

論文 鉄筋が腐食した RC 梁の疲労性状

西脇 敬一^{*1}・大屋戸 理明^{*2}・長谷川 雅志^{*3}・永岡 高^{*4}

要旨：RC 梁部材において、鉄筋が腐食した場合の曲げ疲労性能を定量的に評価することを目的とし、約 13 年間の暴露で鉄筋を腐食させた RC 梁部材を用いて、曲げ疲労試験を行った。

その結果、鉄筋が腐食した RC 梁の曲げ疲労強度は、鉄筋の平均的な腐食量を表す質量減少率により概ね評価が可能であること等が明らかとなった。

キーワード：暴露試験，鉄筋腐食，疲労強度，質量減少率

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化が顕在化した場合には、現時点での構造物の性能低下の程度を定量的に把握し、補修や補強の判断を行うことが必要となる。また、現時点で補修や補強の必要がないと判断される場合、あるいは劣化が顕在化していない場合においても、劣化進行予測および性能低下予測を行うことは、将来、適切かつ経済的な補修や補強方法を選定する上で重要である。

コンクリート構造物の劣化の中で、塩害や中性化に伴う鉄筋の腐食は、耐荷性能に大きな影響を及ぼすものと考えられる。筆者らは、過去に鉄筋の腐食が、RC 梁の静的曲げ耐力に与える影響を把握するため、RC 梁部材を用いて各種試験を実施した。その結果、鉄筋の腐食量の増加に伴い、梁の曲げ耐力は低下するものの、質量減少率で 14% 程度の著しい腐食であっても、設計上の耐力を有していること、および質量減少率によって、その低下量を定量評価できることを確認している¹⁾。

一方、疲労性能に関しては、電食により鉄筋の腐食を促進させた RC 梁による研究²⁾はいくつか見られるものの、実構造物に近い暴露によるものは非常に少ない。

また、鉄筋が腐食した RC 梁の曲げ疲労強度

は、鉄筋の疲労強度に支配されるとする考えもあるが、検証は十分でない³⁾。

そこで、本研究は、塩水の散水および長期間の暴露によって、鉄筋を腐食させた RC 梁、およびこれらの RC 梁から採取した鉄筋を用い、疲労試験を実施し、鉄筋の腐食が RC 梁の疲労性状に与える影響について検討したものである。

2. 試験概要

2.1 試験体および暴露方法

RC 梁の試験体は、図 - 1 に示す形状寸法の 3 体とした。コンクリートの配合は、文献⁴⁾と同じである。試験体は、過去の研究⁴⁾に用いた RC 梁と同時期に製作したものであり、腐食を促進させるため、暴露開始後 17 ヶ月間は塩水の散水を行っており、暴露中は、図 - 2 に示すように 2 体の RC 梁を対にした状態で静置して

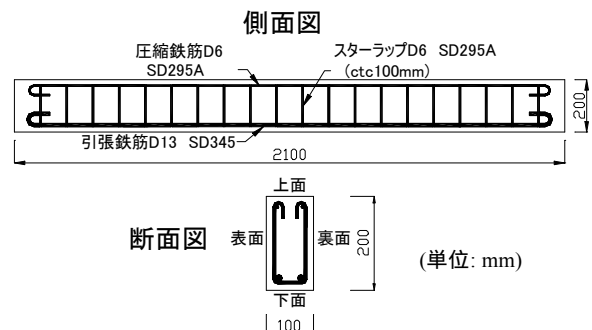


図 - 1 RC 梁の形状寸法

*1 鉄建建設(株)技術研究所 土木技術開発グループ (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 副主任研究員 工修 (正会員)

*3 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 研究員 (正会員)

*4 鉄建建設(株)エンジニアリング本部

いた。塩水の散水面を表面それと反対面を裏面と称す。暴露開始から疲労試験実施までの暴露期間は13年である。

鉄筋単体の試験体は、疲労試験後のRC梁、および暴露12年の時点で静的曲げ試験を行った同様のRC梁¹⁾から、載荷の影響が小さい部位の400mm程度の引張鉄筋を各RC梁で1本、計6本を採取した。なお、試験体名は、各々表-1に示すように定めた。

2.2 劣化調査と疲労試験の概要

2.2.1 劣化調査

(1) 外観観察

疲労試験の前に外観観察によりRC梁の試験体全体の劣化状態を確認した。

(2) 鉄筋腐食に影響を及ぼす要因

鉄筋の腐食に影響を及ぼす中性化および塩化物イオン量を調べた。

中性化深さは、疲労試験後にRC梁の試験体を4断面で切断し、フェノールフタレイン法により10mmピッチに測定した。

塩化物イオン量は、疲労試験後にRC梁試験体のせん断スパンから、100×50mmの矩形で表面から裏面までの深さ100mmの試料を採取し、表面と裏面の表層部分を10mmに内部を20mm毎に切断し、【JCI-SC4 硬化コンクリートに含まれる塩分の分析方法】に準拠し、深さ方向の全塩化物イオン量と可溶性塩化物イオン量を調べた。

(3) 鉄筋の腐食量

鉄筋の腐食量は、【JCI-SC1 コンクリート中の鋼材の評価方法】にもとづいて、引張鉄筋の質量減少率を求めた。

RC梁の試験体では、疲労試験後に等曲げモーメント区間の引張鉄筋を採取し、また鉄筋の試験体では、試験体毎に質量減少率を求めた。

2.2.2 疲労試験

RC梁の疲労試験(以下:RC梁試験と称す)は、**図-3**に示す位置を載荷点および支承位置とし、500kN疲労試験機を用いて、繰り返し速度2Hzのsin波で載荷を行った。所定の回数に達した

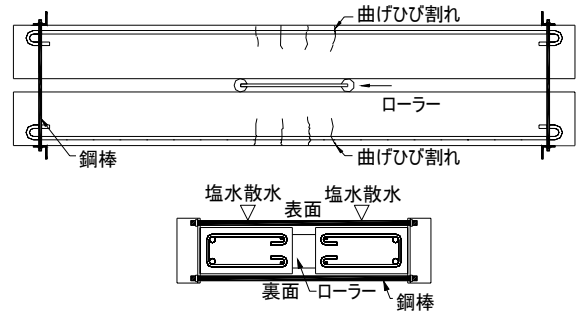


図-2 暴露時の状況(上:平面図,下:断面図)

表-1 試験体名

試験体の種類	試験体名	備考
RC梁	梁FA	暴露13年の100×200×2100mmの矩形梁(図-1)
	梁FB	
	梁FC	
鉄筋	鉄筋FA	梁FAから採取した引張鉄筋
	鉄筋FB	梁FBから採取した引張鉄筋
	鉄筋FC	梁FCから採取した引張鉄筋
	鉄筋A	静的曲げ試験を行った梁(試験体A) ¹⁾ から採取した引張鉄筋
	鉄筋B	静的曲げ試験を行った梁(試験体B) ¹⁾ から採取した引張鉄筋
	鉄筋C	静的曲げ試験を行った梁(試験体C) ¹⁾ から採取した引張鉄筋

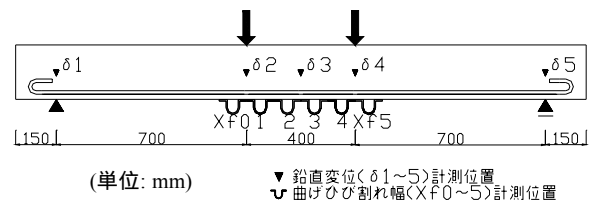


図-3 載荷および計測位置

表-2 疲労試験における載荷応力

	試験体	載荷条件		
		最大応力 σ_{max} (N/mm ²)	応力振幅 $\sigma_{max}-\sigma_{min}$ (N/mm ²)	
RC梁試験	梁FA	(1)	163.7	114.7
		(2)	227.1	178.1
	梁FB	(1)	267.2	218.2
	梁FC	(1)	255.6	206.6
鉄筋試験	鉄筋FA	(1)	135.7	86.7
		(2)	181.0	132.0
	鉄筋FB	(1)	135.7	86.7
		(2)	149.0	100.0
		(3)	181.0	132.0
	鉄筋FC	(1)	135.7	86.7
	鉄筋A	(1)	149.0	100.0
	鉄筋B	(1)	213.0	164.0
	鉄筋C	(1)	261.0	212.0

時点で静的載荷を行い、**図-3**に示す位置で鉛直変位と曲げひび割れ幅を計測した。

鉄筋単体の疲労試験(以下：鉄筋試験と称す)は、100kN 疲労試験機を用いて、繰り返し速度10Hz で载荷を行った。

载荷応力は、RC 梁、鉄筋ともに鉄筋に作用する最小応力を 49N/mm^2 とし、最大応力を表 - 2 に示すように変化させた。梁 FA、鉄筋 FA および鉄筋 FB では、最初に与えた応力において、疲労破壊を生じなかったため、応力を増加させ、疲労破壊するまで試験を行った。なお、応力は、荷重を公称断面積で除して算出しており、腐食の影響を考慮していない見かけの値である。

3. 試験結果

3.1 劣化調査

(1) 外観観察

RC 梁試験体の腐食によるひび割れと錆汁の状況の一例を写真 - 1 に示す。引張鉄筋、圧縮鉄筋およびスターラップに沿って、ひび割れが多数発生しており、スターラップの位置では多量の錆汁が見られる。引張鉄筋の腐食に伴うひび割れ幅は、最大で 1.3mm 程度である。

(2) 鉄筋腐食に影響を及ぼす要因

中性化深さの測定結果を表 - 3 に示す。中性化は、2.5~7.7mm の範囲にあり、それほど進行していないことが確認できる。中性化残りは、最も小さい梁 FA でも 13mm 程度である。

全塩化物イオン量の測定結果を図 - 4 に示す。最大部分の全塩化物イオン量は、コンクリート重量に対して、0.219~0.234%であった。これをコンクリート中の塩化物イオン量に換算すると 5kg/m^3 程度であり、多量の塩分が確認できる。

深さ方向の全塩化物イオン量に対する可溶性塩化物イオン量の割合を図 - 5 に示す。表面と裏面の表層部分では、可溶性塩化物イオン量の割合が 70%程度と高く、中性化領域の塩化物イオンが影響を受けるとされる既往の研究結果⁵⁾と同様の傾向が伺える。

(3) 鉄筋の腐食量

質量減少率の測定結果を表 - 4 に示す。RC 梁試験体の質量減少率は、主筋 2 本の平均値と

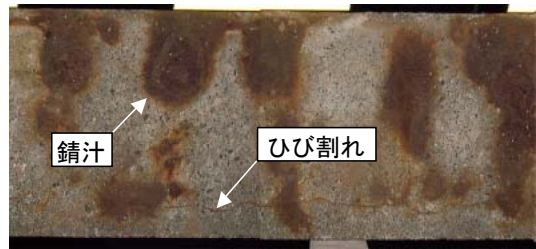


写真 - 1 ひび割れと錆汁の状況 (梁 FB 裏面)

表 - 3 中性化深さ測定結果

試験体	平均の中性化深さ(mm)			
	表面	裏面	上面	下面
梁FA	7.2	7.7	7.2	5.8
梁FB	4.1	3.8	3.7	3.0
梁FC	3.7	3.7	5.1	2.5

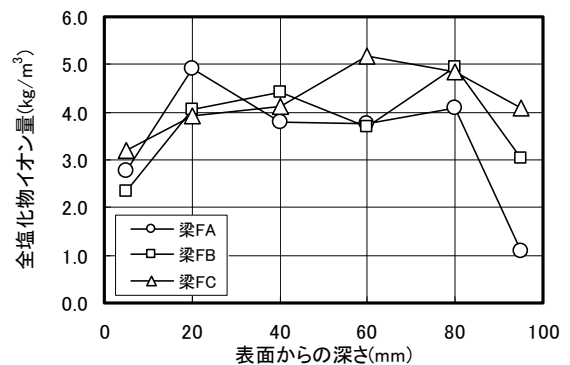


図 - 4 表面からの深さと全塩化物イオン量

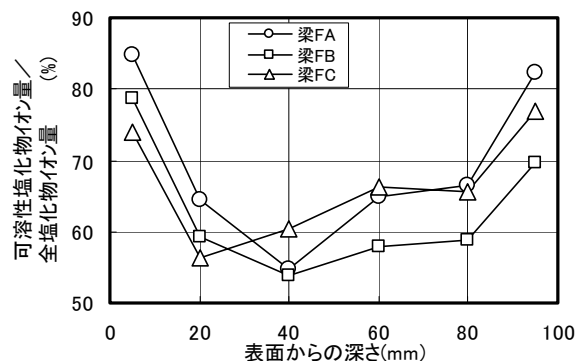


図 - 5 表面からの深さと全塩化物イオン量に対する可溶性塩化物イオン量の割合

表 - 4 質量減少率

試験体	質量減少率 (%)
梁FA	19.6
梁FB	15.8
梁FC	17.0
鉄筋FA	20.8
鉄筋FB	15.6
鉄筋FC	12.7
鉄筋A	13.7
鉄筋B	12.9
鉄筋C	11.0



写真 - 2 引張鉄筋の腐食状況 (梁 FA)

した。錆を除去した後の鉄筋の腐食状況の例を写真 - 2 に示す。著しい孔食を有していることが確認でき、中性化および塩化物イオン量の結果を併せると、本試験体における鉄筋腐食の主原因は、塩化物イオンによるものと推察される。

3.2 疲労試験

(1) 試験および破壊状況

RC 梁試験の試験状況を写真 - 3 に示す。

RC 梁は、かぶりコンクリートに大きな変状も認められず、3 体とも引張鉄筋の疲労破断により破壊に至った。RC 梁試験および鉄筋試験における鉄筋破断までの繰り返し回数は、各々表 - 5 に示すとおりである。

試験後の RC 梁のひび割れ状況の例(梁 FC)を写真 - 4 に示す。点線は、腐食に伴うひび割れ、白線は、繰り返し载荷によるひび割れ、黒線は、疲労破壊時に確認できたひび割れである。これより、ひび割れは等曲げモーメント区間に集中し、せん断スパンにほとんど発生していないこと、および引張鉄筋を境に不連続なひび割れが見られ、健全な RC 梁部材とは、異なる点が観察される。

(2) 繰り返し载荷による RC 梁の変状

RC 梁試験における繰り返し回数 N と変位 δ の関係を図 - 6 に、繰り返し回数 N と鉄筋破断位置付近の曲げひび割れ幅の関係を図 - 7 に示す。梁 FA では、载荷応力を増加(表 - 2 の(2))してからの繰り返し回数と変位・曲げひび割れ幅を示している。

変位および曲げひび割れ幅は、繰り返し回数の増加に伴い、大きくなる傾向がある。特に、繰り返し回数の少ない段階で、その程度が大きく、通常の RC 梁と同様の傾向⁶⁾が伺える。また、梁 FB では、破壊直前の繰り返し回数 ($N=200,000 \sim 400,000$) で変位、曲げひび割れともに急激な変化が見られる。これは、梁 FB の最後の静的载荷・計測が疲労破壊 ($N=40,200$) の直前であったのに対し、梁 FA と梁 FC のそれは、疲労破壊の直前ではなかったことによると考えられる。



写真 - 3 RC 梁試験状況

表 - 5 疲労試験における繰り返し回数

	試験体	载荷応力	繰り返し回数 N	破壊状況
RC梁 試験	梁FA	(1)	6,230,000	疲労破壊せず
		(2)	326,751	引張鉄筋破断
	梁FB	(1)	402,347	引張鉄筋破断
	梁FC	(1)	432,216	引張鉄筋破断
鉄筋 試験	鉄筋FA	(1)	10,000,000	破断せず
		(2)	99,600	破断
	鉄筋FB	(1)	10,000,000	破断せず
		(2)	10,000,000	破断せず
		(3)	937,902	破断
	鉄筋FC	(1)	4,639,332	破断
	鉄筋A	(1)	606,724	破断
	鉄筋B	(1)	323,064	破断
	鉄筋C	(1)	191,458	破断

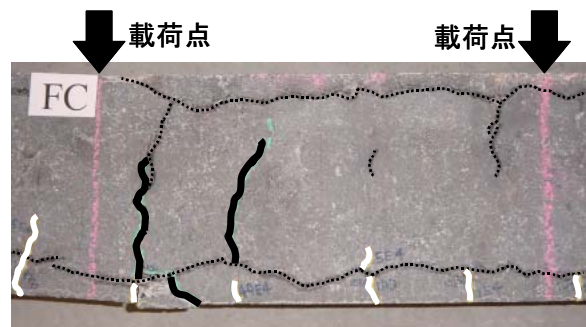


写真 - 4 疲労試験後のひび割れ状況

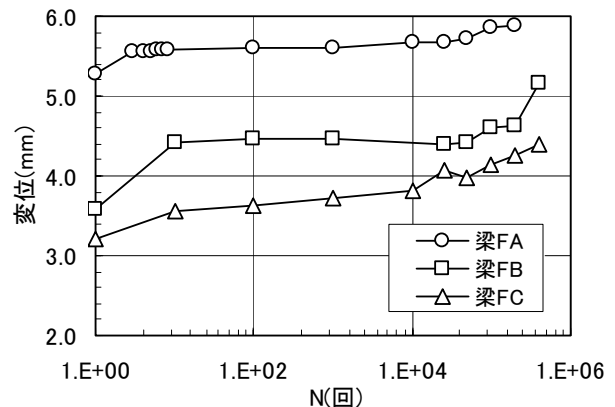


図 - 6 繰り返し回数と変位(δ)の関係

(3) 疲労強度

疲労強度(疲労試験における鉄筋の見かけの応力振幅)と繰り返し回数との関係(S-N 曲線)を図 - 8 に示す。図中には、同様の RC 梁を用いて暴露 20 ヶ月時(引張鉄筋の質量減少率 2.6 ~ 3.5%)に行った結果⁴⁾, 二羽らの式から求まる異形鉄筋の疲労強度算定値⁷⁾およびコンクリート標準示方書に示される異形鉄筋の疲労強度設計値を併記している。

暴露 20 ヶ月時の疲労強度は、二羽らの式から求まる疲労強度算定値を下回るものの、設計値を以上の強度を十分に保有していた。しかし、今回の試験では、鉄筋の腐食量が 13 年の暴露により質量減少率で最大 20%程度まで腐食が進行しており、疲労強度は設計値を下回っていることが確認できる。

次に鉄筋が腐食した RC 梁の曲げ疲労強度の定量評価を試みる。質量減少率と見かけの疲労強度残存率の関係を図 - 9 に示す。見かけの疲労強度残存率は、二羽らの式から求まる健全な鉄筋の疲労強度算定値に対する率として算出した。また、荷重応力を変化させた試験体(梁 FA, 鉄筋 FA, 鉄筋 FB)では、コンクリート標準示方書に示される線形累積疲労損傷則を適用し、全ての荷重応力と繰り返し回数を考慮し、見かけの疲労強度残存率を求めた。

RC 梁の見かけの疲労強度残存率は、引張鉄筋の質量減少率の増加に伴い、低下することが確認できる。これより、データ数は少ないものの、今回の試験の範囲では、RC 梁の疲労強度は、概ね以下の式(1)により関係づけられる。

見かけの疲労強度残存率

$$= 1 - 2.10 \times \text{質量減少率} \quad (1)$$

一方、鉄筋の見かけの疲労強度残存率は、質量減少率の増加に伴い、減少する傾向は見られるものの、RC 梁の疲労強度と比較するとばらつきが大きい。写真 - 5 に疲労破断位置における鉄筋の断面形状の例(鉄筋 A)を示す。この

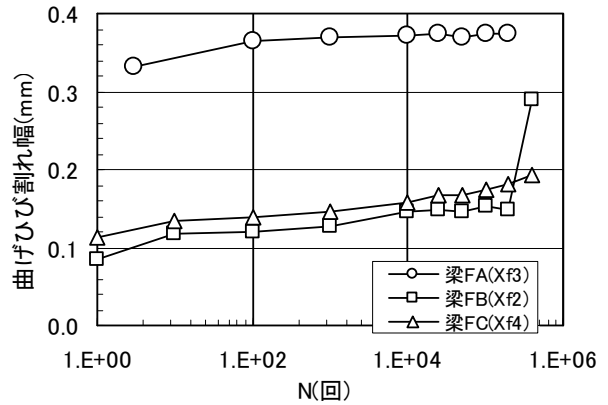


図 - 7 繰り返し回数と
曲げひび割れ幅の関係

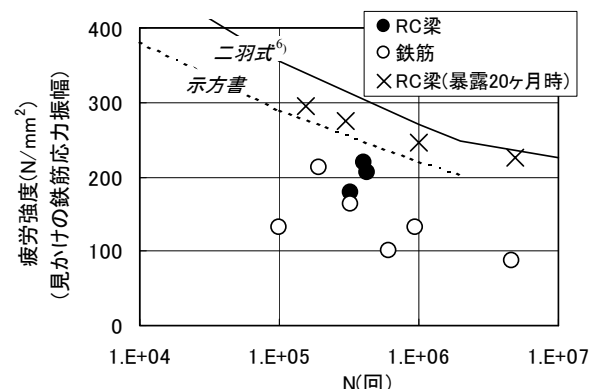


図 - 8 S-N 曲線

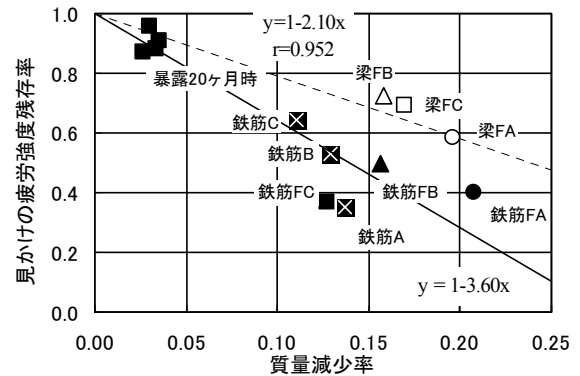


図 - 9 質量減少率と
見かけの疲労強度残存率



写真 - 5 疲労破断位置における
鉄筋断面形状(鉄筋 A)

ように、著しい孔食を有する断面で疲労破断していることが確認できる。

孔食を有する場合の鉄筋の疲労強度に関して、羽瀨ら⁸⁾および守分ら⁹⁾は、孔食部で応力集中を生じ、疲労強度が明らかに低下することを示している。これより、鉄筋試験では、孔食による応力集中の影響を顕著に受けたと考えられる。一方、RC 梁では、孔食位置で疲労破壊したにも関わらず、鉄筋よりも疲労強度の低下が小さい。これは、RC 梁ではコンクリートが引張応力を受け持つこと、付着が均一でないこと、および鉄筋が複数あることなどにより、鉄筋単体の場合よりも疲労に対して安全側となりうることを示唆する。しかし、より安全側に RC 梁の疲労強度の評価を行うには、鉄筋の疲労強度で評価するのが望ましいと思われる。

4. まとめ

長期間の暴露により、鉄筋を腐食させた RC 梁、およびこれらから採取した鉄筋により、疲労試験を実施した結果、以下の事柄が確認できた。

- RC 梁部材の疲労強度は、鉄筋の平均的な腐食量を表す質量減少率により、概ね評価可能である。
- 鉄筋の疲労強度は、孔食が存在する場合、応力集中による影響を受けやすく、腐食量が同程度であっても、RC 梁部材より疲労強度は低下する可能性がある。

5. おわりに

本研究では、実構造物により近い暴露による試験体で疲労試験を行ったものの、特に RC 梁では試験体数も少なく、今後さらにデータを蓄積する必要があると考えている。また、RC 梁では、疲労破壊する直前に変位や曲げひび割れ幅に急激な変化を生じたものがあり、これらの変状より疲労破壊を事前に予測できる可能性もあるため、これについても今後の検討課題としたい。

謝辞 本研究を進めるにあたり、前回研究を行った佐藤勉、宮本征夫の両氏、ならびに明星大、来海豊助教授(前、(財)鉄道総合技術研究所)にご助言をいただきました。感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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集，Vol.23，No.3，pp.1315-1320，2001.9
- 2) 例えば，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
- 3) コンクリート構造物のリハビリテーション委員会報告書，コンクリート工学協会，pp.87-91，1998.10
- 4) 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
- 5) 例えば，岸谷孝一，小林一輔，榎野紀元，宇野祐一：塩化物を含むコンクリート中における鉄筋腐食と中性化の関係，コンクリート工学論文集，Vol.2，No.1，pp.77-83，1991.1
- 6) 例えば，藤田嘉夫，西堀忠信：繰りかえし荷重をうける鉄筋コンクリートげたの変形に関する研究，コンクリートジャーナル，Vol.9，No.5，1971.5
- 7) 二羽淳一郎，前田詣一，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
- 8) 羽瀨貴士，守分敦朗，工藤文弘，広谷亮：劣化した鉄筋の力学特性に関する基礎研究，土木学会第 46 回年次学術講演会概要集，第 V 部門，pp. 344-345，1991.9
- 9) 守分敦朗，長瀧重義，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. 1529-1534，1996.6