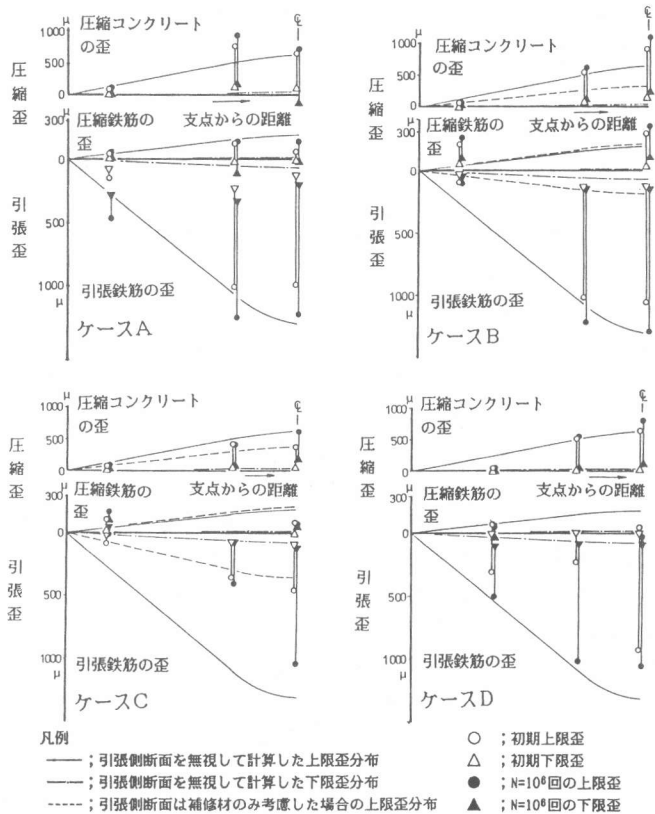


図-15 劣化スラブ供試体の疲労による各測定点の値の変化

梁供試体において計算した手法と同様の方法で求めた歪分布も示してある。引張側鉄筋を見ると、ケースA, Bにおいては鉄筋の歪は、引張側断面を無視した計算値とよく一致している。一方ケースCは疲労試験の末期において、中央部分で歪がケースA, Bと同程度にまで増加しており、これは後述する様に補修材のひびわれの影響である。ひびわれ発生部以外では補修材が引張力を負担した場合の歪分布とよく一致している。

図-16にひびわれ分布図を示す。ケースA, Bにおいては、初期の荷重により支間直角方向にひびわれが発生し、荷重の繰り返し回数の増加に伴い、主鉄筋にそった付着割裂ひびわれの発生が見られた。一方補修材の引張強度の大きいケースCは中央に一本のみひびわれが発生しており、この部分の鉄筋の歪が大きく増大している(図-15)。

表-8 上限変位の比較とその増加の割合

	A	B	C	D
初期測定値 計算値	1.07	1.18	0.50	0.86
破断直前の測定値 計算値	1.55	1.46	0.84*	1.55
測定値の差 [(破断直前)-(初期)] log N (mm)	0.45	0.33	0.32*	0.71

*) N = 10⁶の測定値

ひびわれ幅の変化を見ると、図-17よりケースB、CはケースAに比較してひびわれ幅の増大傾向が大きい。また、ケースCについてはひびわれが分散していないために大きなひびわれ幅を示している。

4 結論

今回実施した疲労試験より次のことが確認された。

① 本実験に用いられた塩害劣化したスラブは、静的耐荷力

に関してはそれほど顕著な劣化は認められなかったにもかかわらず、疲労耐力に関しては非常に小さいことが確認され、塩害を受けた構造物では、疲労耐力の面からの検討が重要であることがわかる。

② 劣化スラブ供試体中央の上限変位量は、疲労試験初期においては計算値と計測値は比較的良い一致を示したが、疲労破壊直前では計測値は計算値の1.5倍程度となった。梁供試体では試験中に疲労破壊は発生しなかったが、疲労の進展により変位量の増加が見られた。

③ 塩害劣化スラブは疲労破壊が引張側鉄筋の破断により発生しており、劣化部材の疲労耐力向上には引張側鉄筋の歪振幅を低減する必要がある。本研究で検討対象とした補修材では、引張強度が比較的大きいE.P.C.補修材が引張力の一部を受持つことにより、引張鉄筋の歪振幅を低下させる効果を有することが確認されたが、補修材自体の疲労耐力あるいはひびわれ分散作用等を考慮すると、この効果を補修材に期待する場合はさらに検討が必要であろう。また、物性値がコンクリートに近いP.P.C.補修材ではひび割れ分散性能等は優れているが、引張強度が小さい補強材等で引張力を分担させることを考慮する必要がある。

今後は、このような構造物の残存疲労耐力の検討として、鉄筋の劣化に対する定量的評価あるいは劣化鉄筋の破断に対する破壊力学的なアプローチが必要と思われる。

参考文献

- [1]市川, 田淵, 浅沼:東京湾沿岸のあるコンクリート構造物の塩害とその補修方法について、第8回コンクリート工学年次講演会論文集、P.P.849-852、1986
 [2]市川, 田淵:載荷試験による劣化スラブ補修効果に関する検討、土木学会第41回年次学術講演会(昭和61年11月)P.P.177-178

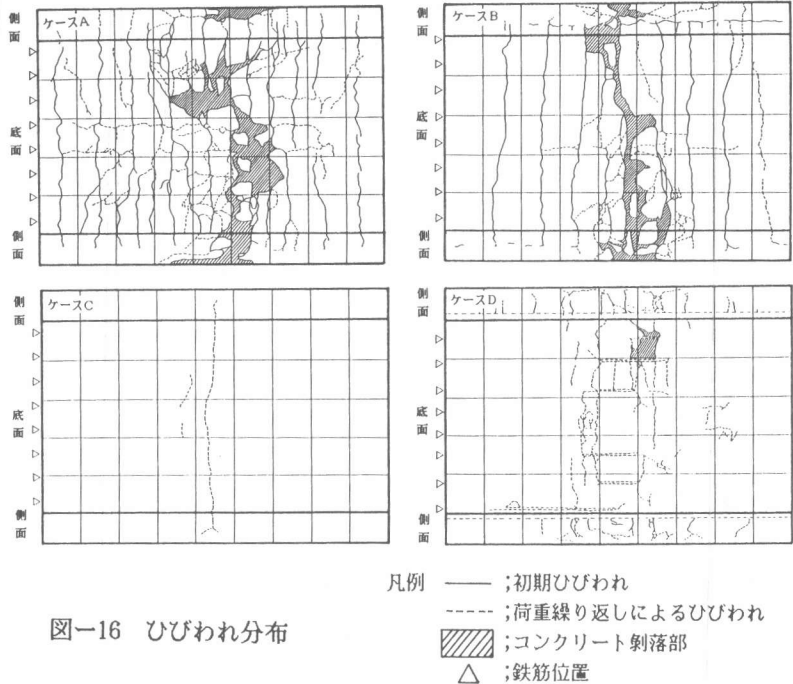


図-16 ひびわれ分布

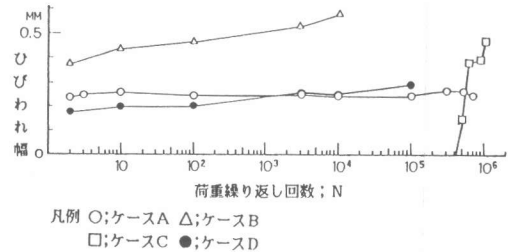


図-17 ひびわれ幅の変化