

[31] エポキシ樹脂注入補修した鉄筋コンクリートはりの疲労性能に関する研究

正会員 西林新蔵（鳥取大学工学部）
 正会員 ○井上正一（鳥取大学工学部）
 学会員 大谷公行（鳥取大学大学院）
 正会員 川村 勝（阪神道路公団）

1. まえがき

近年、塩害やアルカリ骨材反応に見られるようなコンクリート構造物の早期劣化が社会問題となる中で、コンクリート構造物の診断、健全度評価、劣化した構造物の耐力の復元ないしは補修・補強法の開発が望まれ、一方では構造設計に耐久性設計を導入することが要望されてきている。本研究では繰返し荷重下における鉄筋コンクリートはり（以下RCはりと呼ぶ）の耐久性に着目し、RCはりの破壊規準さらには延命の観点から、疲労劣化したはりのひびわれ中にエポキシ樹脂注入を施すことによる補修効果を、補修しないはりの疲労特性との関連において検討し、併せて最も効果的な補修の時期をも明らかにすることを目的としている。

2. 実験概要

2.1 試験方法

繰返し荷重下での破壊様式が曲げスパン内の主鉄筋の疲労破断になるように設計したRCはりの断面寸法、載荷位置を図-1に、さらに疲労試験実施時（材令100日以上）の材料の強度特性

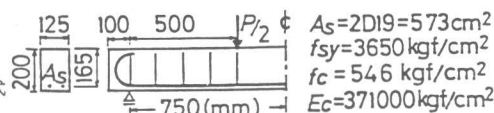


図-1 はりの詳細

を図中に併記する。疲労試験は、一定および変動荷重試験からなり、いずれの場合も繰返し載荷速度5 Hz、下限荷重一定（1.37ト）の下で行った。変動荷重試験は、図-2に示す荷重ブロックを設定し、以下の手順で行った。すなわち、

① 設定荷重比（ P_s ：載荷重とはりの静的終局耐力（ $P_u = 13.7$ ト）の百分率）に対して、 j （ $j=1,2,3$ ）番目に作用させる荷重比（ $P_{s,j}$ ）を割付ける（例えば $P_{s,1} \rightarrow P_{s,2} \rightarrow P_{s,3} = 57 \rightarrow 67 \rightarrow 77\%$ 等（表-2の荷重順序参照））。

② i 番目の荷重ブロックに対し、 $P_{s,j}$ の載荷回数 $n_{i,j}(P_{s,j}) = N_i \cdot P^*(P_{s,j})$ を予め算定しておく。試験は、一次載荷においては、第1（ $i=1$ ）荷重ブロックの載荷から i_0 荷重ブロックの終了時（ $i=1,2, \dots, i_0$ ）まで、二次載荷においては、再び第1（ $i=1$ ）

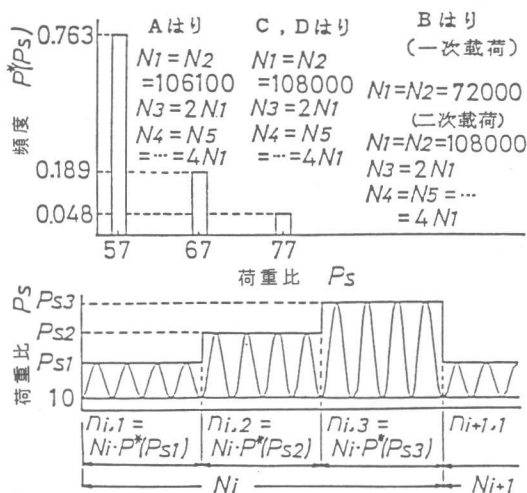


図-2 変動荷重試験の詳細

荷重ブロックを載荷した後、 $i = 2, 3, \dots$ と i を順次増加して行き、 u 番目の荷重ブロック内の第 k 番目の荷重比で破壊する回数 $n_{u,k}(P_{s,k})$ を測定した。

表-1 に変動荷重試験に用いた供試体の名称を示す。表中の一次載荷は、RCはりに疲労損傷を与えるための載荷で、荷重ブロック数（ $i=i_0$ ）を変えることによって損傷度を变化させた。一次載荷で生じた損傷を補修（Cはりは休息）したこれらのはりは、二次載荷において再度上記変動荷重試験を実施して破壊に至らしめた。

2.2 補修はりの作製

補修はり（B、Dはり）は、一次載荷終了後、ひびわれ中へのエポキシ樹脂注入とその後2週間の養生を施すことによって作製した。また、養生中の休息期間が疲労寿命に及ぼす影響を検討するために、コントロール用としてAはりとCはりを作製した。

表-1 はりの種類と名称

はりの種類（略号）	一次載荷の荷重ブロック数 i_0
連続載荷はり（Aはり）	$i_0 = 0$
早期補修はり（Bはり）	$i_0 = 2$
休息はり（Cはり）	$i_0 = 4$
損傷補修はり（Dはり）	

3. 実験結果と考察

3.1 一定荷重試験

図-3は各荷重比ごとのはりの疲労寿命(N)と式(1)から求まる生存確率(P(N))との関係に対数正規確率紙上にプロットしたもので、図中の直線式は最小2乗法によって決定したものである。

$$P(N) = 1 - r / (L + 1) \dots\dots(1)$$

ここに、r: 供試体総数LのN(後述の場合には下記M)を小さい順に並べたときの序数。

図より、荷重比(P_s)とP(N) = 50% (t = 0)に相応する平均疲労寿命(N̄)関係(図-4参照)として、次式が得られた。

$$P_s = 166.27 - 16.89 \log \bar{N} \dots\dots(2)$$

3.2 変動荷重試験 表-2に変動荷重試験の結果を一括して示す。表中、u, ΣΣnは二次載荷における破壊時のブロック数および載荷回数の総和で、M₀, M, M₀', M'は次式によって算定したものである。

$$M = M_0 + \sum_{i=1}^{u-1} \left\{ \sum_{j=1}^3 (n_{i,j}(P_{s,j}) / N(P_{s,j})) \right\} + \sum_{j=1}^k (N_{i,j}(P_{s,j}) / N(P_{s,j})) \dots\dots(3)$$

$$M_0 = \sum_{i=1}^{i_0} \left\{ \sum_{j=1}^3 (n_{i,j}(P_{s,j}) / N(P_{s,j})) \right\}$$

ここに、N(P_{s,j})は式(2)にP_s = P_{s,j}を代入して求まる平均疲労寿命(N̄)である。また、M₀', M'はそれぞれ土木学会指針案¹⁾に従って算定される

P_s = P_{s,j}作用時の鉄筋応力(f_s)とその時の疲労寿命N(P_s = f_s) (表-3参照)を式(3)に代入して求めたM₀, Mの値である。なお、Bはりは土木学会指針案¹⁾に従って疲労評価をした場合、一次載荷のみで寿命が尽きる損傷(表-2のM₀'参照)を与えたものである。

表-3 指針案¹⁾による疲労寿命の算定

荷重比 P _s (%)	鉄筋応力 f _s (kgf/cm ²)	疲労寿命 N(f _s)
77	3250	33700
67	2828	82720
57	2406	241500
10	422	—

N(f_s) = [(1-f_{sp}/f_{su})10³/(f_s-f_{sp})]^{1/k}
 ただし、f_{sp} = 422 kgf/cm², f_{su} = 5680 kgf/cm², N(f_s)は、上式においてa=4.3, k=0.18 およびa=4.0, k=0.13 で与えられるN(f_s)の大きい方の値

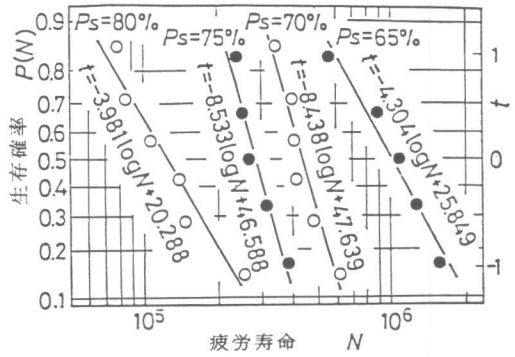


図-3 P(N) - N 線図

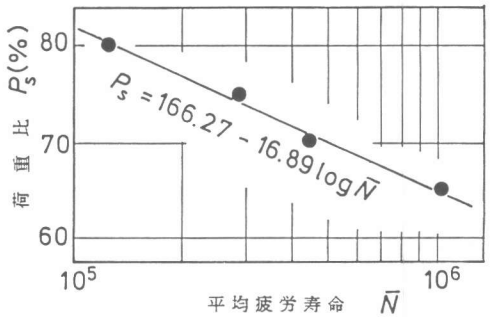


図-4 P_s - N̄ 線図

表-2 変動荷重試験の結果

はりの種類	荷重順序			破壊時			M ₀ (M ₀ ')	M	M'
	Ps1	Ps2	Ps3	u	Ps _k	ΣΣn			
A	67	77	57	6	57	1530880	0 (0)	1.23	11.0
	67	57	77	8	67	2159800		1.66	15.0
	77	67	57	8	57	2497560		1.91	17.3
	57	67	77	10	57	3287060		2.36	21.7
B	67	77	57	5	57	1295900	0.11 (1.00)	1.09	9.9
	77	67	57	7	77	1744900		1.51	13.4
	57	67	77	8	67	2502200		1.88	17.3
	67	57	77	9	67	2624090		2.12	19.2
C	67	57	77	4	67	505700	0.66 (5.94)	1.08	9.8
	57	67	77	5	57	936160		1.34	12.2
	77	67	57	5	57	1076000		1.56	13.9
	67	77	57	7	67	1749200		2.00	18.1
D	67	57	77	5	57	1225120	(5.94)	1.51	14.0
	77	67	57	6	67	1363800		1.81	16.0
	67	77	57	7	57	2017960		2.25	20.2
	57	67	77	12	67	4295250		3.82	35.0

3.2.1 累積繰返し回数比(M, M')の確率分布特性

図-5に生存確率(P(M))とMとの関係を示す。図より、MとP(M)の間には明確な直線関係が認められ、Mの分布は対数正規分布に従うといえる。このとき、回帰式は式(4)で与えられ、2母数、すなわち

Mの確率分布特性を与える $\log M$ の平均値 $m(\log M)$ と標準偏差 $V(\log M)$ は式(5)で与えられる。

$$t = A \log M + B \dots\dots\dots (4)$$

$$\left. \begin{aligned} m(\log M) &= -B/A \Rightarrow \bar{M} = 10^{-B/A} \\ V(\log M) &= 1/|A| \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (5)$$

図-6は平均累積繰返し回数比 (\bar{M}) および $V(\log M)$ の値を、図-5中の直線式より算出し、はりの種類ごとに示したものである。同図(A)より、補修を施したはりの \bar{M} は、補修時期の遅いものの方が大きく、また補修時期が早い場合には補修を施さないはりのそれと同程度の値を示すこと、さらに本実験のように寿命が鉄筋の疲労破断で決るタイプのはりに対しては、休息期間は疲労寿命に影響を及ぼさないことなどがわかる。このような挙動をひびわれパターンとの関連において検討したのが図-7である。同図は、Dはりの曲げスパン内における一次载荷のひびわれを破線で、補修後の二次载荷のそれを実線で示したもので、はりは太実線位置の主鉄筋の破断で破壊したことを示す。図より、Mの小さなはりは、一次载荷で生じたひびわれが二次载荷で再開口し、その位置で破壊している。一方、Mの大きなはりは、一次载荷のひびわれは完全に補修され、二次ひびわれ位置の鉄筋の破断で破壊している。このことより、補修はりのMの確率分布特性は、 \bar{M} の値をやや大きくするものの、ひびわれへの樹脂注入の良否、さらにはひびわれパターンに依存して $V(\log M)$ の値も大きくする特性を有していることがわかる。

つぎに、土木学会指針案によって算定される無補修はりの M' の値について考えてみる。図-8に生存確率 $P(M')$ と M' との関係を補修したはりも含めて示す。図より、 $P(M') = 0.5$ に相応する無補修のA、Cはりの \bar{M}' の値は13~15、さらに外挿によって $M'=1$ に相応する $P(M')$ を求めると、 $P(M')$ は0.95以上(破壊確率で5%以下)の値を確保しており、このことから指針案はRCはりの疲労に対して、かなりの安全性を鉄筋のS-N線式の中に見込んでいることがわかる。

3.2.2 たわみとひびわれ幅

図-9,10は休息のみを与えたCはりと補修を施したDはりについて、一次载荷と二次载荷の各初载荷時における荷重~スパン中央たわみ関係、および任意の繰返し载荷回数におけるM値(ここではRと表記)と二次载荷の最大ひびわれ幅との関係を示したものである。

図-9より、補修後のDはりの曲線形状は一次载荷のそれと類似で、上に凸な形状に回復しており、補修がかなり完全に行われてい

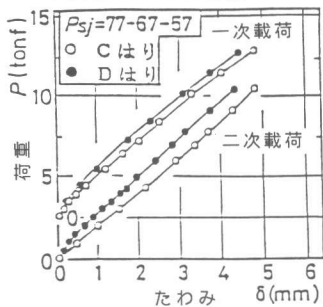


図-9 荷重~スパン中央たわみ

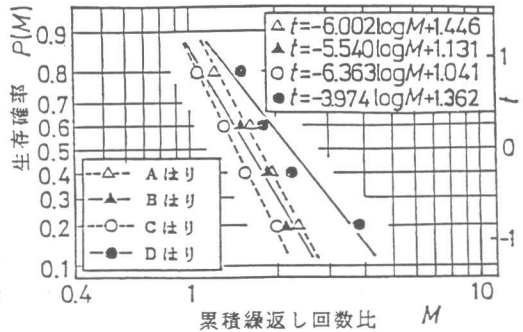


図-5 P(M) - M 関係

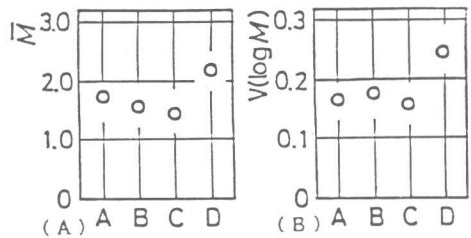


図-6 各はりごとの \bar{M} , $V(\log M)$

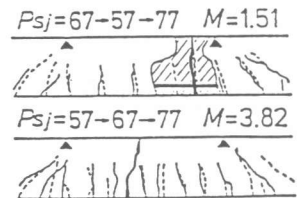


図-7 ひびわれパターン

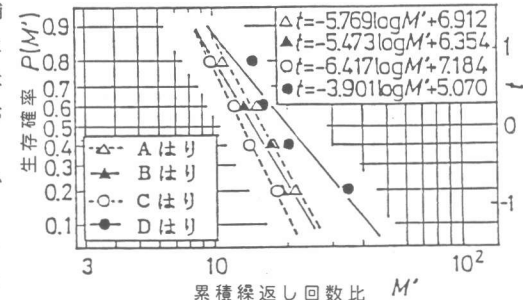


図-8 P(M') - M' 関係

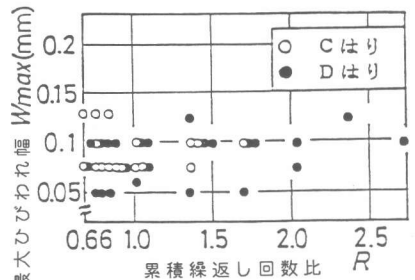


図-10 二次载荷における最大ひびわれ幅

たことを示す。一方、図-10より、補修後の繰返し載荷においてはDはりのひびわれ幅は載荷初期では小さいものの、その後の載荷に対してはCはりと同差のないことがわかる。

以上の結果より、本研究に採用した補修法は、はりの疲労寿命を延命させる効果を持ち、その効果は補修時期が遅いほど大きいといえる。また、変形については、本研究に設定したような高荷重比を受ける場合には、補修効果は小さいことが明らかになった。なお、補修前の残留ひびわれ幅は、Bはりで0.01～0.05 mm、Dはりで0.025～0.08 mm程度で、はり破壊後のひびわれ断面の樹脂注入状況の観察によれば、注入状況は前者がやや良好、後者は良好であった。

3.2.3 最適補修時期の検討

最適補修時期について検討した結果を図-11に示す。図は、任意の繰返し載荷回数におけるMの値(R)とその時の疲労損傷度(D)との関係を線形で理想化して示したもので、 $D=1$ になった時、はりは破壊するとする。また、疲労破壊を引き起こすひびわれ位置でのコンクリート中の鉄筋の損傷度曲線をOA、ひびわれのない位置での損傷度曲線をOBで表わす。いま、 $D=D_1$ で補修を行ない、この補修は一次ひびわれと二次ひびわれ位置が一致しないような完全なものであったとする。このとき、一次ひびわれ位置でのはりの損傷度曲線は、曲線部の OA_1 と補修後のひびわれのない A_1E_1 (OBに平行)によって表わされる。一方、ひびわれがなく補修後にひびわれが発生した位置での損傷度曲線は OB_1E_2 によって表わされる。これら曲線より、はり破壊時のMは E_1 と E_2 のいずれか小さい方のR値で決定される。このような考え方に従えば、あるDの値 D_p で、すなわち、あるRの値で補修した場合、補修前後の損傷度曲線(OA_pE_p と OB_pE_p)が、 $D=1$ 上で一致する最も効果的な補修時期が存在するものと考えられる。本研究においては、Bはりには補修時の疲労損傷が小さかったため、補修効果が明確に現われなかったものの、DはりのMの値は他のはりのそれに比べて大きいことより、上記仮説の妥当性が伺える。さらに、このことより、はりの疲労すなわち、主鉄筋の疲労は局部的な範囲で進行していると考えられる。

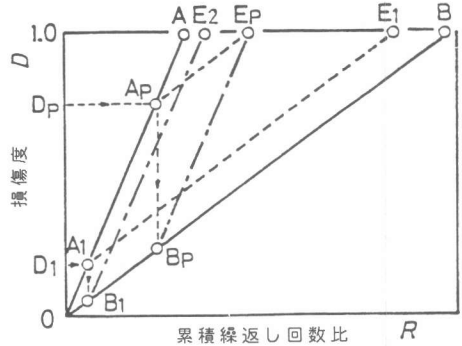


図-11 理想化したDとRとの関係

4. 結論

本研究は、一定および変動繰返し荷重下におけるRCはりの疲労特性を明らかにし、併せて、疲労劣化したRCはりのエポキシ樹脂注入工法による補修効果を、寿命の延命の観点から明らかにすることを目的として行ったものである。ここでは本研究の範囲内で明らかになったことを列挙し、結論とする。

- 1) 一定繰返し荷重下におけるRCはりの疲労寿命および変動荷重下における累積繰返し回数比は対数正規分布に従う。
- 2) 疲労劣化したはりに対するエポキシ樹脂注入補修工法は疲労寿命の延命をもたらす。この延命効果は、補修時期が遅くなる(疲労損傷が大きくなる)に伴って大きくなるといえる。また、延命効果を最大にするような補修時期が存在するものと考えられる。
- 3) 変動荷重下における疲労寿命のばらつきを表わす指標として、累積繰返し回数比の対数の標準偏差 $V(\log M)$ をとると、この値は補修はりの方が補修しないはりよりもやや大きくなるが、これは樹脂注入の良否に関係してMの値が大きく変化することに起因したものと考えられる。
- 4) 実験室レベルではあるが、樹脂注入補修は、残留ひびわれ幅が0.025 mm以上あればほぼ完全に行えるものと推察される。

最後に、補修はりの作製にあたり御協力いただいたショーボンド建設㈱の皆様には謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会；コンクリート構造の限界状態設計法指針(案)，コンクリートライブラリー，第52号，1983年7月，p.27, pp.82～84.