

論文 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

守分敦郎*1・長滝重義*2・大即信明*3

要旨：本研究では、塩害を受けた鉄筋コンクリート構造物の疲労寿命の推定手法について検討を行ったものである。ここでは、複雑に腐食した鉄筋を「同様な断面積をもつ丸鋼の平均的な断面減少と、応力集中を考慮するための孔食」にモデル化し、線形破壊力学を用いて「き裂発生寿命」「き裂伝播寿命」を推定した。さらに、計算結果と疲労試験結果の比較を行った。

キーワード：塩害, 疲労寿命, 孔食, 応力集中, 破壊力学, き裂発生寿命, き裂伝播寿命

1. はじめに

塩害を受けて劣化した栈橋上部工は、腐食に伴う鉄筋断面積の減少や近年の荷役設備の大型化の影響により、当初設定したものよりも厳しい荷重条件が作用している場合が少なくない。従って、ここでは塩害を受けて腐食した鉄筋コンクリート構造物の疲労寿命の推定法について、複雑に腐食した鉄筋のモデル化と破壊力学を用いた推定法について検討した。

2. 腐食をモデル化した鉄筋の疲労試験

筆者らは、塩害劣化を受けた既設構造物より供試体を切り出し、その疲労寿命について確認を行った[1]。この検討の結果、劣化した部材の疲労寿命は鉄筋の腐食断面形状に大きく依存することが確認された。すなわち、写真-1に見られるように鉄筋の破断面にはき裂の発生箇所が確認されると共に、その後のき裂の進展が半円形に進むことが確認された。従って、腐食に伴ういびつな断面形状が、応力集中部にき裂を発生させ、そのき裂は繰り返し回数が増大と共に進展していったものと考えられる。そこで、応力集中の影響を孔食にモデル化し、機械的に断面を整形した鉄筋の疲労試験を行い[2]、疲労寿命を推定した。このとき行った鉄筋のモデル化および疲労試験の結果を、表-1

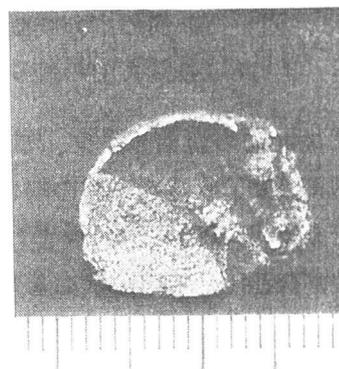


写真-1 鉄筋の破断面状況

および図-1に示す。孔食が1個の場合のデータの中心は式(1)のように、さらに孔食が1個及び2個の場合における、疲労破壊の発生確率が5%の値は、それぞれ式(2), 式(3)によって表現できるようである。

表-1 劣化をモデル化した鉄筋の断面形状

ケース	1	2-1	2-2	2-3	3-1	3-2	4-1	4-2
断面残存率	100%	90%	90%	90%	80%	80%	70%	70%
欠損形態	—	片側	両側	片側	片側	両側	片側	両側
断面状況								
引張試験	3本	—	3本	—	—	—	3本	—
疲労試験	—	6本	6本	7本	3本	5本	5本	4本

*1 東亜建設工業(株) 技術研究所、工博(正会員)

*2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*3 東京工業大学教授 工学部開発システム工学科、工博(正会員)

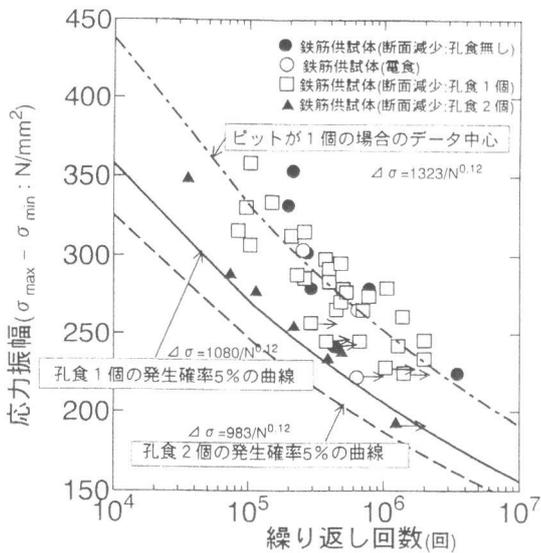


図-1 劣化をモデル化した鉄筋の疲労寿命

$$\Delta\sigma = \frac{1323}{N^{0.12}} \quad (1)$$

(孔食 1 個の場合: ケース 2-3 以外)

$$\Delta\sigma = \frac{1080}{N^{0.12}} \quad (2)$$

(孔食 2 個の場合: ケース 2-3)

$$\Delta\sigma = \frac{983}{N^{0.12}} \quad (3)$$

ここに、 $\Delta\sigma$: 鉄筋の応力変動範囲 (N/mm^2)
 N : 破断までの繰返し回数

さらに破断面の観察の結果、写真-2、写真-3 に見られるように、孔食が 1 個の場合は孔食底から、孔食が 2 個の場合は孔食に挟まれた部分からそれぞれき裂が発生し、半円形状のき裂として進展している様子が伺えた。

3. 鉄筋のモデル化と応力集中

3. 1 解析条件

破壊力学においては、鉄筋の疲労寿命は「き裂発生寿命」と「き裂伝播寿命」の 2 つに分類される。さらに、き裂先端が鋭角的でない場合、疲労寿命はき裂発生寿命に支配されるようである。従って、ここではき裂発生寿命に及ぼす、半円形の孔食の応力集中について、図-2 に示すモデルを用いた三次元 FEM 解析により検討を行った。検討に当たっては、図-3 に示す応力とひずみの関係を用い、ミーゼスの降伏基準を用いて検討を行った。

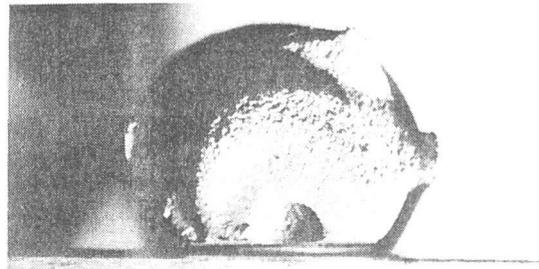


写真-2 鉄筋の破断面 (孔食 1 個の場合)

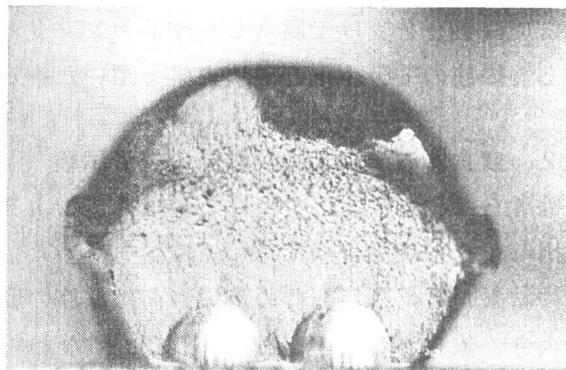


写真-3 鉄筋の破断面 (孔食 2 個の場合)

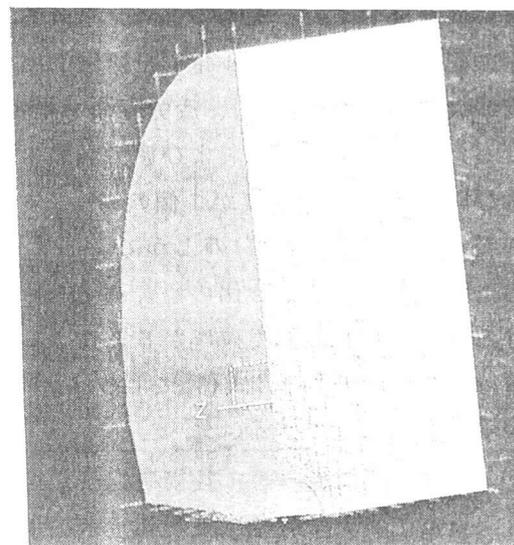


図-2 FEM 解析モデルの概要

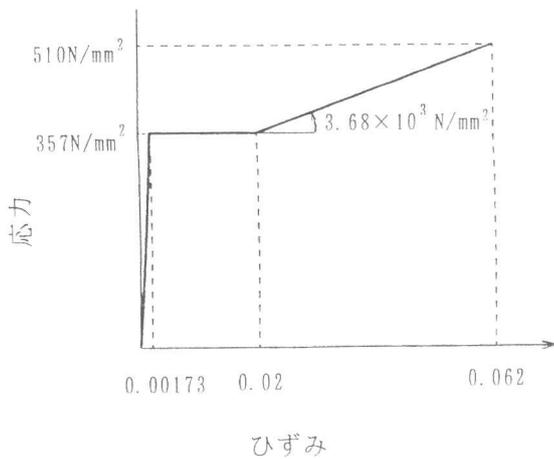


図-3 解析に使用した応力とひずみの関係

3. 2 解析結果

引張応力が 200N/mm^2 の場合、直径 16mm の丸鋼に「20%の平均的な断面減少」がありしかも「半径 2mm の単独の孔食」が存在する場合の、孔食周辺の応力集中の状態を図-4に示す(1/2モデル)。解析の結果、孔食の周辺は降伏応力度を超えており、孔食による応力集中が確認される。疲労試験の結果や応力解析の結果、健全な鉄筋の節の応力集中は、丸鋼に発生した半径 1mm の孔食に伴う応力集中に相当するようである。

一方、き裂発生寿命は式(4)に示すパラメータと密接な関係があると言われている[3]。

$$\left(E \times \sigma_{\max} \times \varepsilon_a\right)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

ここに E : ヤング率
 σ_{\max} : 最大引張応力範囲
 ε_a : 最大ひずみ範囲

従って、(孔食周辺が降伏状態にある場合には、 σ_{\max} が降伏応力度で一定値となるため)ここでは応力集中にともなうひずみに着目した。平均応力が 200N/mm^2 と 300N/mm^2 の場合の解析結果を図-5に示す。孔食半径が大きくなるに従って、孔食周辺の応力集中に伴うひずみが大きくなっている。とりわけ、孔食半径が 4mm を超えるあたりからこの傾向が顕著となることより、鉄筋断面の応力集中が明確でない場合には、安全側の評価として $4\sim 5\text{mm}$ 程度の半円形の孔食を考慮すれば良いようである。

一方、鉄筋の同一断面内に複数の孔食が存在する場合の影響は、図-6に示す断面を想定し、2個の孔食の間隔を変化させて孔食底部と孔食間のひずみ量を計算した。計算結果を図-7に示す。

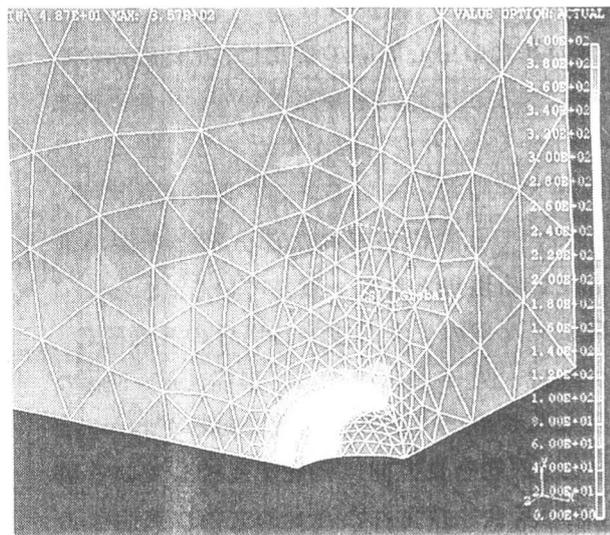


図-4 孔食部周辺の応力 (FEM 解析結果)
 (φ 16mm 下側のみ 20%腐食した場合: 単位 N/mm^2)

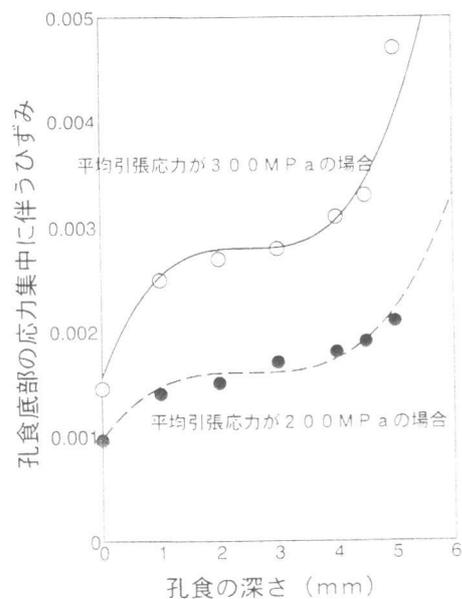


図-5 孔食半径と応力集中に伴うひずみ
 (φ 16mm 下側のみ 20%腐食した場合)

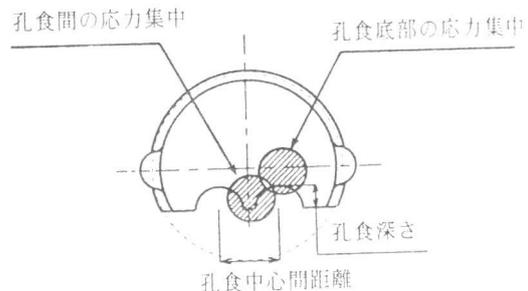


図-6 孔食の中心間距離と応力集中

2個の孔食の中心間隔の変化は、孔食底部のひずみには大きな影響を与えないが、孔食に挟まれた部分では、孔食間隔が接近するに従ってひずみが大きくなっている。この傾向は、写真-3において孔食に挟まれた部分からき裂が進展している現象と良く一致している。さらに、同図より2個の孔食が接する場合の孔食間のひずみは、図-5と比較すると半径4mm~5mmの単独な孔食のひずみと同程度であるがわかる。

一方、鉄筋延長方向に孔食が連続している場合、他の孔食に挟まれた孔食の底部に発生する応力集中は、単独の孔食の場合に比較して低下することが確認された。従って、鉄筋の延長方向に複数の孔食が連続している場合には、延長方向の影響は考慮に入れる必要がないものと考えられる。

4. 破壊力学による計算

4. 1 計算方法

腐食した異形鉄筋の疲労寿命を破壊力学によって推定するために、図-8に示すように鉄筋を「平均断面減少を伴った丸鋼と、複雑な形状をした腐食部の応力集中を考慮に入れるための孔食」にモデル化し、さらに孔食底部を含む平板にき裂が発生・進展するものとして計算を行った。

従って、き裂進展寿命の推定には式(5)に示す応力拡大係数を用いた。この式において、 $F_I(a/r)$ は「半無限平板の縁に孔食が存在し、その底部からき裂が進展する場合の応力拡大係数の補正係数」[4]であり、 $F_{II}(a/D)$ は「有限幅Dの板に片側き裂が存在する場合の補正係数」[5]で、それぞれ式(6)、式(7)で表すことができる。これらの式を用いて、式(8)によってき裂伝播寿命を推定した。

$$\Delta K = F_I\left(\frac{a}{r}\right) \times F_{II}\left(\frac{a}{D}\right) \times \left(\frac{\Delta F}{A}\right) \times \sqrt{\pi a} \quad (5)$$

$$F_I\left(\frac{a}{r}\right) = 1.12 \times \left(1 - \exp(-6.47 \times x^{0.65})\right) \quad (6)$$

$$F_{II}\left(\frac{a}{D}\right) = 6.4 \times \left(\frac{a}{D}\right)^2 - 0.22 \times \left(\frac{a}{D}\right) + 1.0 \quad (7)$$

$$N_p = \int_{a_i}^{a_{cr}} \frac{\delta a}{[C \times \Delta K^m]} \quad (8)$$

ここに
 ΔK : 応力拡大係数の変動範囲 ($\Delta K_{max} - \Delta K_{min}$)

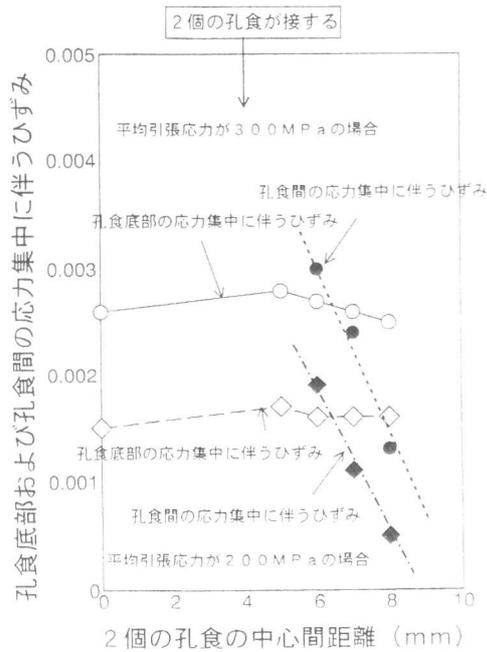


図-7 解析結果(φ 16mm 下側のみ 20% 腐食して孔食 2 個がある場合)

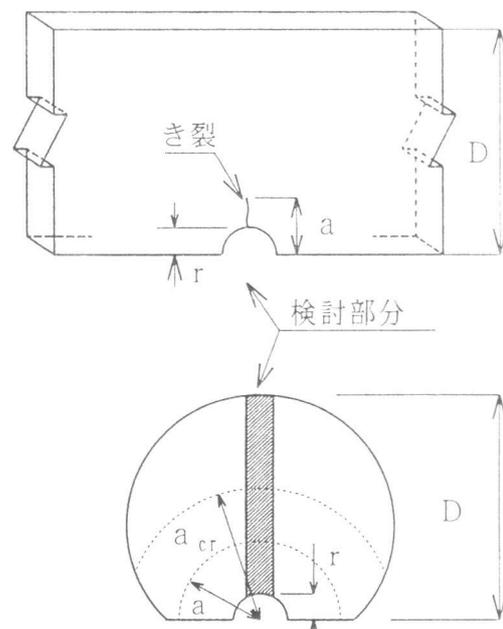


図-8 腐食した鉄筋のモデル化

- F_I : 半無限板の縁にある孔食底部のき裂に対する応力拡大係数の補正係数
- F_{II} : 有限幅の板の片側き裂に対する応力拡大係数の補正係数
- r : 孔食半径 (mm)
- a : 半円形き裂の深さ ($a_i=r+0.05$:初期き裂深さ、 a_{cr} :限界き裂深さ (mm))
- ΔF : 鉄筋に作用する軸力の変動範囲 (N)
- A : 腐食後の鉄筋断面積 (mm^2)
- N_p : 荷重の繰り返し回数
- C, m : 疲労き裂伝播速度を表す材料定数
- D : 公称直径, 平均腐食による断面厚さ (mm)

き裂発生寿命は、供試体の疲労寿命から鉄筋のき裂伝播寿命を差し引くことにより求めた。さらに、孔食底部の応力集中を考慮して[6]、式(9)、式(10)によって孔食底部の応力変動範囲を求め、き裂発生寿命との関係を整理した。

$$\Delta\sigma = \alpha \times \left(\frac{\Delta F}{A} \right) \quad (9)$$

ここに、応力集中率 α は次式によって表現される。

$$\alpha = \left(2 + \left(\frac{D-r}{D} \right)^3 \right) \times \left(\frac{D}{D-r} \right) \quad (10)$$

4. 2 計算に用いる定数の設定

式(8)を用いてき裂伝播寿命を計算する場合、初期き裂寸法が計算結果に大きな影響を与える。これまで、疲労の過程において発生する初期欠陥は 0.01~0.07mm の範囲にあることが指摘されており [7]、ここではき裂発生寿命の間に孔食底部に 0.05mm の欠陥が発生するものと仮定し、き裂伝播寿命の計算に用いる初期き裂寸法 (a_i) は「孔食半径 + 0.05 (mm)」とした。さらに、疲労破壊した鉄筋の断面測定において、き裂が進展していない部分の上限応力が、「降伏応力と引張強さの平均値」を超えると破断することが確認された (実験の上限応力は平均 $428\text{N}/\text{mm}^2$ であった)。従って、き裂限界深さ (a_{cr}) は残存断面積に発生する上限応力が、先の値となる値として計算を行った。一方、材料定数「 C, m 」は既往の文献等を参考に [8]、「 $C=8.5 \times 10^{-10}\text{N}/\text{mm}^{3/2}$, $m=3.0$ 」を用いた。これらの値を用いて、20%断面減少した D16mm の鉄筋のき裂伝播寿命を計算した例を図-9 に示す。

き裂発生寿命は、供試体の疲労寿命 (図-1、孔食 1 個の実験結果) からき裂伝播寿命 (図-9、孔食半径 2mm) を差し引いて算出し、応力集中を伴う孔食底部の応力変動範囲で整理すると図-10 のようになった。同図より、破壊発生確率が 5% となる曲線より求めたき裂発生寿命は式(11)のように示すことができる。従って、腐食鉄筋の断面諸元を測定すれば、式(11)によってき裂発生までの寿命を、式(8)を用いてき裂の進展から鉄筋破断までの寿命をそれぞれ想定することができる。

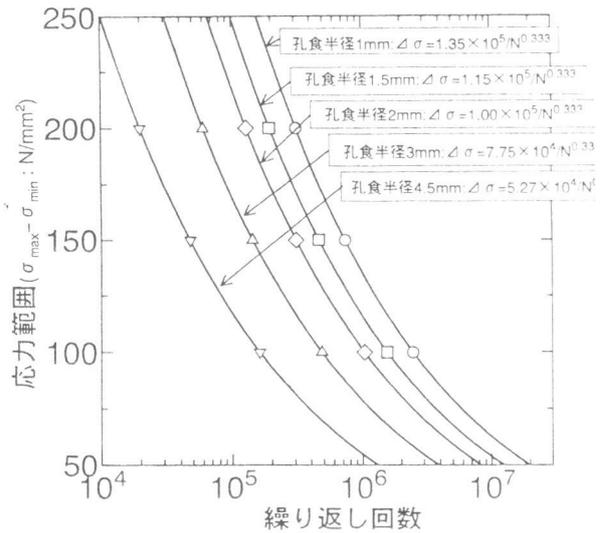


図-9 き裂伝播寿命の計算例

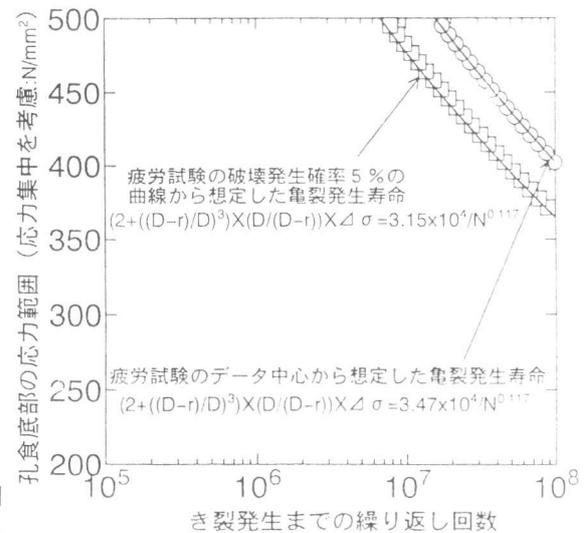


図-10 き裂発生寿命の近似

$$\left(2 + \left(\frac{D-r}{D}\right)^3\right) \times \left(\frac{D}{D-r}\right) \times \Delta\sigma = \frac{3.15 \times 10^4}{N^{0.117}} \quad (11)$$

4. 3 適用性評価

ここに示した手法を用いて計算される疲労寿命を、コンクリート標準示方書に示された健全な鉄筋の疲労寿命、あるいは鉄筋腐食を伴う既設床版の疲労寿命と比較した。

(1) 健全な異形鉄筋の疲労寿命

腐食のないD16の異形鉄筋の疲労寿命は、「半径1mmの初期欠陥を持ち公称断面積が同等な丸鋼」にモデル化して計算を行った。これらの計算結果をコンクリート標準示方書と比較して図-11に示す。破壊力学を用いて計算される疲労寿命の大部分は「き裂発生寿命」

であることがわかる。さらに、両者の疲労寿命の計算結果は比較的良く一致している。

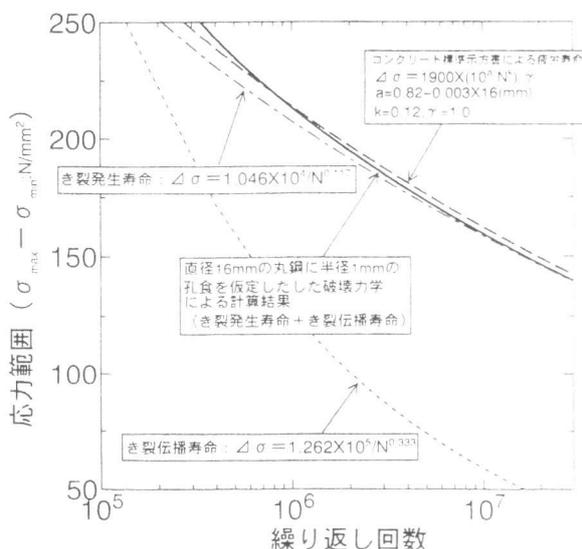
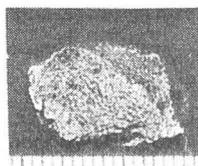


図-11 健全な鉄筋の疲労寿命 (D16)

(2) 劣化した床版の疲労寿命

ここでは、鉄筋に 220N/mm^2 の応力変動範囲を与える繰り返し荷重に対して 5.8×10^4 回で疲労破壊した床版を検討対象とした。破断した鉄筋の断面より「応力拡大係数」を想定し、線形破壊力学により疲労寿命を計算した結果を図-12に示す。この供試体の場合、腐食鉄筋の断面形状が大変複雑であり応力集中の程度が明確でないために、図-5より想定される安全側の値として、孔食半径4.5mmの単独な孔食を仮定すると「 4.9×10^4 回」となった。この計算結果は、疲労試験結果に比較的近い値であった。



図-12 腐食した鉄筋の疲労寿命の比較

5. 結論

本検討により、様々な腐食状態にある鉄筋の疲労寿命について、鉄筋断面を丸鋼と孔食にモデル化して破壊力学を用いて計算することにより、その概要を推定できることが確認された。

しかし、腐食した鉄筋のモデル化の方法については今後さらに検討が必要であろう。

[参考文献]

- [1] 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, 第9回コンクリート工学年次講演会論文集 9-2, pp. 281-286, 1987
- [2] 羽瀨貴士・守分敦郎・工藤文弘・広谷亮:劣化した鉄筋の力学特性に関する基礎的研究, 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集第5部, pp. 344-345, 1991
- [3] D. F. MOWBRAY and J. E. McCONNELLEE, Application of Finite Element Stress Analysis and Stress-Strain Properties in Determining Notch Fatigue Specimen Deformation and Life ASTM STP 519, May 1973
- [4] 石田誠:き裂の弾性解析と応力拡大係数, 破壊力学と材料強度講座-2, 培風館, p. 175, 1981. 3.
- [5] S. T. ロルフ・J. M. パーソム:構造物における破壊と疲労の防止, 培風館, pp. 226-227, 1981. 9.
- [6] 西田正孝:応力集中-増補版-, 森北出版, p. 262, 1978. 9.
- [7] C. MIKI, M. SAKANO, Y. TOYODA and T. YOSHIZAWA:Early Stage Propagation Behavior of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol. 7, No. 1, pp. 123-131, 1990. 4
- [8] 鋼構造疲労設計指針・同解説:日本鋼構造協会, 1993.