

論文

[1053] 表面塗装を施したRCはりの水中での疲労性能

正会員 西林 新蔵 (鳥取大学土木工学科)
 正会員 ○井上 正一 (鳥取大学土木工学科)
 正会員 吉野 公 (鳥取大学土木工学科)
 正会員 松下 幸義 (ショーボンド建設)

1. まえがき

近年、コンクリート製の海洋構造物が建造される機会が増えているが、この種の構造物は極めて過酷な環境下に設置される。この過酷環境は、鉄筋腐食やコンクリートの劣化をもたらすばかりでなく、波による繰返し荷重を考えた場合、①湿潤環境における鉄筋およびコンクリートの疲労強度は気中におけるよりも大幅に低下する、②鉄筋の疲労限は変動荷重下で低下し、腐食環境下においては疲労限が消失する、といった材料の力学的特性の低下を引き起こす。このような状況において、海洋コンクリート構造物の耐久性は益々重要視され、耐久性向上を図るための種々の手法が考えられている。

このような観点から、本研究では、プレキャスト製品を想定して、コンクリート表面に樹脂ライニングを施すことによる海洋コンクリート構造物の耐疲労性向上の可能性を探ることを目的として計画した。すなわち、ここでは、膜厚を変化させたポリブタジエンゴム系樹脂ライニングを施し、耐疲労性向上を図る上でライニングが具備しなければならない性質のうち、長期海水浸漬における遮水性能と、静的および繰返し荷重下におけるひびわれ追従性との関連において水中環境下におけるRCはりの疲労特性を検討した結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 供試体の種類と作製

実験計画を一括して表-1に示す。本研究では、各試験要因ごとに4体以上の供試体を用い、供試体を長期間海水に浸漬した場合の吸水量から遮水性を評価する試験(以下、遮水性試験と称す)と静的および繰返し荷重下におけるひびわれ追従性試験を行っている。各試験に用いた供試体とその断面形状は、図-1に示す通りで、遮水性試験においてはコンクリート角柱を、ひびわれ追従性試験にはRCはりを用いた。これらの供試体には、伸び能力が大きいと言われているポリブタジエンゴム系樹脂ライニングを施し、遮水性試験と気中で行う静的荷重下のひびわれ追従性試験には、300, 500, 1000 μmの3水準膜厚を、水中で行う繰返し荷重下のひびわれ追従性試験(以下、疲労試験と称す)においては500と1000 μmの2水準の膜厚を設定した。なお、疲労試験においては、ライニングを施さないRCはりに対して、気中試験、はり全体を水中に浸漬する試験、および曲げスパンのみを水中に部分浸漬する試験も行っている。

疲労試験に用いたRCはりの主鉄筋量は $A_s = 2D19 = 5.73 \text{ cm}^2$ で、全てのはりはφ9mm (SR24)筋によってせん断補強を施した。この場合の気中はりのスターラップの所要量は、曲げ終

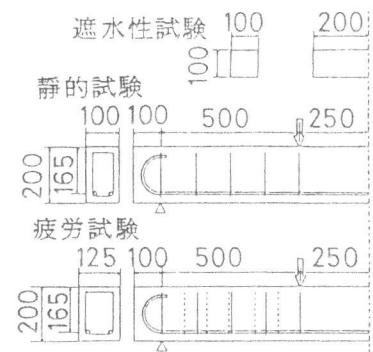


図-1 供試体の詳細(スターラップ:破線は水中試験用,実線は気中試験用)

局時の算定せん断力に対し、コンクリート標準示方書に基づいて決定し、一方、水中環境に供するはりのスターラップ量は、水中においてはせん断疲労破壊になりやすいという事実[1],[2]を

参考に、気中での試験はりよりも多くした（図-1参照：実線が気中用、破線が水中用）。

供試体は角柱あるいはRCはりと同径柱（φ10 X 20 cm）で、これらは、材令1日で脱枠、以後27日間の水中養生を施した後、実験室内に搬入し、乾燥させた。これらの供試体への樹脂ライニングは、重量がほぼ一定となる材令4ヶ月程度で行った。材令5ヶ月に達した供試体は各試験に供し、気中疲労試験においてはそのままの状態、一方、水中で試験するはりでは、疲労試験実施1週間前よりはり全体をあるいは曲げスパンのみを水中浸漬した状態で、それぞれ試験を行った。なお、全てのはりの疲労試験は空ないしは満水状態の水槽内で行い、水中で曲げ破壊することを想定して作製したジャケットはり（表-1中のN-W(J)はり）においては、曲げスパンに装着したジャケット内に水を常時給水し、この部分のみを水没状態としている。

2.2 実験方法

遮水性試験では、コンクリート角柱を鳥取市賀露港から採取した海水中に浸漬し、重量と動弾性係数の経時変化を測定した。一方、ひびわれ追従性試験には、容量20トンのパルセータ型疲労試験機を用い、荷重は図-1に示すように全てスパン150cmの3等分点載荷とした。この場合、静的荷重下のひびわれ追従性試験においては、はり降伏後はスパン中央たわみを1mmずつ増加させる変位制御による試験を行い、ライニングにピンホールが発生する時のその位置のひびわれ幅を測定した。また、RCはりの疲労試験は、繰返し載荷速度5Hz、荷重と時間との関係は正弦波形のもとで行った。疲労試験において設定した上限荷重比（ P_s ）は、各はりの静的平均終局耐力（ P_u ：表-1参照）に対する百分率で数水準選び、下限荷重比は全て P_u の10%と一定とした。なお、疲労試験を通して評価される繰返し荷重下のひびわれ追従性は、荷重の繰返し回数が所定の回数（ $n = 10^3, 10^4, 10^5, \dots$ ）に達する度に、一旦疲労試験を中止し、設定上限荷重に至るまでの静的試験を行うことによって、先の測定回数から現測定回数の中で新たに発生したピンホール位置のひびわれ幅を測定した。

3. 実験結果と考察

3.1 遮水性試験

表-1 実験計画

試験の種類	供試体の種類	ライニングの種類	ライニング厚 (μm)	供試体の名称	コンクリート強度 f_{c28} (kgf/cm^2)	試験環境
遮水性試験	角柱	N P P'	0 300, 500, 1000 1000	N P300等 P'1000	400	海水中

静的および繰返し荷重下のひびわれ追従性試験

試験の種類	供試体の名称	ライニング厚 (μm)	f_{c28} (kgf/cm^2)	主鉄筋量 A_s (cm^2)	平均終局耐力 P_u (tf)	荷重比 P_s (%)	試験環境
静的	P300, 500	300, 500	300	2D13=2.53	6.5, 6.5	-	気中
	P1000	1000			6.6		
	P'1000	1000			6.7		
疲労	N-A N-W N-W(J)	0	400	2D19=5.73	13.7	80~60	水中
					13.6	67~42	
					13.6	72~46	
	P500-W P'1000-W	500 1000			13.7	70~50	
					13.6	70~50	

ライニングは、素地調整にネオプライマー(0.1 kg/m^2)とネオパテ(0.5 kg/m^2)を、上塗りにはアクリルウレタン樹脂(0.12 kg/m^2)を、中塗りはポリブタジエンゴム系樹脂(表中の記号：P, P')を用いている。PとP'の相違は、Pでは面取りをせず、P'では素地調整前の表面処理に隅角部の面取りを施している。 f_{c28} ：28日目標強度を示す。

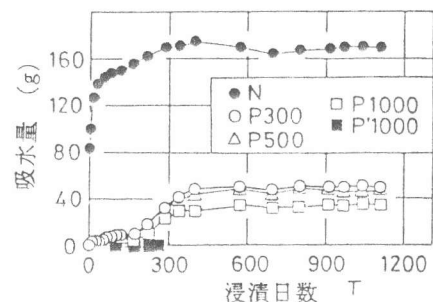


図-2 吸水量の経時変化

図-2, 3に, 膜厚をパラメータとしたときの海水浸漬日数 T と吸水量ないしは相対動弾性係数 E_{DR} (浸漬日数 T における動弾性係数と浸漬直前のそれとの比)との関係を示す。図-2より, ポリブタジエンゴム系樹脂ライニングの遮水性能は, 膜厚が厚いほど良好であるが, 膜厚 $300\sim 1000\mu\text{m}$ の範囲では浸漬日数200日程度から徐々に低下する。200日以降の吸水量は, 浸漬日数600日までやや増加し, その後はほぼ一定値を保って現在の約1200日に至っている。このことより, ライニングを施した供試体の現時点の吸水量は, 膜厚 $300\mu\text{m}$ においても無塗装のその25%程度で, ライニングによる遮水効果は継続していると判断される。同様の傾向は, 図-3の相対動弾性係数の経時変化にも現れている。すなわち, 乾燥させていた供試体が海水を吸水することによって相対動弾性係数も大きくなるが, 膜厚 $300\mu\text{m}$ 以上のライニングを施した場合には, 浸漬開始時から現在に至るまでの相対動弾性係数の変化は小さく, 供試体は浸漬開始時の状態をほぼ保持しているといえる。

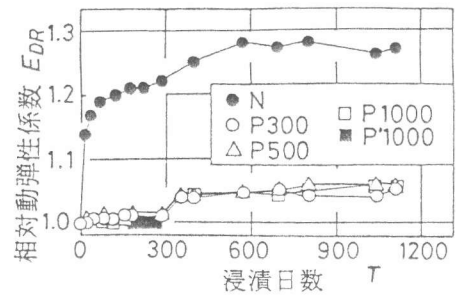


図-3 E_{DR} の経時変化

3. 2 静的荷重下のひびわれ追従性

図-4に, 静的ひびわれ追従性試験に用いたRCはりの代表的な荷重(P)～スパン中央たわみ(δ)関係, ならびにライニングにピンホールが発生した状況をプロットで示す。図より, $P\sim\delta$ 曲線上においてピンホールが発生した時点の荷重(あるいはたわみ)は, 膜厚が厚いほど大きくなるが, $500\mu\text{m}$ 以上の膜厚においては降伏点荷重(あるいは降伏変位)を越えた段階で発生していることがわかる。

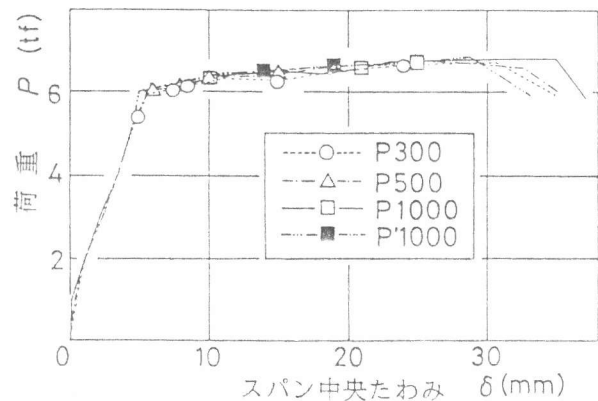


図-4 $P\sim\delta$ 関係

図-5は, 式(1)から算定される生存確率 $P(W)$ とライニングにピンホールが発生する瞬間のその位置のひびわれ幅(W)との関係を正規確率紙上にプロットしたものである。

$$P(W) = 1 - r / (L + 1) \quad (1)$$

$$t = \phi^{-1}(1 - P(W))$$

ここに, L は同一膜厚で試験した全てのはりにおいて, 静的試験終了時に発生していたピンホールの総数で, r はひびわれ幅を小さい順に並べたときの序数である。また, t は標準正規変量で, 任意の $P(W) = P$ の値に対して, 標準正規積分表($1 - P = \phi^{-1}(t)$)から求まる。

図より, 各膜厚ごとのプロット点はほぼ直線上にあり, ピンホール発生時のひびわれ幅の分布は正規分布に従うといえる。

このとき, 正規分布の確率分布関数は式(2)で表され, 平均ひびわれ幅 \bar{W} (式(2)において $t=0$ ($P(W)=0.5$)に対応する W の値)および W の標準偏差 $V(W)$

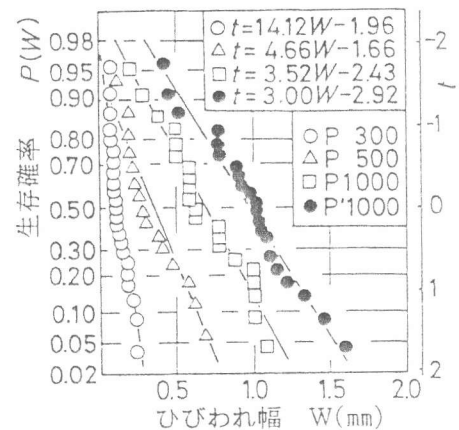


図-5 $P(W) - W$ 関係

は式(3) から算定できる。

$$t = A_1 \cdot W + B_1, \quad t = \phi^{-1}(1 - P(W)) \quad (2)$$

$$\bar{W} = -B_1/A_1, \quad V(W) = 1/A_1 \quad (3)$$

図-6は、最小2乗法によって決定した式(2)の実験定数 A_1 、 B_1 (図-5中に併記)をもとに、膜厚と平均ひびわれ幅 \bar{W} ないしは $V(W)$ との関係を示したものである。図より、ライニングにピンホールが発生するときの \bar{W} は、膜厚の増加に伴って大きくなり、膜厚が厚いほどひびわれ追従性は良好であるといえる。しかしながら、この場合の曲線形状はやや上に凸となっていること、さらに、 W のばらつきを表す指標としての $V(W)$ の値は膜厚が厚くなるに伴って増加していることもわかる。これらのことは、ポリブタジエンゴム系樹脂ライニングのひびわれ追従性は、500 μm までの膜厚において効果が大きいですが、これより厚い膜厚ではやや効率が悪くなることを示している。また、表-1にその相違を示した P' と P の比較より、同一塗装仕様であっても、素地調整前の表面処理として、コンクリート隅角部の面取りを施すことによってひびわれ追従性は改善されるといえる。

3. 3 繰返し荷重下におけるひびわれ追従性

図-7(A)、(B)に、疲労試験中の所定の繰返し回数(n)で行った静的試験において、観察されたピンホール発生位置のひびわれ幅と上限荷重比(P_s)との関係を示す。同図には、参考のため、各はりの静的終局耐力測定用に行った静的荷重下($n=1$ で破壊させる試験)におけるひびわれ追従性の結果も示している。これらの図より、膜厚に関係なく、繰返し荷重下のひびわれ追従性は、静的荷重下におけるよりも大幅に劣り、さらに低荷重比となって繰返し回数が増加するに伴って低下

する傾向がある。また、疲労試験に設定した上限荷重比の最大値は $P_s=70\%$ で、この荷重は静的荷重下におけるピンホール発生荷重よりもかなり小さい。したがって、ピンホールは、疲労試験における初載荷ではなく、 10^4 回までの比較的初期の回数で発生している。なお、繰返し荷重下のひびわれ追従性も静的荷重下と同様に、膜厚が厚いほど良好であるといえる。

3. 4 樹脂ライニングを施したRCはりの疲労性状

(1) 疲労寿命の分布と平均疲労寿命

図-8(A)~(E)は、はりの種類ごとに、各荷重比における疲労寿命(N)と次式で算定され

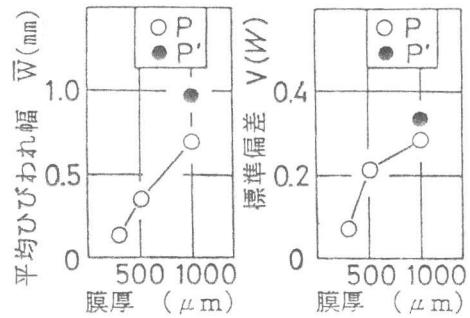


図-6 \bar{W} あるいは $V(W)$ と膜厚との関係

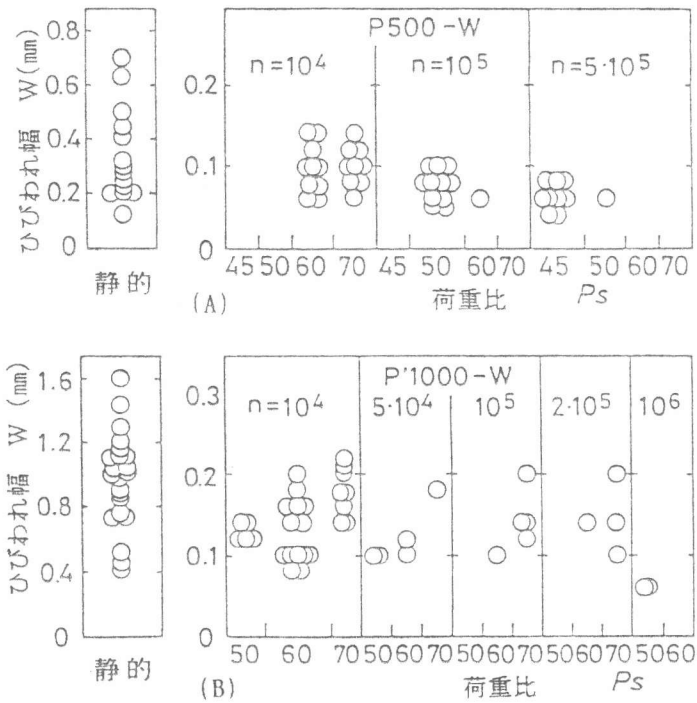


図-7 繰返し荷重下のひびわれ追従性

る生存確率 $P(N)$ との関係に対数正規確率紙上に示したものである。

$$P(N) = 1 - r / (L+1), \quad t = \Phi^{-1}(1-P(N)) \quad (4)$$

ここに、 r は同一試験条件において、同一破壊様式を示した供試体総数 L の疲労寿命 N を小さい順に並べたときの序数で、 t は標準正規変数である (式(1)) の $P(W)$ を $P(N)$ と置いたもの)。

図より、プロット点はいずれのはりにおいてもほぼ直線上にあり、各荷重比ごとのはりの疲労寿命の分布は対数正規分布に従うことが明らかになった。

このとき、各荷重比ごとの回帰式は式(5)で表わされ、 $P(N)=0.5$ ($t=0$) に対応する平均疲労寿命 (\bar{N}) は式(6) によって算定される。

$$t = A \log N + B, \quad t = \Phi^{-1}(P(N)) \quad (5)$$

$$\bar{N} = 10^{-A/B} \quad (6)$$

図-8 中には、式(5) の A 、 B を最小2乗法によって決定した式も併記している。

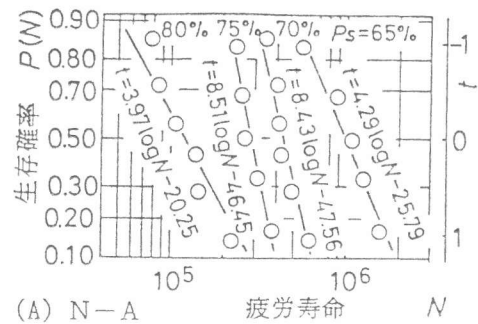
(2) $P_s - \bar{N}$ 線式とはりの疲労強度

RC はりに対する荷重比 (P_s) と平均疲労寿命 (\bar{N}) を表す関係式として、一般に次式が用いられている。

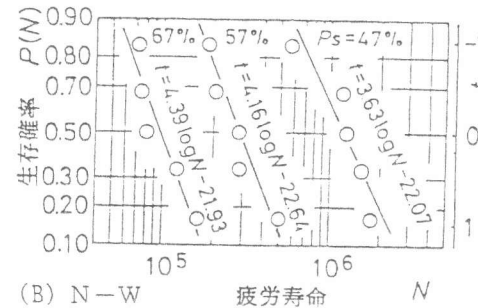
$$P_s = A_2 \cdot \log \bar{N} + B_2 \quad (7)$$

図-9 は、図-8 に示した回帰式に $t=0$ を代入して求めた平均疲労寿命 (\bar{N}) と荷重比 (P_s) との関係を示したもので、式(7) の係数 A_2 、 B_2 を最小2乗法によって決定した $P_s - \bar{N}$ 線式も描いている。これらの式に $\bar{N}=200$ 万回を代入して求めた疲労強度は、N-A はりで $P_s=60\%$ 、N-W はりで $P_s=42\%$ 、N-W(J) はりで $P_s=47\%$ 、P500-W はりで $P_s=42\%$ 、P'1000-W はりでは $P_s=49\%$ となる。膜厚 $1000 \mu\text{m}$ における200万回疲労強度は、せん断破壊をした水中完全浸漬のはりと鉄筋破断で曲げ破壊した気中のはりのほぼ中央値を示している。これらの結果より、膜厚 $500 \mu\text{m}$ 程度のライニング厚では耐疲労性向上の効果はほとんどないが、ライニング厚が $1000 \mu\text{m}$ になると耐疲労性の改善効果がかなり現れていることがわかる。

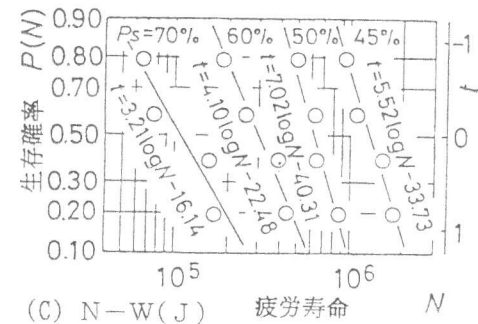
この改善効果を RC はりの破壊様式との関連で捕ら



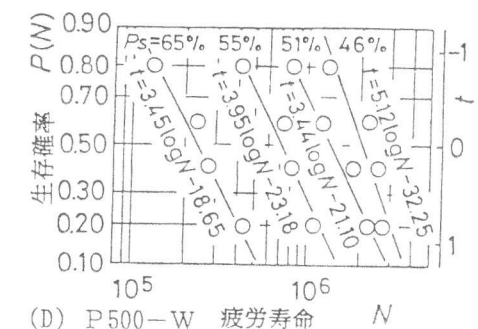
(A) N-A 疲労寿命 N



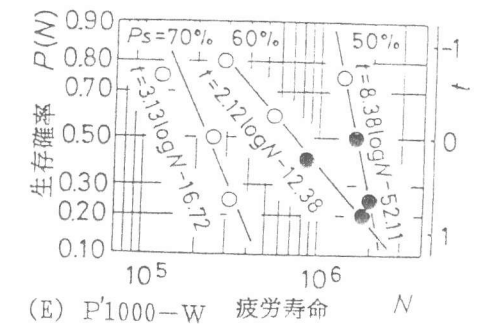
(B) N-W 疲労寿命 N



(C) N-W(J) 疲労寿命 N



(D) P500-W 疲労寿命 N



(E) P'1000-W 疲労寿命 N

図-8 $P(N) - N$ 関係 ((E) 図: ○: せん断破壊, ●: 主鉄筋の曲げ疲労破壊)

えれば以下になる。すなわち、静的試験におけるRCはりは、水中、気中の試験環境やライニングの有無にかかわらず、全て曲げ引張破壊をした。一方、疲労試験における破壊様式は、気中はり(N-A)では、主鉄筋の疲労破断による曲げ破壊を、曲げスパンのみを部分浸漬したジャケットはり(N-W(J))では、コンクリート圧潰型と鉄筋破断型の曲げ破壊が混在する破壊を(図-8(C)、図-9中には鉄筋破断型の破壊を示したはりの結果のみを表示)、はり全体を完全浸漬したはり(N-W)では全てスターラップの疲労破断を伴わないせん断破壊を、それぞれ示した。ライニングを施したRCはりの破壊様式は、膜厚500 μm のはり(P500-W)では、完全浸漬のN-Wはりと同様のせん断破壊を、膜厚1000 μm のはり(P'1000-W)では、荷重比 $P_s=70\%$ 以上の場合、せん断スパンの主鉄筋の破断によるせん断破壊を、これより小さな荷重比ではせん断破壊と主鉄筋の破断による曲げ破壊とが混在した(図-8(E)参照)。このことより、膜厚500 μm 程度では、ライニングの有無は破壊様式に影響を及ぼさないが、膜厚1000 μm になると気中の破壊様式に近付き、このような破壊様式の相違が疲労強度の増加につながったと考えられる。

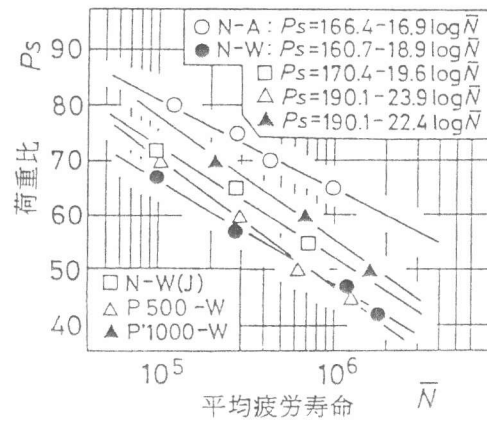


図-9 $P_s - \bar{N}$ 線図

4. まとめ

本研究は、コンクリート表面にポリブタジエンゴム系樹脂ライニングを施すことによって、海洋コンクリート構造物の疲労性状を向上させる可能性を検討したもある。ここでは、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) ポリブタジエンゴム系樹脂ライニングの遮水性は、膜厚300 μm においても、現在の1200日までほぼ良好である。
- (2) 静的および繰返し荷重下における樹脂ライニングのひびわれ追従性は膜厚が厚いほど良好であるが、繰返し荷重下のひびわれ追従性は静的荷重下におけるよりも大幅に低下する。
- (3) 繰返し荷重下における無塗装RCはりの破壊様式は、気中では主鉄筋の破断による曲げ破壊をするはりであっても水中ではせん断破壊になりやすい。樹脂ライニングを施したRCはりの水中における破壊様式は、膜厚が薄いと水中の無塗装はりと同じ、膜厚が厚くなって1000 μm 程度になると気中はりと同じの疲労破壊様式に近づく。
- (4) 膜厚1000 μm のライニングを施したRCはりの200万回疲労強度($P_s=49\%$)は、無塗装の水中はりの $P_s=42\%$ と気中はりの $P_s=60\%$ のほぼ中間の値を示し、膜厚を厚くする、あるいは素地調整前のコンクリートの表面処理に面取りを施し、さらに伸び能力の大きなライニングを施すことによって、さらなる耐疲労性の向上が図れる可能性がある。

参考文献

- 1) 前岡隆顕, 水元義久, 児島孝之: 鉄筋コンクリートはりの疲労性状に及ぼす水の影響に関する一実験, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第V部, 1982, pp.305-306
- 2) 西林新蔵, 井上正一, 大谷公行: 水中における鉄筋コンクリートはりの疲労性状, コンクリート工学年次講演会論文集, 第9巻, 第2号, 1987, pp.633-638