

塩害により劣化した RC 床版の疲労寿命予測に関する考察

Study on Prediction of Fatigue Life of Deteriorated Reinforced Concrete Slabs under Chloride Attack

東山浩士*, 石川敏之**, 上中宏二郎***

Hiroshi HIGASHIYAMA, Toshiyuki ISHIKAWA, Kojiro UENAKA

* 博 (工) 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

**博 (工) 大阪大学大学院特任研究員 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0816 吹田市山田丘 2-1)

***博 (工) 神戸市立工業高等専門学校助教授 都市工学科 (〒651-2194 神戸市西区学園東町 8-3)

Reinforced concrete (RC) slabs suffer from serious deterioration due to repeated vehicle loads and environmental attacks. The corrosion of steel reinforcements due to the chloride ion ingress is one of the major deteriorating problems. In order to execute effective repairing and strengthening procedures, it is necessary to accurately assess safety and life of RC slabs. In this study, the deterioration of RC slabs considering the damage by the combination of repetitive traffic loads and chloride ion ingress is simulated under some assumed conditions. Consequently, the punching shear failure occurs due to the repetitive traffic loads prior to the fatigue rupture of the corroded steel reinforcement. Fatigue life of RC slabs affected by the chloride attack is significantly reduced due to cracks and reduction of cross-section area of steel reinforcements.

Key Words: reinforced concrete slab, chloride attack, fatigue durability, corrosion of steel reinforcement

キーワード: RC 床版, 塩害劣化, 疲労耐久性, 鉄筋腐食

1. はじめに

交通荷重の繰返し作用による鉄筋コンクリート (RC) 床版の疲労損傷が顕在化し始めたそのほとんどが昭和 40 年代初頭に建設された RC 床版であった。当時の設計には昭和 39 年に改訂された鋼道路橋設計示方書¹⁾が用いられており、劣化損傷は現行の道路橋示方書に比して床版厚が薄く、配力鉄筋量が極端に少なかったことに起因している。

RC 床版の疲労損傷メカニズムに関しては、これまでに多くの研究²⁾が行われ、輪荷重走行試験による疲労損傷メカニズムの解明と疲労寿命予測手法の提案がなされてきた³⁾。現在では、床版の疲労耐久性を評価する手法として輪荷重走行試験による方法が一般的となってきたようである。

一方、環境化学的な劣化損傷がコンクリート構造物に顕在化し始め、東北地方から北陸にかけての日本海沿岸に建設されたコンクリート構造物では、塩害や二酸化炭素による中性化が原因となってコンクリート内部の鉄筋が腐食し、かぶりコンクリートが剥離・剥落するなどの問題が生じている。また、寒冷地における凍結融解材の散布が RC 床版の塩害を引き起こす要因として危惧されている。塩害劣化した RC 床版の疲労破壊に関する研究⁴⁾では、腐食した鉄筋の疲労破断によって耐力が大幅に低下することが明らかになっており、寿命予測において鉄筋の疲労破断をも照査する必要がある。

コンクリート構造物の効率的、かつ、合理的な維持管理を行うためには、精度の高い劣化予測モデルの開発、劣化したコンクリート構造物の耐荷力・耐久性評価手法の確立、補修・補強の実施時期とその効果を具体化するための補修・補強設計手法の確立が必要である。

本研究では、塩害劣化を受けた RC 床版の疲労寿命について、

汀線から対象橋梁までの距離、鉄筋の腐食速度をパラメータとして、床版の押抜きせん断破壊と鉄筋の疲労破断の影響度を比較検討した。

2. 塩害および疲労による劣化過程

2.1 塩害による劣化過程

コンクリート構造物の塩害による劣化度と使用期間との概略図⁵⁾を図-1に示す。劣化過程は4つの期間に大別される。塩害によるそれぞれの劣化期間についてコンクリート標準示方書 [維持管理編]⁵⁾を基に以下に述べる。

潜伏期 (I) : 外観上の変状は見られず、鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの期間(t_{cor})である。

進展期 (II) : 鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達し、鉄筋腐食が開始し、腐食生成物の膨張によりコンクリートにひび割れが発生するまでの期間(t_p)である。

加速期 (III) : コンクリートにひび割れが発生することにより腐食速度が増し、錆汁やコンクリートの剥離・剥落が見られる期間である。

劣化期 (IV) : ひび割れの進展、ひび割れ幅の増大、錆汁やコンクリートの剥離・剥落により変形の増大や耐荷力の低下が顕著となる期間である。

2.2 疲労による劣化過程

交通荷重の繰返しによる RC 床版の劣化度と使用時間との概略図⁵⁾を図-2に示す。塩害による劣化過程と同様に4つの期間に大別される。疲労によるそれぞれの劣化期間についてコンクリート標準示方書 [維持管理編]⁵⁾を基に以下に述べる。

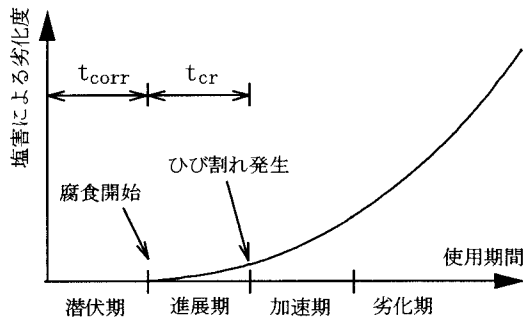


図-1 塩害による劣化過程⁵⁾

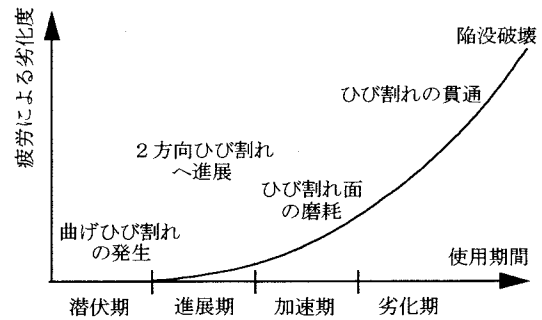


図-2 疲労による劣化過程⁵⁾

潜伏期 (I) : コンクリートの温度変化や乾燥収縮による体積変化が主桁などによって拘束されるため、橋軸直角方向 (主鉄筋方向) にひび割れが発生し、供用開始後の交通荷重によりひび割れがさらに発生・進展する期間である。

進展期 (II) : 橋軸直角方向のひび割れ発生により、床版は等方性版から異方性版へと変化し、橋軸方向の曲げ剛性低下により、曲げモーメントの負担率が変化するため、橋軸方向にひび割れが発生する。2方向ひび割れが形成される期間である。

加速期 (III) : 2方向ひび割れの長さ、幅、深さが増し、ひび割れの開閉、こすり合わせが繰返されることによるひび割れ面の磨耗が進行する期間である。

劣化期 (IV) : ねじりモーメントにより、床版上面に発生したひび割れが下面からのひび割れと連結して貫通ひび割れが形成される。また、ひび割れの角落ちが進み、最終的に床版が陥没に至る期間である。

3. 塩害劣化モデル

3.1 潜伏期 (I)

潜伏期はコンクリート表面から塩化物イオンが内部へと浸透し、不動態被膜を破壊するまでの期間である。塩化物イオンの浸透現象は Fick の第2法則に基づいた次の1次元拡散方程式により表されるものと仮定される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_c \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

この1次元拡散方程式の解は次式のように表される。

$$C(x,t) = C_0 \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D_c \cdot t}} \right) \right] + C(x,0) \quad (2)$$

ここで、 $C(x,t)$ はコンクリート表面からの深さ x (cm)、塩化物イオンの浸透開始からの経過時間 t (year) における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 C_0 はコンクリート表面における塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 D_c は塩化物イオンの拡散係数 (cm^2/year)、 $C(x,0)$ は初期含有塩化物イオン濃度 (kg/m^3)、 $\operatorname{erf}(\cdot)$ は誤差関数である。

コンクリート表面における塩化物イオン濃度は、コンクリート標準示方書 [施工編]⁹⁾ に与えられている。また、塩化物イオンの見掛けの拡散係数は、コンクリート標準示方書 [施工編]⁹⁾ に普通ポルトランドセメントを使用した場合として、次式が提案されている。

$$\log D_c = -3.9(W/C)^2 + 7.2(W/C) - 2.5 \quad (3)$$

ここで、 (W/C) は水セメント比である。

式(2)から、 $C(x,t)$ が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達するまでの経過時間を求めることができる。コンクリート標準示方書 [施工編]⁹⁾ では、腐食発生限界塩化物イオン濃度を $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ としている。ただし、この値は若干安全側の値であるとされており⁷⁾、実際には構造物の周辺環境条件により異なり、いくらかのばらつきを有している。文献 8) の調査結果では、 $1.88\text{kg}/\text{m}^3$ の値が得られている。

3.2 進展期 (II)・加速期 (III)

(a) 腐食速度

鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度に達すると、不動態被膜が破壊され、鉄筋腐食が開始する。腐食は鉄筋表面における水分と酸素の溶存により進行するため、腐食速度を精度よく推定するためには、周辺の天候状態や酸素の拡散を考慮する必要がある。

中川ら⁷⁾は、進展期における電気化学に基づく Faraday の法則により鉄筋のカソード・アノードの面積比などから腐食ひび割れ発生前の腐食速度を試算し、鉄筋の断面積減少率で表した平均的な値として $\Delta_1 = 0.1\%/year$ を提案している。腐食速度は環境条件によって変動するため、文献によってその値にばらつきが見られる。例えば、Stem-Geary ら⁹⁾ の分極抵抗法の基本式によると、腐食速度は $11.6 \mu\text{m}/year$ となる。

鉄筋腐食の進行により、腐食生成物が体積膨張すると、コンクリートにひび割れが発生し、ひび割れから水分や酸素が容易に浸入することができるため、鉄筋の腐食速度はさらに速まる。中川ら⁷⁾は、既往の調査結果¹⁰⁾ から、ひび割れ発生後の腐食速度を鉄筋の断面積減少率から求め、平均的な値として、 $\Delta_2 = 0.35\%/year$ を提案している。また、この腐食速度はかぶり深さに関係なくほぼ同程度の値であると判断されている。 Δ_1 と同様に、腐食速度は環境条件によって変動するため、文献によってその値にばらつきが見られる。

(b) 腐食ひび割れ

加速期には、腐食生成物の体積膨張により、腐食ひび割れが発生・進展する。ひび割れの発生パターンはかぶり深さに影響し、Bazant¹¹⁾ は図-3 に示すように、かぶり深さが 1.0in (25.4mm) 以下の場合、内部ひび割れはハの字状に発生し、1.25in (31.8mm) 以上であれば、内部ひび割れは鉄筋に沿ってほぼ水平に発生するとしている。高岡ら¹²⁾ は鉄筋の発錆量 (腐食量) とコンクリ

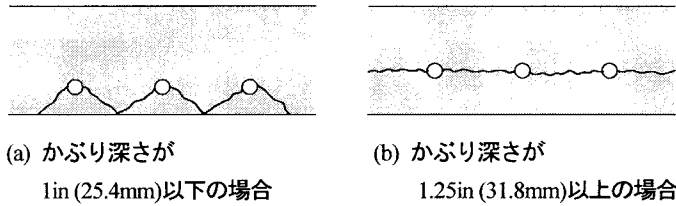


図-3 ひび割れ発生パターン¹¹⁾

ート表面のひび割れ幅とが直線関係にあることを明らかにし、かぶり深さとひび割れパターンとの相関性を実験的に検討している。Bazant¹¹⁾、高岡ら¹²⁾、横田ら¹³⁾の研究から、一般的なRC床版に適用される鉄筋径(20mm程度)、かぶり深さ(>30mm程度)であれば、コンクリート表面にひび割れの発生が認められた段階で、内部の腐食ひび割れは鉄筋に沿って水平に発生している場合が多いとされている。

(c) 鉄筋とコンクリートとの付着

日本コンクリート工学協会「コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会」報告書¹⁴⁾には、鉄筋腐食による付着強度への影響に関する既往の研究結果がまとめられており、それらを参考に、腐食減量率(鉄筋の腐食量と健全な鉄筋の重量、あるいは、鉄筋径との比)と付着強度比との関係は、図-4に概略図を示すように、腐食減量率1~3%程度の小さい範囲において付着強度比が1.0を上回り、その後、ほぼ線形的に付着強度は低下する。腐食減量率6.5%で付着強度は25%低下するという結果も得られている¹⁴⁾。腐食の進行に伴った経時的な付着強度の低下を考慮するためには、付着劣化をモデル化したFEM解析などの手法が必要となるため、本研究では、付着劣化のモデル化は行わず、単に、腐食減量率が1.5%に達した時にはすでに鉄筋に沿った水平ひび割れが発生しているとし、次章で述べるRC床版の押抜きせん断耐力の算定式(6)においてかぶりコンクリートの寄与を無視することにした。

4. 床版の疲労劣化モデル

4.1 S-N曲線

輪荷重走行試験機によるRC床版の疲労実験結果³⁾から、RC床版が最終的に押抜きせん断破壊するまでの寿命は次式に示すS-N曲線によって予測される。

乾燥状態

$$\log\left(\frac{P_0}{P_{sx}}\right) = -0.0784 \log N + \log 1.52 \quad (4)$$

湿潤状態

$$\log\left(\frac{P_0}{P_{sx}}\right) = -0.0784 \log N + \log 1.23 \quad (5)$$

$$P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_i C_m) \quad (6)$$

$$B = b + 2d_d \quad (7)$$

$$f_v = 0.656 f_c^{0.606} \quad (8)$$

$$f_i = 0.269 f_c^{2/3} \quad (9)$$

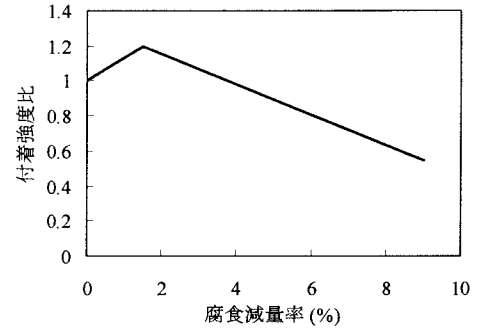


図-4 腐食減量率と付着強度比の概略図

ここで、 P_0 は基本輪荷重(N)、 P_{sx} ははり状化したRC床版の主鉄筋断面に関する押抜きせん断耐力(N)、 N は繰返し回数、 B ははり幅(mm)、 x_m は主鉄筋断面の中立軸深さ(mm)、 C_m は引張側主鉄筋のかぶり深さ(mm)、 b は配力鉄筋方向の輪荷重接地幅(mm)、 d_d は配力鉄筋断面の有効高さ(mm)、 f'_c はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 f_i はコンクリートのせん断強度(N/mm²)、 f_t はコンクリートの引張強度(N/mm²)である。

4.2 等価繰返し回数

マイナーの線形累積被害則によれば、種々の変動荷重 P_i がそれぞれ N_i 回作用した時、荷重 P_0 を基本荷重として換算した等価繰返し回数は次式で表される。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0}\right)^m N_i \quad (10)$$

ここで、 m はS-N曲線の傾きの逆数である。

RC床版上を走行する交通荷重は変動が大きく、その変動因子は荷重の大きさ、通行位置である。実測された交通荷重の通行位置および大きさは、図-5¹⁵⁾および図-6¹⁵⁾に示すような分布にて表すことができる。ただし、総通行回数は43,000回/日と仮定した。これらの実測値がある確率密度関数で表されるならば、これらのデータを用いて、交通荷重の等価繰返し回数は次式で求められる¹⁶⁾。

$$N_{eq} = (1+i)^m C_1 \cdot C_2 \cdot N_T \quad (11)$$

$$C_1 = \int_{\alpha}^{\beta} \left(\frac{Q_x}{Q_0}\right)^m f(x) dx \quad (12)$$

$$C_2 = \int_0^{P_{\max}} \left(\frac{P}{P_0}\right)^m f(P) dP \quad (13)$$

ここで、 C_1 は交通荷重の通行位置に関する値、 C_2 は交通荷重の大きさに関する値、 N_T は交通荷重の総通行回数、 i は衝撃係数、 Q_x は着目点における交通荷重 P によって主鉄筋断面に発生するせん断力、 Q_0 は基本荷重 P_0 によって主鉄筋断面に発生するせん断力、 α および β は通行位置の最小値および最大値、 $f(x)$ は通行位置に関する確率密度関数、 $f(P)$ は交通荷重に関する確率密度関数である。

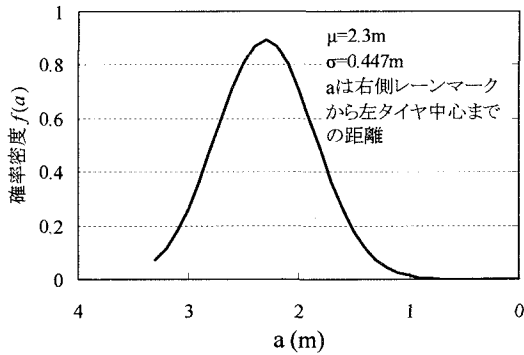


図-5 通行位置分布¹⁵⁾

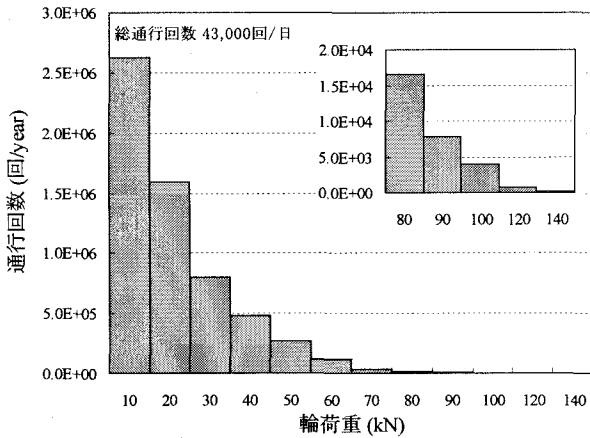
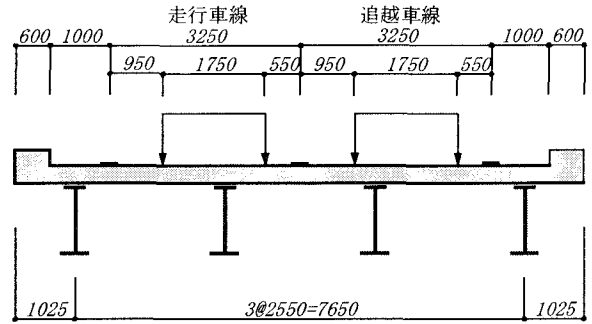
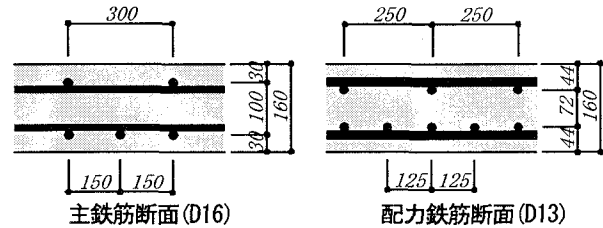


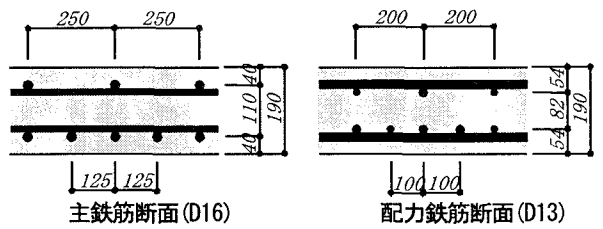
図-6 年交通荷重の輪荷重分布¹⁵⁾



(a) 鋼道路橋一般図



(b) S43RC 床版断面図



(c) S46RC 床版断面図

図-7 対象とした鋼道路橋の一般図と床版断面

5. 疲労寿命予測

5.1 対象RC床版

本研究にて対象とした鋼道路橋の一般図と RC 床版の断面構成図を図-7に示す。本論文では、昭和43年および昭和46年に通達された、「鋼道路橋の床版設計に関する暫定指針(案)」および「鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版の設計」により断面を決定した。これらの通達は、設計活荷重曲げモーメント式の変更、それに伴う配力鉄筋量の変更である。交通荷重の通行位置が図-5に示される分布であると仮定し、通行位置の最頻値(分布の期待値： $a=2.3\text{m}$)に大型車(1輪荷重： $P=100\text{kN}$)を載荷したとき、主鉄筋断面に作用するせん断力が最大となる位置を押抜きせん断疲労破壊に関する着目点とした。ただし、走行車線のみを載荷した。その結果、着目点は主桁上フランジ幅およびハンチ幅を考慮して、走行車線の右側レーンマークから1.94mの位置とした。同様にして、通行位置の最頻値に大型車を載荷したとき、曲げモーメントが最大となる位置を鉄筋破断に関する着目点(走行車線の右側レーンマークから2.42mの位置)とした。着目点に関する影響線(M_x :主鉄筋断面に作用する単位長さ当りの曲げモーメント, M_y :配力鉄筋断面に作用する単位長さ当りの曲げモーメント, S_x :主鉄筋断面に作用する単位長さ当りのせん断力)は図-8となる。ただし、大型車の通行位置をレーンマーク内に限定すると、通行位置分布は $a = 1.75\sim 3.25\text{m}$ の範囲となり、図-8はその範囲内における影響線である。

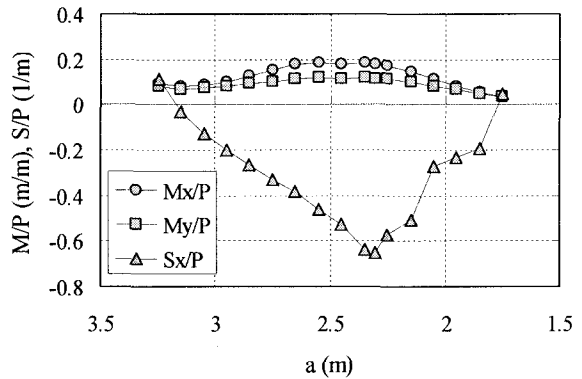


図-8 着目点に関する影響線

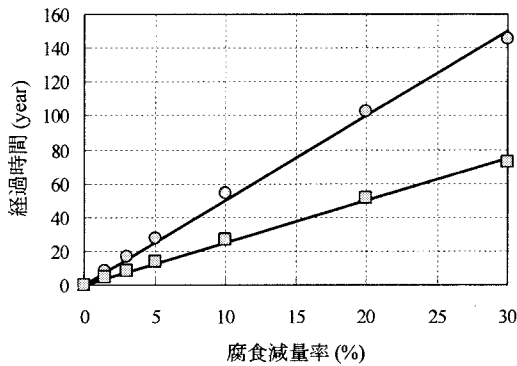
5.2 諸数値の設定と条件の設定

寿命予測のための諸数値を表-1に示す。パラメータは、汀線からの距離および鉄筋の腐食速度である。本研究では、RC床版の劣化原因が塩害による鉄筋の腐食および交通荷重による劣化とする。また、鉄筋の腐食は、塩化物イオンの浸透による不動態被膜の破壊により発生すると仮定する。

進展期における鉄筋の腐食速度は比較的小さいが、既往の研究結果¹⁷⁾より、進展期は潜伏期に比べて期間が短いことから、潜伏期からすぐさま加速期へ移行するものと仮定する。そこで、交通荷重による曲げひび割れが早期に発生しているとし、潜伏期以降の腐食速度(断面積減少率)を、平均的な値とされる $\Delta_2 = 0.35\%/year$ ⁷⁾と、より過酷な環境にあることを想定して、その2

表一 寿命予測のための諸数値

圧縮強度 (N/mm ²)	24
水セメント比 (%)	65
ヤング係数 (kN/mm ²)	25
腐食発生限界濃度 (kg/m ³)	1.2
腐食速度 (%/year)	0.35, 0.70
鉄筋の降伏応力 (N/mm ²)	300
鉄筋の引張強度 (N/mm ²)	500



図一 腐食減量率と経過時間

倍の $\Delta_2 = 0.70\%/year$ を用いて検討する。腐食減量率と経過時間との関係は図一 9 のようである。

腐食鉄筋の膨張によるコンクリートのひび割れは、上述した腐食減量率が 1.5% に達した時とし、コンクリート内部の腐食ひび割れパターンは鉄筋に沿って水平に発生すると仮定するが、腐食による鉄筋とコンクリートとの付着すべりの影響は考慮しない。

コンクリート表面における塩化物イオン濃度はコンクリート標準示方書 [施工編]⁹⁾ の値を用いる。また、式(2)中の初期含有塩化物イオン濃度はゼロとする。

まず、引張鉄筋位置における塩化物イオン濃度が腐食発生限界塩化物イオン濃度である $C_{th} = 1.2\text{kg/m}^3$ に達する時間、すなわち、腐食開始までの時間を式(2)および式(3)より求めた結果を図一 10 に示す。この時点から鉄筋腐食が開始すると仮定する。潜伏期からすぐさま加速期へ移行するものと仮定すると、押抜きせん断耐荷力算定式(6)において、腐食ひび割れが発生すると仮定した鉄筋の腐食減量率 1.5% までは引張鉄筋位置におけるかぶりコンクリートの剥離抵抗を考慮し、1.5% 以上では引張鉄筋に沿った水平方向の腐食ひび割れ発生により剥離抵抗を無視する。また、押抜きせん断疲労寿命は、式(4)および式(5)より求まる乾燥状態および潤湿状態の疲労寿命の平均値とする。

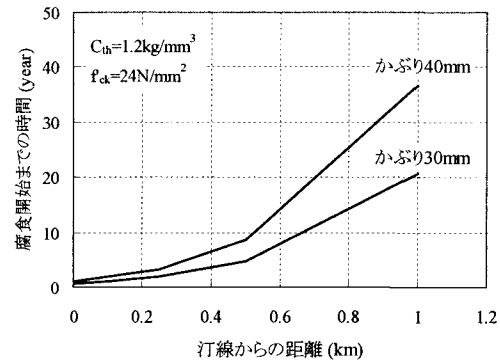
鉄筋の疲労寿命は、守分ら¹⁸⁾ が提案している、腐食した鉄筋(断面減少や孔食を有する)に亀裂が発生するまでの疲労寿命と亀裂が発生して鉄筋が破断するまでの亀裂伝播寿命の和より算出する。亀裂発生寿命を次式¹⁸⁾により算出できる。

$$\left\{ 2 + \left(\frac{D-r}{D} \right)^3 \right\} \times \left(\frac{D}{D-r} \right) \times \Delta\sigma = \frac{3.15 \times 10^3}{N^{0.117}} \quad (14)$$

ここで、 $\Delta\sigma$ は変動応力、 D は公称直径、あるいは、平均腐

表二 疲労寿命結果

床版	腐食速度 (%)	疲労寿命 (year)		
		押抜きせん断	主鉄筋	配力鉄筋
S43床版	0.35	18.14	37.10	43.09
	0.70	14.86	25.08	28.79
S46床版	0.35	65.19	93.16	103.90
	0.70	44.40	52.37	50.22



図一 10 鉄筋腐食開始までの時間 (主鉄筋)

食による断面厚さ、 r は孔食半径、 N は繰返し回数である。

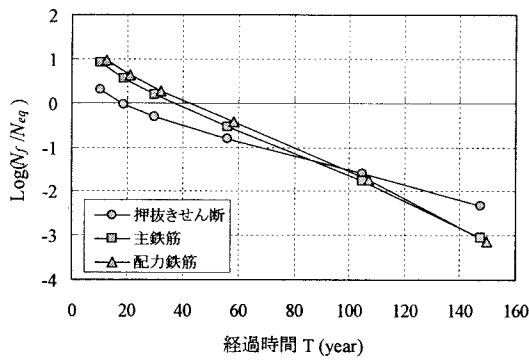
腐食鉄筋の断面形状は複雑であり、そのため、腐食量と孔食半径に関するデータを得るのが困難である。そこで、本研究では、文献(18)にて提案されている安全側の評価となる孔食半径 $r = 4.5\text{mm}$ を用いることにする。また、腐食鉄筋の亀裂伝播寿命は初期欠陥亀裂を 0.035mm に設定して算出する。計算方法の詳細は文献(18)を参照されたい。変動応力は 5.1 に述べた曲げモーメントが最大となる位置を鉄筋破断に関する着目点とし、薄板理論により求められる曲げモーメント値と引張側コンクリートを無視した断面 2 次モーメントを用いて計算した。

5.3 寿命予測結果

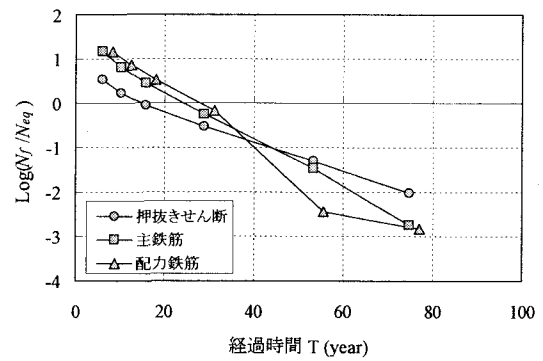
一例として、対象橋梁が汀線から 0.25km の距離にあるとした場合について、押抜きせん断疲労破壊および鉄筋疲労破断の両方から RC 床版の寿命予測を行った。図一 11 の縦軸は、ある経過時間における RC 床版の劣化状態を考慮して S-N 曲線から求めた疲労寿命 N_f とその経過時間までに累積された等価繰返し回数 N_{eq} との比を対数値で示した。本研究では、 $\text{Log}(N_f / N_{eq})$ がゼロを下回る時の経過時間が RC 床版の寿命であるとした。表一 2 に示す疲労寿命から、本研究で検討したケースにおいて、対象 RC 床版では押抜きせん断型の疲労破壊が先行することにより寿命を迎える結果となった。S43 床版は早期に疲労破壊し、S46 床版の疲労寿命は S43 床版に比べて延びるものの、腐食速度の違いが寿命に強く影響することが分かる。

6. まとめ

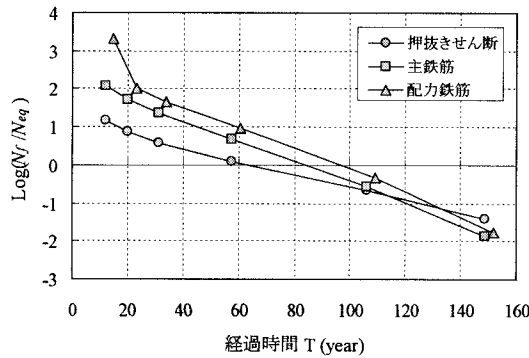
本研究では、塩害により劣化した RC 床版の疲労寿命を限られた仮定に基づいてシミュレーションを行ったが、事例との比較を行うには至っていない。現段階では、塩害を受けた RC 床版の疲労寿命に与える破壊性状の影響度について検討を行った。結果をまとめると次のようである。



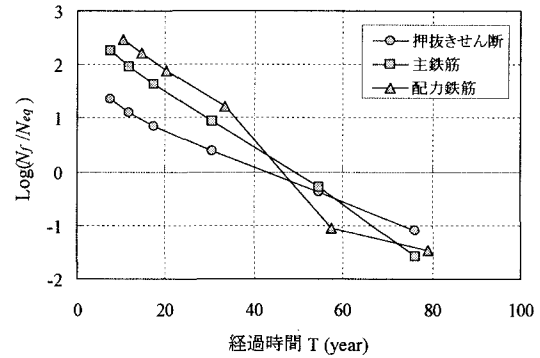
(a) S43 床版 (腐食速度 : 0.35%/year)



(b) S43 床版 (腐食速度 : 0.70%/year)



(c) S46 床版 (腐食速度 : 0.35%/year)



(d) S46 床版 (腐食速度 : 0.70%/year)

図-11 寿命予測結果 (汀線から0.25kmの距離にあるRC床版)

昭和43年および昭和46年の通達を基に設計した対象RC床版について、塩害による鉄筋腐食、ひび割れを考慮し、押抜きせん断疲労破壊および鉄筋疲労破断の両方から疲労寿命を予測した結果、対象RC床版では、押抜きせん断疲労破壊が先行すると予測され、S43床版は早期に疲労破壊し、また、S46床版も押抜きせん断疲労破壊するとなった。本研究では、腐食によって断面積が減少した鉄筋とコンクリートとの付着劣化の影響を詳細に考慮していないため、これらの影響を考慮することによって疲労寿命がさらに低下することが予測される。また、主桁間隔などの橋梁構造の違いが疲労破壊に及ぼす影響についてもパラメトリックに検討する必要がある。さらに、諸数値のばらつきを考慮した確率論的アプローチが重要であり、今後も継続的な検討と事例の収集を行っていく予定である。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋設計示方書，1964.
- 2) 例えば、前田幸雄、松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究，コンクリート工学年次講演論文集，Vo.6，pp.221-224，1984.
- 3) 松井繁之：橋梁の寿命予測，安全工学，Vol.30，No.6，pp.432-440，1991.
- 4) 市川 廣，田淵 博，守分敦郎：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，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.2，pp.281-286，1987.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔維持管理編〕2001年制定，2001.
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書〔施工編〕2002年制定，2002.

- 7) 中川貴之，堤 知明，松島 学：塩害劣化を受けるRC構造物の劣化予測，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.1，pp.415-420，2000.
- 8) 福手 勤，大野皓一郎，川田秀夫，峰松敏和：大規模栈橋における塩害劣化の評価と補修工法の選択，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.1，pp.269-274，1998.
- 9) Stern, M. and Geary, A.L.: Electro-Chemical Polarization I. A Theoretical Analysis of Shape of Polarization Curves, Journal of the Electro-Chemical Society, Vol.104, No.1, 1957.
- 10) 堤 知明：海洋環境下における鉄筋コンクリート構造物の健全度診断に関する研究，東京都立大学博士論文，1997.
- 11) Bazant, Z.P.: Physical Model for Steel Corrosion in Concrete Sea Structures, Proceedings, ASCE, Vol.105, No.ST6, pp.1137-1167, 1979.
- 12) 高岡祐二，丸山久一，清水敬二，中田泰広：鉄筋の発錆によるコンクリートのひび割れ特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.591-596，1989.
- 13) 横田 優，佐々木孝彦，飯島 亨，松島 学：塩害により鉄筋が腐食したコンクリートの劣化予測，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.26，No.1，pp.1041-1046，2004.
- 14) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書，1998.
- 15) 建設省土木研究所：設計活荷重に関する研究（交通荷重の実態と橋梁設計への適用），土木研究所資料第701号，1971.
- 16) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，大阪大学博士論文，1984.
- 17) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の構造・耐久設計境界問題研究委員会報告書，1997.
- 18) 守分敦郎，長滝重義，大即信明：塩害を受けた鉄筋コンクリート部材の疲労寿命の推定法に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.1529-1534，1996.