

論文 促進劣化させた鉄筋コンクリートはりの疲労性状

大屋戸 理明*1 長谷川 雅志*2 佐藤 勉*3

要旨：鉄筋が腐食した場合の既存鉄道構造物に対し、疲労に対する診断を行うための知見の収集を目的として、電食により鉄筋を腐食させたコンクリート部材の疲労載荷実験を行った。その結果、鉄筋が腐食したコンクリート部材のひび割れ性状は健全なコンクリート部材と異なること、腐食が進行するほど鉄筋コンクリート部材の疲労強度は低下し、腐食の程度が大きい場合は設計強度を下回る場合があることを確認した。

キーワード：腐食，電食，疲労，疲労強度

1. はじめに

鉄道における鉄筋コンクリート(RC)構造物の設計では、死荷重に対する列車荷重の割合が大きいことから、曲げ疲労に対する検討を行うことが規定されている¹⁾。一方、既存構造物の健全度診断を行う場合においても、設計と同様に曲げ疲労に対する検討が求められることになる。しかしながら、現在の鉄道構造物の保守管理基準²⁾には、RC 構造部材の使用材料が化学的に劣化(材料劣化)した場合についての疲労に対する検討方法は規定されていない。これは、材料劣化した RC 部材の疲労性能に関し、既往の研究^{3)~6)}が極めて少なく、構造物の健全度診断や寿命予測の際に必要な、材料劣化の進行の程度と力学的性能低下量との相関情報に関する検討が不足しているなどのためである。

本研究は、鉄道構造物の健全度診断のための、材料劣化と疲労性能の低下の関係を把握することを目的として、実験的手法により検討を行ったものである。なお、本研究は、RC 部材の疲労性状に影響を与える材料劣化のうち、鉄筋腐食に関連する項目を対象とした。

本研究では、鉄筋が腐食した試験体を実験に供する必要がある。RC 部材の鉄筋を腐食させるにはいくつかの手法があるが、本研究では、短期間に効率よく鉄筋を腐食させることができ

ること、腐食の程度が比較的容易に制御可能なこと、既往の実施例も多いことなどから、電食による促進劣化手法を採用することとした。

2. 実験の概要

2.1 試験体の概要

(1) 試験体の形状と材料

試験体の一覧を表 - 1 に、試験体の一般図を図 - 1 に示す。試験体は曲げ破壊モードの部材

表 - 1 試験体の一覧

| シリーズ | 引張鉄筋 | 想定繰返し回数 | 腐食の程度* | | | |
|------|-------|---------|--------|---------|---------|---------|
| | | | なし(0) | 小(0.35) | 中(0.84) | 大(1.33) |
| A | 2-D13 | 200 万回 | - | - | 3m-9 | - |
| | | 50 万回 | 3h-5 | 3s-5 | 3m-5 | 3t-5 |
| | | 15 万回 | - | - | 3m-1 | - |
| B | 1-D16 | 50 万回 | 6h-5 | 6s-5 | 6m-5 | 6t-5 |

*()内は電食時の積算電流量

(鉄筋単位表面積あたり(A・h/cm²))

<試験体名称の説明>

A B - C

└ 想定繰返し回数

1 = 15 万回, 5 = 50 万回, 9 = 200 万回

└ 鉄筋の腐食の程度

h = 腐食なし

s = 腐食の程度小(目標質量減少率 8%)

m = 腐食の程度中(目標質量減少率 15%)

t = 腐食の程度大(目標質量減少率 20%)

└ 引張鉄筋の径(3 = D13, 6 = D16)

*1 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 工博 (正会員)

計 10 体であり、引張鉄筋の径（本数）、想定繰返し回数および鉄筋の腐食の程度をパラメータとした。また、引張鉄筋のかぶりは 20mm とした。使用したコンクリートには、腐食を促進させるため、製作の際にあらかじめ練り混ぜ水に 10kg/m^3 の NaCl を溶解させている。硬化コンクリートの試験時圧縮強度を表 - 2 に示す。

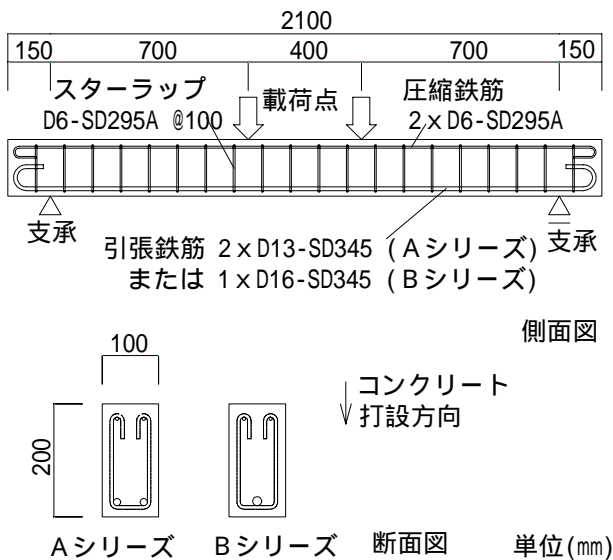


図 - 1 試験体一般図

表 - 2 硬化コンクリートの試験時圧縮強度

| | | | | |
|------------|------|------|------------|------|
| A シリ ーズ | 3h-5 | 3s-5 | 3m-1, 5, 9 | 3t-5 |
| | 29.8 | 30.8 | 42.3 | 34.3 |
| B シリ ーズ | 6h-5 | 6s-5 | 6m-5 | 6t-5 |
| | 35.4 | 43.9 | 45.0 | 45.1 |

単位：N/mm²

(2) 促進劣化方法

鉄筋は、経年による腐食を模擬し、電食により促進劣化させた。電食槽内への試験体設置方法および回路構成を図 - 2 に示す。電食は、試験体材齢が 28 日以上経過した後に開始した。電食槽の溶液は 3% 塩水とし、試験体上面から 2cm 下がりの高さまで満たして、引張鉄筋だけでなくスターラップも腐食するようにした。

本研究では通電による腐食量の制御を行う。電食による腐食量はかぶりの大小の影響を受け

るため、試験体のかぶりのばらつきは少なくする必要がる。本研究では、20mm 角のモルタルのスペーサー（本体に打ち込むコンクリートをウェットスクリーニングして製作）により鉄筋を固定し、試験体のかぶりを極力一定とした。

電食で目標とする腐食の程度は、鉄道 RC ラーメン高架橋の鉄筋の質量減少率（腐食による鉄筋質量減少量の健全鉄筋の質量に対する比）の調査結果⁷⁾を参考に、鉄筋腐食の程度の大きい場合の目標質量減少率を 20% と設定した。これから各試験体の目標質量減少率を決定し、通電量（積算電流量）を実績に基づいて表 - 1 の通り設定した。

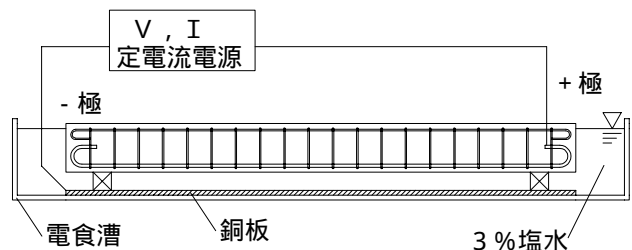


図 - 2 電食槽内への試験体設置方法

2.2 荷重試験の概要

繰返し荷重は 500kN 疲労試験機を使用し、図 - 1 に示す位置を荷重点および支承として行った。繰返し荷重における周波数は 1 ~ 2Hz とし、波形は sin 波とした。

荷重試験時の荷重のうち、下限荷重については、平面保持の仮定により求まる引張鉄筋の腐食による断面減少を考慮しない) 応力度の下限を 49N/mm^2 とした。上限荷重は、既往の文献に示された疲労強度算定式⁸⁾を用いて目標繰返し回数に対応する（腐食による断面減少を考慮しない）上限応力度を求め、試験状況を勘案して設定した。

疲労試験では、あらかじめ設定した回数に達する毎に繰返し荷重を一時停止して、荷重、たわみ、ひび割れ幅、ひずみ等の物性値を計測しながら、繰返し荷重における最大荷重まで静的に荷重した。計測項目のうち、引張鉄筋に

沿った腐食ひび割れ（軸方向ひび割れ）の幅の計測位置と、引張鉄筋ひずみの計測位置を図-3に示す。なお、鉄筋ひずみの計測に用いるひずみゲージは、電食による損傷を最小限とするため、電食が終了してから貼付した（試験体の下方からかぶりコンクリートを1~2cm角程度穿孔し貼付）。また、疲労試験終了後、試験体の鉄筋をはつり出し、JCI-SCIに準拠した方法により、引張鉄筋の質量減少率を測定した。

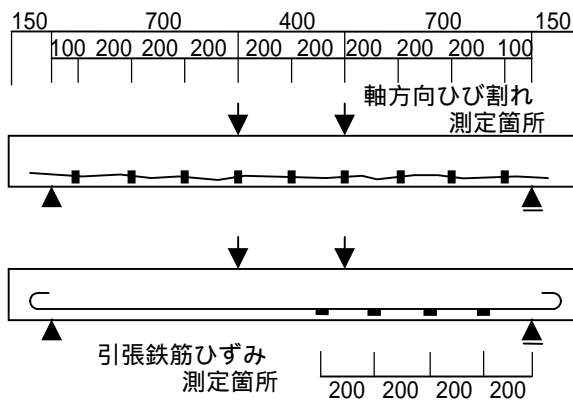


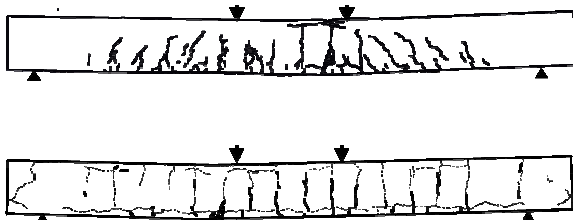
図-3 軸方向ひび割れ幅と鉄筋ひずみの測定位置

3. 実験結果と考察

3.1 ひび割れ性状と繰り返し载荷の影響

疲労破壊後のひび割れ状況を図-4に示す。

腐食した試験体では、図-4の位置のように、下縁（引張側）で発生した曲げひび割れが引張鉄筋に沿った腐食ひび割れと交わる位置から上（圧縮側）方向へ進展していない場合がある。



実線は载荷によるひび割れを、破線は電食によるひび割れを示す。

図-4 疲労破壊後のひび割れ状況の例
(上:健全試験体 3h-5, 下:腐食試験体 3s-5)

また、曲げひび割れがスターラップに沿って入っており、健全な試験体のように斜めに進展するものが少ない。このように、電食した試験体では载荷を開始する以前に腐食ひび割れが存在するため、健全な試験体と違うひび割れ性状となることが確認できる。

軸方向ひび割れ幅（電食により発生したひび割れの幅を初期値としている）の繰り返し载荷に伴う変動の例を図-5に示す。繰り返し载荷の増加に伴う軸方向ひび割れ幅の進展が確認でき、部位によってはその程度が大きい。軸方向ひび割れの開口はその位置の付着力を局所的に低下させ、鉄筋のひずみ分布を変化させる。その結果、引張鉄筋の最大ひずみを生じる位置が変化すれば、部材の疲労寿命に影響を与えることもありえる。

一方、繰り返し载荷に伴う鉄筋ひずみの変動の例を示した図-6によれば、鉄筋ひずみの変動は図-5におけるひび割れ幅の変動ほどには顕著ではなく、また測定位置相互のひずみの大小関係も载荷初期と破断直前で大差ない。このことから、たとえ軸方向ひび割れが開口して付着力が低下することがあっても、その影響は局所的な範囲にとどまっており、引張鉄筋のひずみは疲労試験の期間中で概ね同様な分布を保持

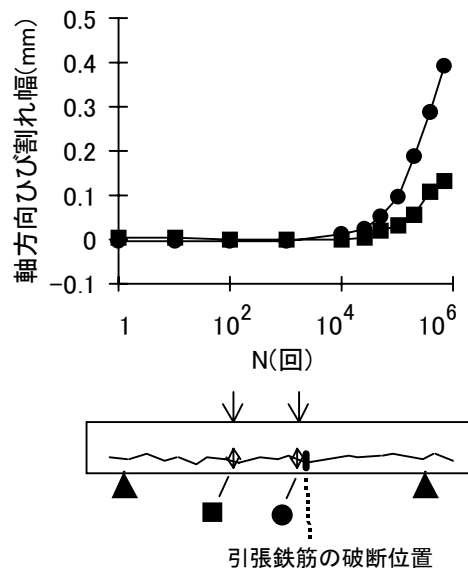


図-5 軸方向ひび割れ幅の変動(3s-5 試験体)

しているとみなしてよいと思われる。すなわち、今回の実験においては、ある部位では腐食によって付着力が低下する可能性はあるものの、それは部材の疲労強度に大きな影響を与えなかったと考えられる。なお、今回試みた鉄筋ひずみの計測方法では作業上の困難もあり、一部の試験体で工学的に有意でないと見られる測定結果となったため、今後鉄筋ひずみについては追加検証する必要もある。

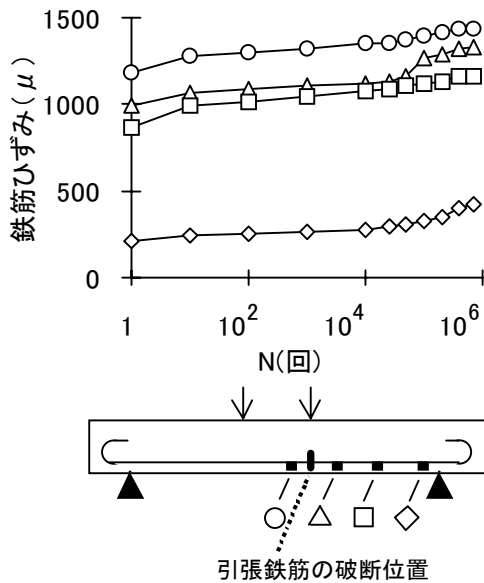


図-6 鉄筋ひずみの変動(3s-5 試験体)

3.2 疲労強度

試験結果の総括を表-3に示す。ここで、疲労強度実験値 f_{sre} は、疲労試験器の繰り返し荷重から平面保持の仮定により求めた鉄筋応力振幅であり、疲労強度算定値 f_{sr} は繰り返し回数試験結果から算定式により求めた疲労強度である。実験値・算定値ともに、腐食による鉄筋断面の減少は考慮していない。電食したすべての試験体の疲労強度実験値 f_{sre} は算定値 f_{sr} を下回り、電食時における積算電流量の増加に伴い疲労強度残存率 f_{sre}/f_{sr} が低下することが確認できる。

疲労強度と繰り返し回数の関係(S-N曲線)を図-7に示す。図中には算定式⁸⁾により求めた関係(算定値)を実線で、設計標準¹⁾で用いられている式から求めた関係(設計値)を破

線で示す。図より、腐食した試験体は算定値を下回ること、腐食の程度が大きくなるほど疲労強度が低下し、腐食の程度が大きい試験体は設計値を下回ることが確認できる。

表-3 試験結果の総括

| 試験体名 | 繰り返し回数 | f_{sre} (N/mm ²) | f_{sre}/f_{sr} | 積算電流量(A・hr) | 質量減少率 c |
|------|----------|--------------------------------|------------------|-------------|-----------|
| 3h-5 | 721242 | 291 | 1.04 | - | - |
| 3s-5 | 732615 | 204 | 0.73 | 1788 | 0.187 |
| 3m-1 | 3030000+ | 178 | 0.75 | 4283 | 0.175 |
| 3m-5 | 751630 | 204 | 0.73 | | 0.0969 |
| 3m-9 | 36054 | 236 | 0.58 | | 0.159 |
| 3t-5 | 25225 | 125 | 0.30 | 6778 | 0.375 |
| 6h-5 | 426613 | 287 | 0.97 | - | - |
| 6s-5 | 1626981 | 215 | 0.85 | 1548 | 0.0708 |
| 6m-5 | 1943221 | 213 | 0.86 | 3709 | 0.0869 |
| 6t-5 | 55638 | 213 | 0.56 | 5870 | 0.209 |

+ : 疲労破断に至らず f_{sre}/f_{sr} : 疲労強度残存率
 f_{sr}, f_{sre} : 疲労強度の算定値, 実験値
 (腐食による断面減少は考慮していない)
 Aシリーズの質量減少率 c は表裏鉄筋の平均値

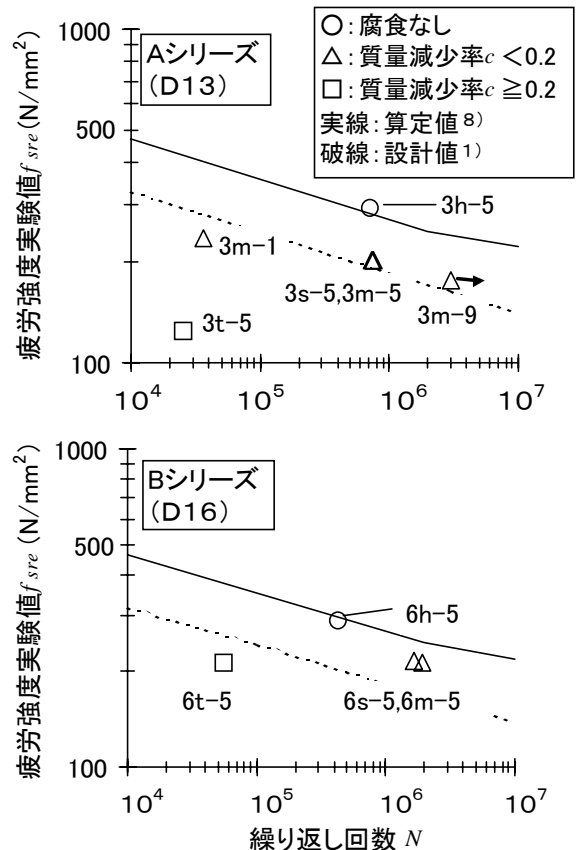


図-7 S-N曲線

疲労強度残存率を引張鉄筋の質量減少率と比較して図 - 8 に、質量減少を考慮した疲労強度残存率 f_{sre}' / f_{sr} を引張鉄筋の質量減少率と比較して図 - 9 に示す。ここで、質量減少を考慮した疲労強度残存率 f_{sre}' / f_{sr} とは、疲労強度残存率 f_{sre} / f_{sr} を質量の残存割合 $(1 - c)$ で除した値である。両図とも、質量減少の進行に概ね比例して疲労強度残存率が低下している。また、図 - 9 によると、質量減少率の増加よりも疲労強度残存率の減少割合のほうが大きい。これは、ある区間の平均的な断面減少を表す質量減少率よりも、局部的な腐食の進行分だけ強度が低下するためと考えられる。

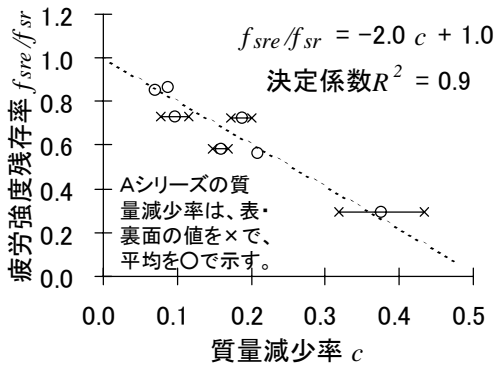


図-8 疲労強度残存率

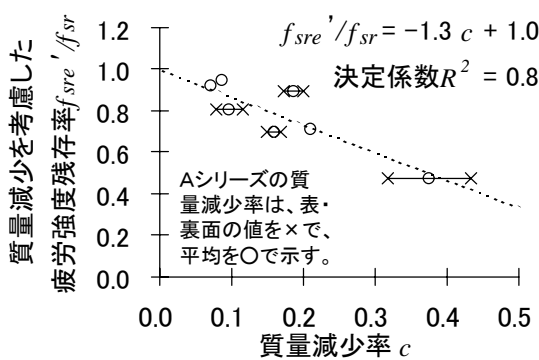


図-9 質量減少を考慮した疲労強度残存率

4. 既存構造物の照査

以上の知見を元に、実構造物の診断・評価時における、疲労に対する照査方法を考察する。

ここでは、設計での照査手法¹⁾を用い、これ

に腐食による疲労強度の低下を加味することとした。試算のフローを図 - 10 に示す。この手法では、鉄筋の質量減少量の経年変化が安全側に設定できることを前提に、照査時点での1年間は質量減少率 c が一定であるとして、図 - 8 の式により疲労強度残存率を求める。これにより、設計変動応力度 r_d が繰り返し作用する場合の疲労寿命（繰り返し回数 N_t ）を計算し、照査時経年 t 年での1年間に進行する疲労損傷を求め、Miner 則が適用できると仮定して累積疲労損傷が1に達するまで疲労損傷を累積する。

この手法により、ある単純な条件下における疲労寿命の予測を試みた。試算結果を図 - 11 に示す。質量減少率の経年変化（腐食速度）は、塩水の散水により腐食を促進させた長期暴露試験結果⁹⁾の1/3程度（100年間で全断面の1/3が断面欠損、図 - 11 参照）を仮定した。この結果によると、腐食が進行した場合には、腐食なしの場合よりも疲労損傷がかなり早く累積し、経年80年程度で疲労破壊に至ることになる。

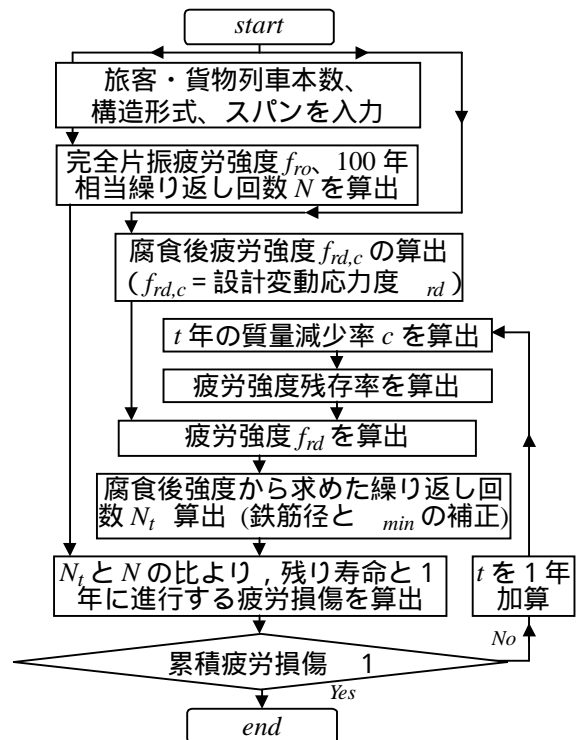
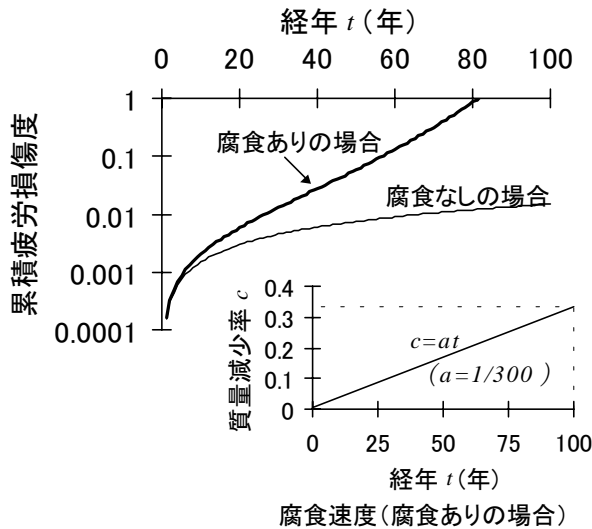


図-10 疲労寿命予測(試算)のフロー



(計算条件)

- ・列車本数 = 旅客列車, 貨物列車とも 100 本/日
- ・構造形式 = 単純梁, $L = 1.0$ m
- ・照査部位 = スパン中央
- ・鉄筋 D19, $r_1 = r_2 = 1.0$, $r_d = 95\text{N/mm}^2$

図-11 疲労寿命予測(試算結果)

5. まとめ

電食により鉄筋を腐食させた試験体を用いた疲労試験の結果, 以下の事柄を確認した。

- (1) 鉄筋が腐食したコンクリート部材のひび割れは, 腐食によるひび割れの存在のため, 健全なコンクリート部材と異なる性状を示す。
- (2) 腐食によって鉄筋とコンクリートとの付着力が局部的に低下する可能性は大きい, 必ずしも疲労性状に大きな影響を与えない。
- (3) RC 部材の疲労強度は腐食の進行に概ね比例して低下し, 腐食の程度が大きい場合は設計強度を下回る場合がある。
- (4) 腐食による引張鉄筋の質量減少率と疲労強度の関係を示し, 構造物の試算を行った。

今後は, これらの結果を実構造物の診断に適用するため, 腐食性状等について実構造物や暴露試験体と比較・検討する予定である。

謝辞

本研究は, 運輸施設整備事業団「運輸分野における基礎的研究推進制度」によるものである。また, 本研究を実施するにあたり(株)間組技

術研究所村上祐治氏と, 日本コンサルタント(株)大沢勉氏に御協力・御指導を頂いた。関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 運輸省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, pp.123 ~ 130, 1999.10
- 2) 鉄道総合技術研究所編：建造物保守管理の標準・同解説 コンクリート構造, pp.118 ~ 119, 1987.9
- 3) 山住克巳, 宮本征夫, 佐藤勉：鉄筋を腐食させた RC はりの劣化状態と耐力について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.12, No.1, pp.557 ~ 562, 1990.6
- 4) 片山修一, 丸山久一, 木村哲士：鉄筋が腐食した RC 梁供試体の耐荷性状, 第 49 回セメント技術大会講演集, pp.880 ~ 885, 1995
- 5) 中田泰広, 丸山久一, 橋本親典, 清水敬二：鉄筋腐食によるひびわれが梁供試体の耐荷性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, 12-1, pp.551 ~ 556, 1990.6
- 6) 武若耕司, 松本進, 重松真：RC 部材の疲労特性に及ぼす鉄筋腐食の影響に関する検討, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 1986
- 7) 谷村幸裕, 大屋戸理明, 泉並良二, 木村元哉：実構造物から採取した腐食鉄筋の疲労性状, 土木学会第 55 回年次学術講演会講演概要集, V-357, 2000.9
- 8) 二羽淳一郎, 前田詔一, 岡村甫：異形鉄筋の疲労強度算定式, 土木学会論文集, 第 354 号, V-2, pp.73 ~ 79, 1985.2
- 9) 大屋戸理明, 西脇敬一, 長谷川雅志, 永岡高：長期暴露した鉄筋コンクリート梁の劣化性状と耐力, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.23, 2001.6