

# 道路橋 RC 床版の上面増厚補強に用いられる MMA 樹脂コンクリートの疲労寿命に関する研究

Study on Fatigue Life of Methyl Methacrylate(MMA) Resin Concrete used for  
Strengthening of Damaged Reinforced Concrete Slabs in Highway Bridge

堤下隆司\*, 澤田友治\*\*, 徳岡文明\*\*\*, 栗田章光\*\*\*\*

Takashi TSUTSUMISHITA, Yuji SAWADA, Fumiaki TOKUOKA and Akimitsu KURITA

\*工修 修成建設専門学校 土木工学科 (〒555-0032 大阪市西淀川区大和田 5-19-30)  
\*\* 大阪工業大学大学院 博士前期課程 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)  
\*\*\* トーメンコンストラクション(株) 営業本部 (〒104-0033 東京都中央区新川 1-8-6)  
\*\*\*\* 工博 大阪工業大学教授 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

As one of the strengthening methods of damaged reinforced concrete slabs, the authors have been carried out the study to develop the newly method, which has also the performance of waterproofing, using the suitable mechanical properties of MMA resin concrete. The mechanical properties of MMA resin concrete, however, depend on temperature changes. In designing of this resin concrete, therefore, the effect of temperature must be taken into account. Focusing the fatigue design only, an evaluating method of the fatigue life of MMA resin concrete is proposed taken into account of its temperature characteristics. The numerical results are also presented and discussed under various loading conditions.

Key Words: MMA resin concrete, temperature characteristics, fatigue strength, fatigue life

## 1. まえがき

損傷RC床版の補修工法の一つとして、著者らは床版防水をも兼ね得るMMA樹脂コンクリート（以下、樹脂コンクリートという）による上面増厚補強工法について開発研究を行っている<sup>1)~6)</sup>。本工法は、損傷RC床版の上面に樹脂コンクリートを増厚し、断面のかさ上げによって剛性を増すことにより補強する工法である。樹脂コンクリートと床版の付着性は非常に良好であり、防水効果も十分期待できる<sup>1),7),8)</sup>。

使用する樹脂コンクリートは熱可塑性樹脂で、1~2時間で実用強度が発現する速硬化性、耐摩耗性に優れた材料である。さらに、-10℃の低温でも硬化する低温硬化性、コンクリートに近い圧縮弾性係数、高い強度、塩害、亜硫酸ガス等に強い耐薬品性等、多くの特徴を持っている<sup>9)</sup>。しかし、コンクリートと異なり感温性、硬化収縮性状や強度とじん性関係等、樹脂特有の物性を有している。特に力学的性質は、温度依存性を有するため、その影響は無視することはできない。

本工法による樹脂コンクリートの疲労設計を行う場合、既往の研究結果<sup>1),3)</sup>より、本工法では、樹脂コンクリート

だけによる引張側補強には限界があるため、メッシュ筋による部分補強により増厚部の剛性を高める工夫をしていることから、床版形式を連続版の中間支点上（負曲げ領域）、すなわち、樹脂コンクリートが引張を受ける部分を対象に行う必要がある。それは、上述した感温性の影響が大きいため、通常的手法では精度よく疲労の検討を行うことはできない。

そこで、本論文では、RC床版の負曲げ領域に増厚補強された樹脂コンクリートを対象に、温度特性を考慮した疲労寿命予測手法を提案し、提案式に基づいて、種々の条件下で設計上樹脂コンクリートに必要な疲労強度について検討を加えたので、その結果について報告する。

## 2. 疲労寿命予測手法

### 2.1 概説

コンクリート構造物の疲労破壊に対する安全性の照査をする場合、構造物が繰り返し荷重を受け、疲労破壊を生じるか否かを示す疲労限界線は、断面に作用する断面力（応力度）の大きさと、破壊までの繰り返し回数によって、その領域が区別される。このため、一般的な安全性の照査方

法としては、構造物の耐用期間中に加わる繰返し回数を固定して考え、これに対する断面耐力（疲労強度）の大きさを疲労限界線から求め、これと構造物に繰返し作用する作用断面力（作用応力度）の大きさを比較して、安全性を照査している。

本手法では、着目点における樹脂コンクリートの作用応力を求め、次に、S-N 曲線を用いて破壊までの繰返し回数を算出し、損傷度をマイナー則により求め、疲労寿命を算出する手法である。本手法の特徴は、樹脂コンクリートの力学的性質が、温度依存性を有するため、単一の S-N 曲線で損傷度を求めるのは実際の状態を正しく評価していないため、任意温度に対する複数の S-N 曲線を設定して損傷度を求めている。さらに、作用応力度の計算においても温度を考慮して算出した。疲労寿命算定フローを図-1 に示す。また、以下にその各項目について詳細に述べる。

## 2.2 荷重データの設定

コンクリート構造物が受ける荷重は、上下限の一定した繰返し荷重であることはほとんどなく、一般的には不規則に変動するランダム荷重である。従って実際のコンクリート構造物の疲労寿命を推定する場合、このランダム荷重とそれの疲労寿命への影響をいかに評価するかが問題となる。本解析では、荷重データの設定に際して、独立した荷重波に置き換えられている軸重頻度分布を用いた。さらに、荷重作用に関する確率密度関数として対数正規分布およびワイブル分布の二種を選択してモデル化を行った。また、確率密度関数による軸重頻度分布のモデル化が妥当であるかを実測値との比較により検討した。

## 2.3 床版の設計曲げモーメント式

本工法は上面増厚補強のため、樹脂コンクリートの材料試験や、はり試験の結果より、引張補強側が最も厳しい条件となることがすでに明らかにされているため<sup>1)2)</sup>、樹脂コンクリートの疲労寿命の検討対象は、連続版の中間支点上や片持版などの負曲げモーメントを受ける領域とした。設計曲げモーメント式は、道路橋示方書、鋼橋編<sup>10)</sup>式を用いた。すなわち、示方書に準拠してT荷重（衝撃を含む）による単位幅当たりの設計曲げモーメントを算定した。

## 2.4 温度特性を考慮した疲労寿命の評価法

図-2 に示す実橋で測定した樹脂コンクリート上縁の温度変化が示すように、1年間の温度差は非常に大きい。樹脂コンクリートは先に述べたように感温性が顕著であるため、一定温度下での単一の S-N 曲線を用いたのでは精度よく損傷度を求めることができない。そこで、まず樹脂コンクリートの直接引張試験結果より、図-3 に示すように温度-弾性係数関係を明らかにした。ただし、図に

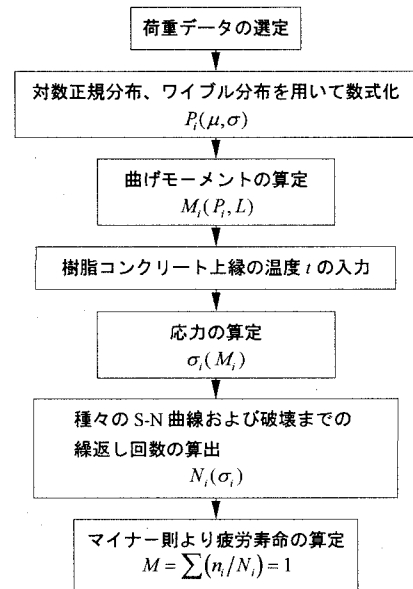


図-1 疲労寿命算定フロー

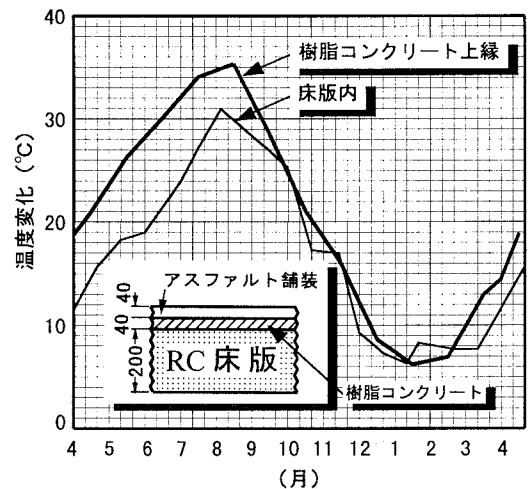


図-2 樹脂コンクリートの1年間の温度変化

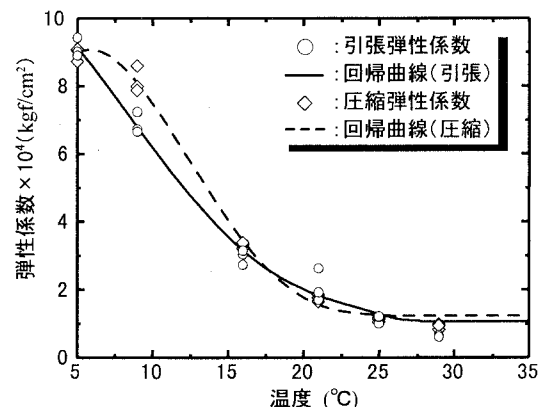


図-3 樹脂コンクリートの温度-弾性係数関係 (直接引張試験結果)

示すように 30°C以上の実験値がないため、温度—弾性係数関係の回帰曲線は、解析時、30°C以降は一定とした。次いで、実橋での温度測定結果をもとに任意温度における S-N 曲線を設定し、着目点の応力計算を行い、その結果をもとに疲労損傷度をマイナー則より算出した。

以下に、疲労寿命の算定の過程と計算式を示す。

### (1) 樹脂コンクリート上縁の応力度の算定

2.3 床版の設計曲げモーメント式で述べた算定式を用いて、樹脂コンクリート上縁に作用する応力度は、はり理論による応力算定モデルより、次式で求められる。

$$\sigma_{au} = n_{a,t} \frac{M_{l+t}}{I_v} \cdot x \quad (2.1)$$

$$M_{l+t} = 0.8(0.12L + 0.07) \cdot P \cdot \gamma$$

ここに、

$\sigma_{au}$  : T 荷重により連続版の中間支点上の樹脂コンクリート上縁に作用する応力度

$n_{a,t}$  : 試験温度における弾性係数比

$M_{l+t}$  : T 荷重による連続版での中間支点上の曲げモーメント

$I_v$  : 換算断面 2 次モーメント

$x$  : 床版上縁から図心軸までの距離

$L$  : T 荷重に対する床版支間長

$P$  : 自動車 1 後輪荷重

$\gamma$  : 割増し係数

### (2) 任意温度における S-N 曲線の設定

任意温度における S-N 曲線の設定には、先に実施した 30°C および 10°C の条件下での実物大はり疲労試験結果<sup>1)3)</sup>をもとに設定する。ただし、温度変化に伴って S-N 曲線がどのように変化するかは、データ数が少ない等の理由から明らかでない。そこで、最小自乗法を用いて直線近似するものとした。

今、試験温度 30°C と 10°C の S-N 曲線式を表すと

$$30^\circ\text{C} : \sigma_{au} = -a_{30} \log N + b_{30}$$

$$10^\circ\text{C} : \sigma_{au} = -a_{10} \log N + b_{10}$$

となる。そこで、任意温度における S-N 曲線の傾き  $a$  と試験温度  $t$ °C との関係より、回帰直線を求めると次式で表される。

$$a = A_1 \cdot t + B_1 \quad (2.2)$$

ここに、

$a$  : 傾き

$t$  : 温度

$$D = n[t^2] - [t]^2$$

$$A_1 = \frac{1}{D} (n[a \cdot t] - [t] \cdot [a])$$

$$B_1 = \frac{1}{D} ([t^2] \cdot [a] - [t] \cdot [a \cdot t])$$

同様に、切片  $b$  と試験温度  $t$ °C との関係は、次式のよ

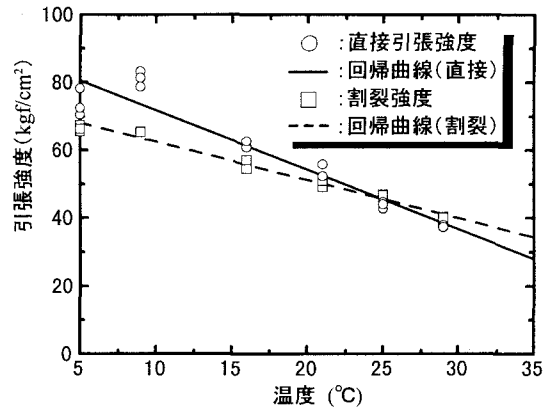


図-4 温度—引張強度関係

うに表すことができる。

$$b = A_2 \cdot t + B_2 \quad (2.3)$$

(2.2)式と(2.3)式を用いて任意温度における樹脂コンクリートの S-N 曲線は、次式で表すことができる。

$$\sigma_{au} = a \cdot \log N + b \quad (2.4)$$

### (3) 疲労損傷度の算定

使用した軸重頻度分布は、24 時間当たりの測定値であるため、累積疲労損傷度は、当然 1 日当たりとなる。したがって、1 ヶ月当たりの疲労損傷度は、1 日当たりの 30 倍として表すことができる。

$$M_{24} = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i}$$

$$M_m = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \times 30 \quad (2.5)$$

ここに、

$M_{24}$  : 24 時間当たりの疲労損傷度

$M_m$  : 1 ヶ月当たりの疲労損傷度

$n_i$  : 軸数

$N_i$  : 載荷回数

### (4) 疲労寿命の算定

(3)で求めた疲労損傷度を用いて、疲労寿命を算定する。疲労寿命の算定には、マイナー則を用い、累積疲労損傷度が 1 になったとき疲労破壊が生じるものと考えられる。1 年間の疲労損傷度は、次式で表される。

$$M = \sum_{i=360}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (2.6)$$

ここに、

$t=360$  : 1 年間の日数を示す。

マイナー則による疲労破壊の判定式は、次式で表される。

$$M = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \leq 1 \quad (2.7)$$

したがって、疲労寿命は、(2.7)式で求められる損傷度  $M$  の逆数を求めることにより得られる。

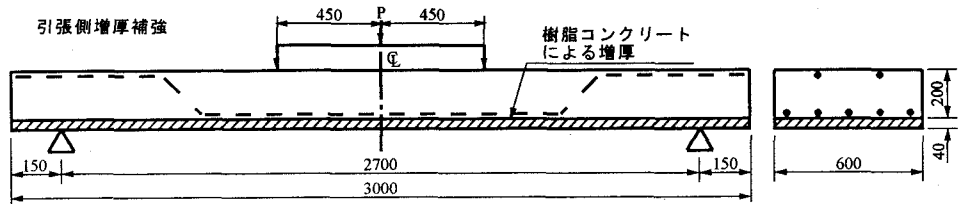


図-5 実験供試体（実際とは天地逆の状態）

### 3. 数値解析

#### 3.1 概説

2.で提案した疲労寿命予測手法を用いて負曲げ領域における樹脂コンクリートの実橋レベルでの疲労寿命の推定を行った。まず、解析にあたり、樹脂コンクリートの基本 S-N 曲線が必要であるため、今回は、図-5に示した実物大はりをを用いた2定点繰り返し疲労荷重試験を実施した<sup>1),3)</sup>。図-6は試験により得られた樹脂コンクリートの S-N 曲線を示している。

S-N 曲線は、樹脂コンクリートのひび割れ状況により、破壊状態および全厚全幅貫通状態の2ケースについて表示した。ここで、破壊状態とは目視で樹脂コンクリート側面に生じたひび割れが増厚部を貫通した状態、全厚全幅貫通状態とはひび割れが樹脂コンクリート側面および幅方向を貫通した状態と定義した。また、30°Cの全厚全幅貫通状態の S-N 曲線が、荷重回数約400万回を境に破壊状態を下回り逆転している。これは、S-N 曲線を最小自乗法により直線近似して求めたが、データ数が少ないために生じたものとする。そこで、解析においては、この交差点より低応力の場合、全厚全幅貫通状態の S-N 曲線は、破壊状態の S-N 曲線を用いることとした。

疲労寿命の算定を行う対象としては、昭和39年度版の道路橋示方書<sup>11)</sup>により設計されたRC床版（主桁間隔3.6 m）とした。

#### 3.2 解析条件

解析条件を以下に示す。

- (1) 荷重データとしては、図-7に示す平成8年に阪神高速道路15号堺線で実測された軸重頻度分布<sup>12)</sup>を用いる。
- (2) 自動車荷重の通行位置は常に一定とする。
- (3) 樹脂コンクリートの疲労限は無いものとする。

#### 3.3 疲労寿命の推定

図-6に示す10°Cおよび30°Cの条件下での疲労試験結果

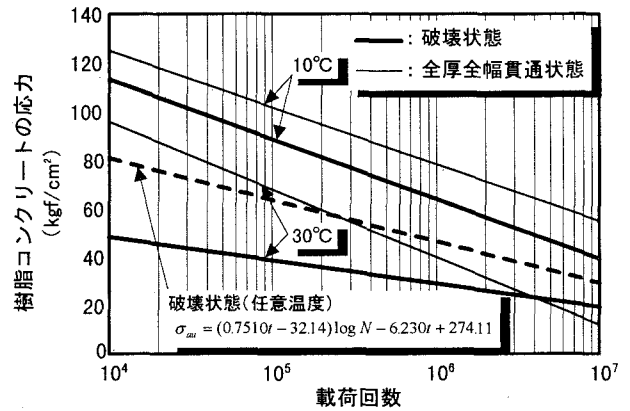


図-6 樹脂コンクリートのS-N曲線

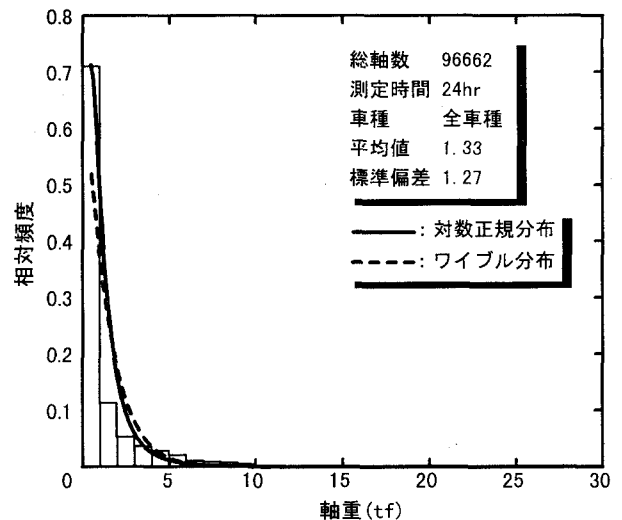


図-7 軸重頻度分布と確率密度関数

表-1 軸重頻度分布をモデル化した結果

	確率密度関数 f(x)
対数正規分布	$f(x) = \frac{1}{0.8050 \times \sqrt{2\pi} \times x} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\ln \cdot x + 0.03887}{0.8050} \right)^2 \right]$
ワイブル分布	$f(x) = 1.050 \cdot \frac{x^{0.050}}{1.3765} \cdot e^{-\left(\frac{x}{1.3557}\right)^{1.050}}$

表-2 樹脂コンクリートの疲労寿命算定結果（年）

軸重の最大値	破壊状態			全厚全幅貫通状態		
	対数正規分布	ワイブル分布	実測分布	対数正規分布	ワイブル分布	実測分布
20tf	13.02	12.96	12.79	28.58	28.45	28.23
25tf	13.01	12.96		28.56	28.45	
30tf	13.00	12.96		28.55	28.45	

(注) 実測分布の最大軸重は22.65(tf)

をもとに、任意温度における S-N 曲線を設定し、図-2で示した樹脂コンクリートの温度変化をもとに1年間の疲労損傷度を1ヶ月毎にマイナー則を用いて算出した。

一例として、破壊状態における任意温度下での S-N 曲線を図-6に示した。解析は、軸重頻度分布を対数正規分布およびワイブル分布の確率密度関数を用いてモデル化した場合、ならびに実測値を直接用いた場合の3ケースで行った。表-1に2つの確率密度関数を示した。

表-2に樹脂コンクリートの疲労寿命算定結果を示す。同表より、本解析条件の下では樹脂コンクリートの疲労寿命は、破壊状態で推定すると約13年、全厚全幅貫通状態で推定すると約28年である。ただし、本解析で用いた荷重モデルは、重交通地域のものであり、平均的な交通量地域（総軸数6万、最大軸重30tf）での疲労寿命を算定した結果は、破壊状態で約21年、全厚全幅貫通状態で約46年であった。

本解析で荷重データをモデル化するために用いた確率密度関数と実測分布そのものを用いた場合を比較すると、破壊状態ならびに全厚全幅貫通状態ともに両者の差は1.5%程度であり、確率密度関数による近似は精度よく行っているといえる。今回の軸重頻度分布では、確率密度関数の分布モデルとして用いた対数正規分布、ワイブル分布のどちらでモデル化を行っても、疲労寿命の推定年数には、大差ないことが明らかとなった。また、ワイブル分布による疲労寿命が最大軸重の増加にも関わらず減少していないが、これはワイブル分布により求めた軸重の大きな位置での作用頻度が少ないため、疲労寿命への影響が現れていないためである。しかし、総軸数が同じで軸重が小さい場合は対数正規分布、軸重が大きい場合はワイブル分布の方がそれぞれ精度良く適合することが明らかとなった。それゆえ、疲労寿命を算定する場合には、軸重の大きさによる使い分けを行うことにより、精度の高い推定が可能となる。

### 3.4 樹脂コンクリートの必要疲労強度

樹脂コンクリートの設計上、必要な疲労強度を求める場合、多数の要求項目を設定する必要があるため、3.数値解析で用いた解析条件に次の条件を加えて解析を行った。

- ①本工法では、アスファルト舗装の下半分を樹脂コンクリートで代換えるため、樹脂コンクリートに必要なとされる疲労寿命を設定する場合、通常道路橋RC床版上のアスファルト舗装の標準打ち換え年数は7～8年である。そこで、舗装打ち換えごとではコストの面から不利となるため、これらを考慮して必要疲労寿命は、その約倍の15年とした。
- ②疲労強度は、常温（20℃）時での値とし、200万回時の疲労強度で評価する。
- ③最大軸重の設定は、軸重が大きくなるほど軸数1に対する疲労損傷度が大きくなるため、また、現行示

方書では、B活荷重となっており安全側を考慮し、軸重の最大値は30tfとした。

- ④樹脂コンクリートの状態は、安全性を考慮して破壊状態とした。

以上の条件で解析を行った結果を表-3に示した。疲労寿命を15年に設定すると、必要疲労強度は42.3kgf/cm<sup>2</sup>となる。また、この条件で床版支間長を3～4mまで変化させ必要強度を求めた結果、支間長4mでは42.6kgf/cm<sup>2</sup>であり、この範囲内での床版支間長の変化では、必要疲労強度はごく僅かな増加量であることがわかった。これより、床版支間長変化による影響は受けないことが明らかとなった。

表-3 樹脂コンクリートの必要疲労強度

軸重の最大値	破壊状態	
	疲労寿命	必要疲労強度
30tf	8年	37.7 kgf/cm <sup>2</sup>
	15年	42.3 kgf/cm <sup>2</sup>

## 4. まとめ

本研究では、道路橋RC床版の上面増厚補強工法に用いられる樹脂コンクリートの疲労寿命の評価方法として、温度特性を考慮した疲労寿命予測手法を提案した。さらに、提案式に基づいて、種々の条件下で解析を行い設計上必要な樹脂コンクリートの疲労強度について検討を行った。

本研究から明らかになった事項は以下の通りである。

- (1)感温性を考慮した樹脂コンクリートの疲労寿命を推定できることを示した。
- (2)本解析では、荷重データのモデル化を二種の確率密度関数を用いて行ったが、両者とも精度良く近似できることが明らかとなった。
- (3)最大軸重と疲労寿命の関係は、軸重が大きくなるほど、軸数1に対する疲労損傷度が大きくなるため、最大軸重が大きくなるほど疲労寿命は短くなることが確認できた。
- (4)本解析で用いた荷重モデルは重交通地域のものであるが、寿命評価に対する使用限界を防水機能が完全に失われる時点(全厚全幅貫通状態)とすると、活荷重作用頻度の影響によるが、疲労寿命は約28年であることが推定できた。
- (5)設計上、安全性を考慮した破壊状態で推定すると疲労寿命は、約13年となる。アスファルトの標準打ち換え年数の7～8年は、満足されているが、コストの面から考えて、疲労寿命がさらに大きくなるように樹脂コンクリートの改良が必要である。
- (6)破壊状態で疲労寿命を15年に延命するために必要な疲労強度は、約42.3kgf/cm<sup>2</sup>(常温20℃)以上であることがわかった。

最後に、疲労設計を行うには、S-N 曲線の精度が重要

である。樹脂コンクリートは、感温性が顕著な材料であるため、今回用いた S-N 曲線は、データ数が少ないため、精度上の問題点はあると思われるので、今後追加試験を実施して精度の高い疲労データを蓄積する必要がある。また、床版疲労では、交番垂直せん断力やねじりせん断力の影響が大であると言われており、これらにも着目して樹脂コンクリートの疲労寿命を検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 栗田章光：アクリル樹脂コンクリートと補強筋による床版増厚補強工法の開発研究、大阪工大摂南大学・八幡工学実験場・構造実験センター報告書、1992.3
- 2) 堤下隆司・栗田章光・桜井忠雄・小西偉夫：アクリル樹脂コンクリートによる損傷RC床版の増厚補強設計について(続)、土木学会第47回年次学術講演会、1992.9
- 3) 堤下隆司・栗田章光・徳岡文明・小西偉夫：アクリル樹脂コンクリートによる道路橋RC床版の増厚補強工法、コンクリート構造物の補修工法に関するシンポジウム、日本コンクリート工学協会、1992.10
- 4) 堤下隆司・栗田章光・徳岡文明・小西偉夫：RC床版に接着したメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮に関する研究、コンクリート工学年次学術講演会、1994.6
- 5) 澤田友治・栗田章光・堤下隆司・徳岡文明：RC床版の上面増厚補強に用いられるメタクリル樹脂コンクリートの硬化収縮に関する研究、土木学会第53回年次学術講演会、1998.10
- 6) 堤下隆司・栗田章光・澤田友治・徳岡文明：道路橋RC上面増厚補強に用いられるメタクリル樹脂コンクリート床版の上面増厚補強に用いられるメタクリル樹脂コンクリートの疲労寿命の評価、土木学会第53回年次学術講演会、1998.10
- 7) 松井繁之・園田恵一郎・瀬戸口嘉明・上林厚志：床版防水工に関する研究(その3)、土木学会第45回年次学術講演会、1990.9
- 8) トーメンコンストラクション株式会社：ロードガードAQ、1995.7
- 9) 小柳洽：レジンコンクリートの現状(とくに構造利用について)、コンクリート工学、Vol.31、No.4、1993.4
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・Ⅱ・鋼橋編、1990.2
- 11) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書、鋼道路橋製作示方書・解説、1964.6
- 12) (財) 阪神高速道路管理技術センター：耐久性向上に関する検討部会活動概要、1997.3
- 13) 石橋忠良・児島孝之・阪田憲次・松下博通：コンクリート構造物の耐久性シリーズ・疲労、技報堂出版、1987.9