論文　繰返し荷重を受ける腐食した鉄筋の付着挙動に関する研究

三木　朋広[*1]・塩見　拓也[*2]

要旨：地震時などに発生する繰返し荷重は，鉄筋とコンクリート間の付着挙動に大きく影響を与える。本論文では，繰返し荷重下の鉄筋とコンクリート間の付着特性に対する，鉄筋腐食の与える影響を実験的に明らかにすることを目的とした。まず，載荷試験に用いる供試体に対して電食試験を実施した。この鉄筋腐食したRC供試体に対して，片側押引き正負繰返し載荷を行った。実験結果から，繰返し回数が10回までの荷重下において腐食供試体は，プレピーク領域において健全供試体よりも付着応力が大きくなることがわかった。一方，ポストピークでは，繰返し荷重下において鉄筋腐食が付着挙動に与える影響は小さいことがわかった。

キーワード：鉄筋腐食，繰返し荷重，付着応力，ポストピーク

1. はじめに

既存の鉄筋コンクリート（RC）構造物の劣化問題に対して，適切な維持管理システムが求められている。合理的な維持管理のためには，劣化したRC構造物の残存性能を適切に評価する必要がある。これら構造物の評価においては，構成材料そのものの力学的性質とともに，鉄筋とコンクリート間で行われる相互の力の伝達作用，すなわち付着の性質が非常に重要となる。RC構造物の付着特性に影響を与える要因の一つとして，鉄筋腐食がある。鉄筋腐食によって生じる生成物に起因する膨張圧により，鉄筋に沿って軸方向のひび割れが発生する場合には，鉄筋とコンクリート間の付着強度が著しく低下する。このような付着劣化がRC構造に与える影響は非常に大きいことがわかっている[1)]。また，地震時などに発生する繰返し荷重は，鉄筋とコンクリート間の付着特性に大きく影響を与える[2)]。そこで本研究では，繰返し荷重を受ける場合の，腐食した鉄筋とコンクリート間の付着特性を実験的に把握することを目的とする。また本研究では，付着応力の最大値だけではなく，ポストピーク領域を含めた応力ーすべり関係を実験的に調べることにする。

2. 実験概要

2.1 供試体および実験条件の概要

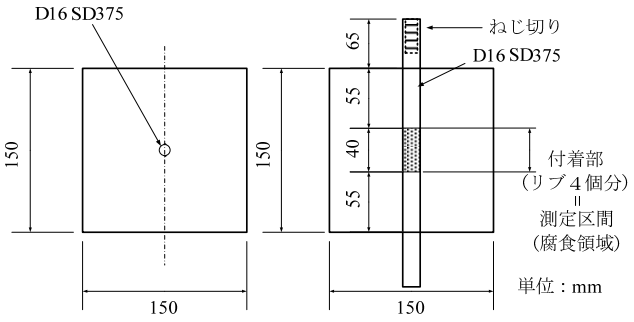
供試体の概要図を**図－1**に示す。供試体は150×150×150 mmのコンクリート立方体であり，その断面の中心にD16の鉄筋（SD345）を1本配置した。かぶりは67 mmである。この供試体を16体作製し，以後の実験に用いた。ここで，コンクリート端面付近における応力状態の乱れを避けるため，コンクリート端面から55 mm部分の鉄筋をエポキシ樹脂でコーティングをし，その上にビニールテープを巻くことによって付着を除去した。

コンクリートの示方配合を**表－1**に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを用い，混和剤としてAE減水剤を使用した。骨材の最大寸法は20 mmとした。

実験ケースを**表－2**に示す。実験パラメータは腐食程度と載荷試験おける荷重の繰返し回数である。腐食は鉄筋腐食によるコンクリートひび割れは生じていない程度とし，鉄筋の質量減少率が0.9%～6.3%とした。また，基準として0%（腐食なし）を設定した。荷重の繰返し回数は，1回，3回，10回とした。

2.2 電食試験

本研究では，供試体中の鉄筋を比較的短時間に腐食させるために，腐食供試体に関して電食試験を実施した。電食試験の概要を**図－2**に示す。コンクリート中の鉄筋は，中央区間の測定区間40 mm以外はエポキシ樹脂とビニールテープで保護し，さらに鉄筋の下の先端（ねじ切りと反対側）にもエポキシ樹脂を塗布することで，測定区間のみ腐食させた。供試体を5% NaCl水溶液に浸し，鉄筋を陽極，ステンレス板を陰極として通電した。腐食程度は，通電流量および通電時間の積から算出した鉄筋表面当りの積算電流量により制御した。



図－1　供試体概要

表－1　示方配合

G_{max}	W/C	s/a	kg/m^3				ml/m^3
(mm)	(%)	(%)	W	C	S	G	AE減水剤
20	64.5	46.7	179	286	842	945	552

*1 神戸大学大学院　工学研究科市民工学専攻准教授　博士(工学)　(正会員)
*2 神戸大学大学院　工学研究科市民工学専攻

表－2　実験ケース

供試体名	繰返し回数（回）	質量減少率（%）	圧縮強度（N/mm^2）
No.1	0	0	29.0
No.2		2.1	29.0
No.3		3.7	29.6
No.4	1	0	30.9
No.5		1.1	29.6
No.6		4.2	29.3
No.7	3	0	30.9
No.8		1.0	30.9
No.9		2.1	29.6
No.10		2.5	29.3
No.11		6.3	29.3
No.12	10	0	30.9
No.13		0.9	30.9
No.14		1.7	25.7
No.15		2.1	29.6
No.16		3.7	29.3

積算電流量の目標値は，質量減少率 5%の供試体の供試体において 7000 Ah/m^2 とし，質量減少率を 1%～5%の範囲で変化させる際には，その値と電流量 0.02A～0.11A でそれぞれ比例算出した通電時間を用いて制御した。

載荷試験終了後，鉄筋の質量減少量を測定した。まず，鉄筋を取り出し，鉄筋に付着しているコンクリート腐食生物を金属製ワイヤブラシで取り除いた。その後，室温の 10%のクエン酸アンモニウム溶液に約 1 日浸漬して，腐食生成物を除去した。腐食生成物を除去した後，鉄筋を付着区間 40 mm を切断し，その質量を計測した。健全な鉄筋の質量と比較することで，式(1)に示すように質量減少率 C (%)を算出した。

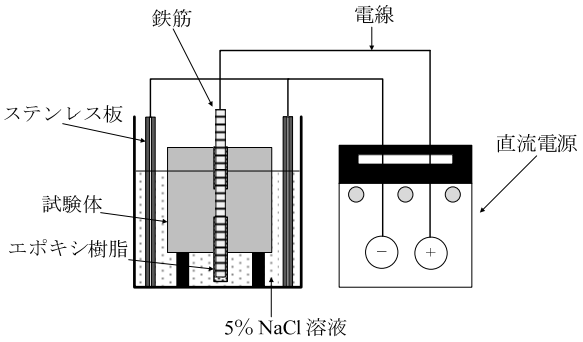
$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \tag{1}$$

ここで，Δw：腐食していない鉄筋と腐食した鉄筋の単位長さ当りの質量差 (g/mm)，w：腐食してない鉄筋の質量 (g/mm)

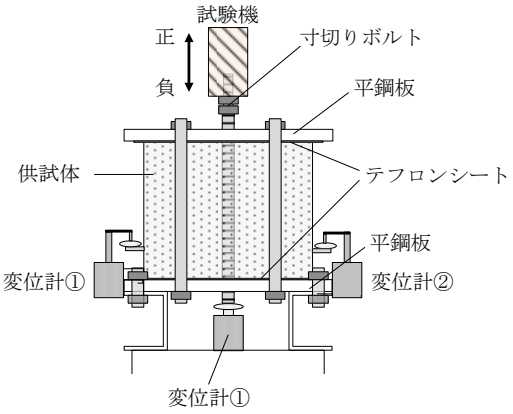
2.3 載荷試験

全ての供試体に対して，変位制御によって片側押引き正負繰返し載荷を行った。載荷試験には，サーボモータ駆動ネジ式精密万能試験機を使用した。また，供試体の載荷側に露出した鉄筋の端部にネジを切り，試験機のクロスヘッドに連結した。載荷実験の概要を**図－3** に示す。

荷重の載荷方向については，鉄筋が引張力を受ける場合を正，圧縮力を受ける場合を負とした。なお，載荷速度は，試験機のクロスヘッド速度で制御した。載荷直後の速度は 1 mm/min とし，変位の増加に伴い速度を増大させた。載荷試験では，実測した鉄筋とコンクリートの



図－2　電食試験概要図



図－3　載荷試験概要図

相対変位，つまり鉄筋すべり量を 0.02 mm，0.05 mm，0.1 mm，0.2 mm，0.5 mm，1.0 mm，2.0 mm，3.0 mm において所定の繰返し回数，交番載荷した。本研究では，比較的大きな鉄筋すべりに至るまでの付着特性をみるために，同一の鉄筋すべりにおける載荷繰返し回数の影響が付着応力－鉄筋すべり挙動に及ぼす影響について検討した。

3. 実験結果と考察

3.1 付着応力－鉄筋すべり関係

載荷試験の結果の一例として，**図－4** に No.5，No.9，および No.15 供試体における付着応力－鉄筋すべり関係を示す。ここで，付着応力 τ および鉄筋すべり S は以下の式でそれぞれ求めた。なお，この平均付着応力を以後の実験結果の整理の際に用いていく。

$$\tau = \frac{P}{\pi Dl} \tag{2}$$

$$S = ① - \left(\frac{② + ③}{2}\right) \tag{3}$$

ここで，

τ　：付着応力 (N/mm^2)

P　：鉄筋に作用させた軸力 (N)

D　：鉄筋直径 (D16：D = 15.9 mm)

l　：測定区間 (= 40 mm)

腐食供試体の場合：腐食区間 (＝40 mm)

S　：鉄筋すべり(mm)

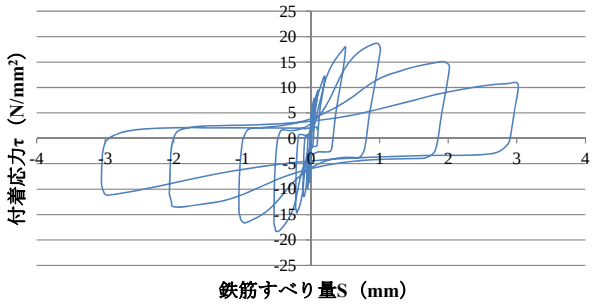
①，②，③：変位計①～③で求めた変位 (mm)

付着応力，および鉄筋すべり量に関して，上向き載荷時（引張方向）を正の値，下向き載荷時（圧縮方向）を負の値とした。なお，載荷中測定された②，③は非常に小さく，①と比べ無視できる値であった。

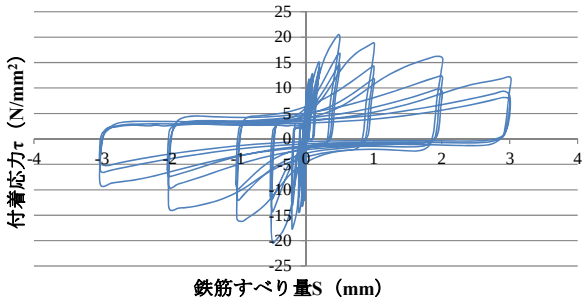
3.2 載荷試験終了後のコンクリート付着面と鉄筋の状況

載荷試験が終了した後，供試体を解体し，測定区間を目視観察した。その写真を**図－5** に示す。繰返し回数が 3 回以上の供試体について，腐食の有無に関わらず全ての供試体における鉄筋の付着部が平滑になっていた。つまり，載荷初期には鉄筋の節とコンクリートのかみ合いによってずれに抵抗していたが，最終的には隣り合う節の頂点間をつなぐように破壊面が形成されたものと考える。

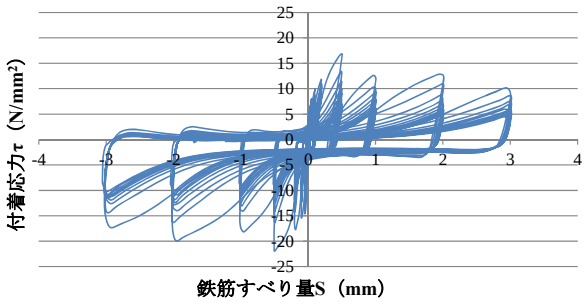
図－6 に電食試験後の除錆した鉄筋の様子を示す。腐食鉄筋を見ると，節の形状が若干丸くなっているのがわかる。これは，節周辺でブリーディング水が蓄積され，その部分が弱点となるように腐食が進行したためと考える[3]。また，**図－6**(b)，(c)にみられるように，質量減少量が 2.5%以上の供試体に関しては孔食が生じていた。



(a) No. 5（繰返し回数 1 回，質量減少率 1. 1%）



(b) No. 9（繰返し回数 3 回，質量減少率 2. 1%）



(c) No. 15（繰返し回数 10 回，質量減少率 2. 1%）

図－4　付着応力—鉄筋すべり関係

3.3 鉄筋の質量減少率の違いによる影響

繰返し回数が 0 回，1 回，3 回，10 回の場合の，付着応力—鉄筋すべり量関係の包絡線を**図－7** に示す。また，プレピーク挙動を比較するため，すべり量が 0.1 mm および 0.2 mm のときの付着応力－鉄筋すべり関係におけ

(a) No. 3（繰返し回数 0 回，質量減少率 3. 7%）

(b) No. 6（繰返し回数 1 回，質量減少率 4. 2%）

(c) No. 10（繰返し回数 3 回，質量減少率 2. 5%）

(d) No. 15（繰返し回数 10 回，質量減少率 2. 1%）

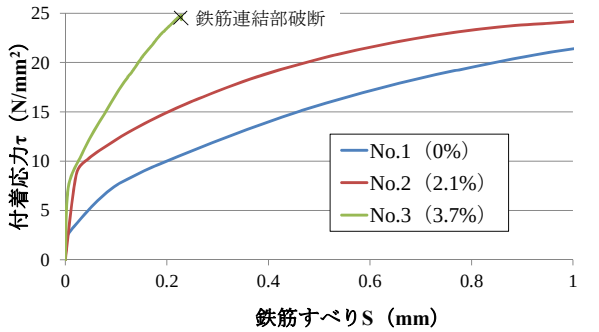
図－5　試験後のコンクリートの様子

(a) No. 5（質量減少率 1. 1%）

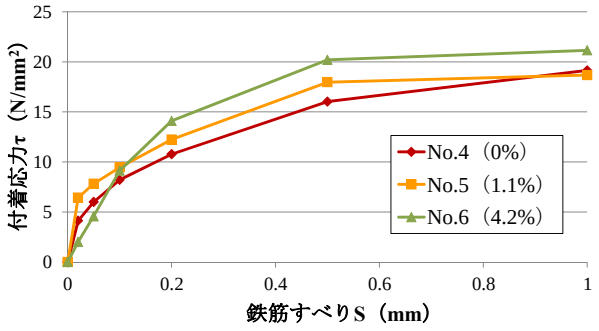
(b) No. 10（質量減少率 2. 5%）

(c) No. 11（質量減少率 6. 3%）

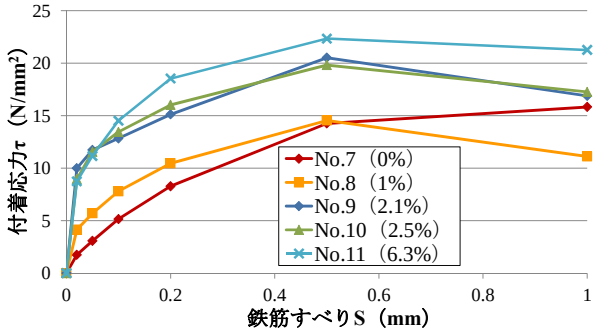
図－6　載荷試験後の鉄筋の様子



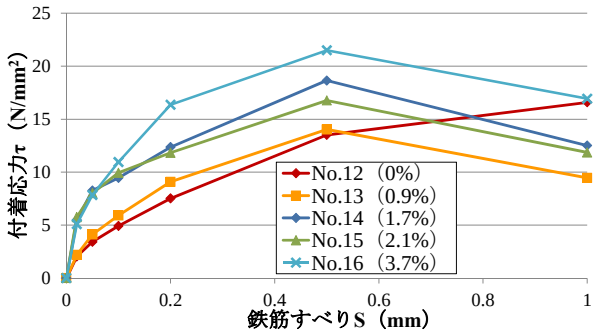
（a）繰返し回数 0 回（単調引張）



（b）繰返し回数 1 回



（c）繰返し回数 3 回



（d）繰返し回数 10 回

図－7　付着応力における腐食の影響
（鉄筋すべり量 1㎜ までの挙動）

る割線剛性をそれぞれ**表－3** にまとめる。ここで，0.1 mm の割線剛性を K_1 とし，0.2 mm の割線剛性を K_2 とする。

図－7（a）を見ると，健全供試体 No.1 は腐食供試体よりも同一の鉄筋すべり量のときの付着応力が小さくなっていることがわかる。また，載荷初期の付着応力を見ると，腐食供試体である No.2 と No.3 の剛性は，健全供試体 No.1 のそれより大きく，腐食供試体の方が付着応力の初期剛性が大きい。これは鉄筋が腐食することで鉄筋が膨張し，これに対する反作用でコンクリートによる拘束力が生じたため [4]であると考える。また，腐食供試体のみにおいては，腐食量の増加に伴い付着応力の増加が見られた。実際，No.3 の剛性は No.2 のそれのおおよそ 1.5 倍程度の値を示し，その差は顕著であった。

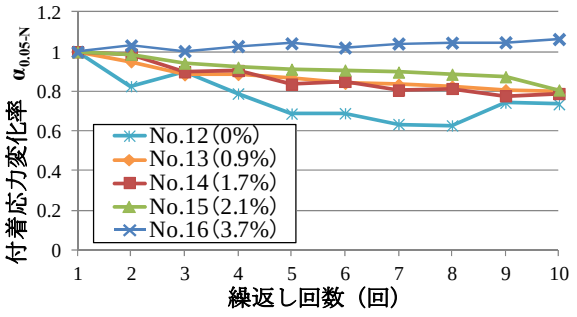
次に，繰返し回数 1 回，3 回，10 回における実験関係の**図－7**（b），（c），（d）を見ていく。**図－7**（b）を見ると腐食供試体のプレピークにおいて，健全な供試体よりも腐食供試体の載荷初期の付着応力が大きくなっているものの，鉄筋すべり量の増加に伴い，鉄筋腐食による初期の付着応力の増加が小さくなっていることがわかる。また，腐食の有無に関わらず全供試体が鉄筋すべり量 1.0 mm のときに，付着応力－すべり関係の包絡線の最大値，つまりピーク応力を示していることがわかる。

一方，**図－7**（c）を見ると，腐食供試体 No.8，No.9，No.10，ならびに No.11 では変位が 0.5 mm のときに付着力がピーク応力に達したが，健全供試体 No.7 は変位が 1.0 mm のときにピーク応力を示しているのがわかる。（No.7 のポストピーク挙動については，後出の**図－9** を参照）。また，腐食供試体の鉄筋すべり量 0.5 mm 以下において，健全な供試体よりも腐食供試体の付着応力が大きくなっていることがわかる。以上より，繰返し載荷影響によって，応力時の鉄筋すべり量が低下することがわかった。一方，質量減少率 2%以上の供試体においては，腐食による最大付着応力の増加が見られたが，質量減少率 1.0%の No.8 供試体においては，最大付着応力が最も小さい値を示した。

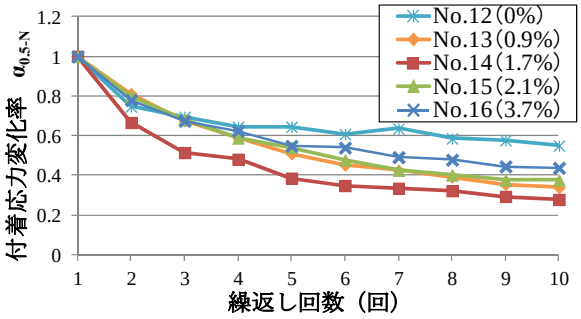
図－7（d）を見ると，繰返し回数 3 回のときと同様に，腐食供試体のプレピークにおいて，健全な供試体よりも腐食供試体の載荷初期の付着応力が大きくなった。また，

表－3　鉄筋すべり量が 0.1㎜ および 0.2㎜ のときの割線剛性 K_1 および K_2

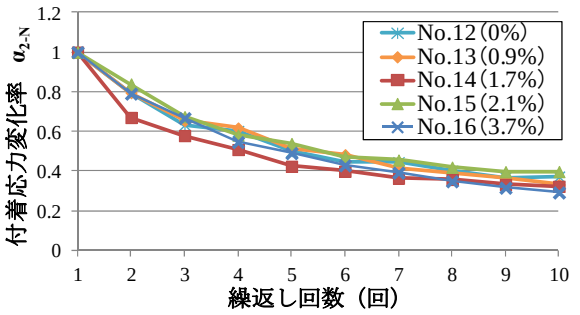
供試体名	K_1（N/mm³）	K_2（N/mm³）
No.1	75.3	50.1
No.2	121.8	74.7
No.3	168.0	117.4
No.4	82.2	53.8
No.5	94.6	61.2
No.6	91.3	70.5
No.7	51.5	41.4
No.8	78.0	52.3
No.9	128.3	75.6
No.10	134.5	80.1
No.11	145.2	92.7
No.12	49.2	37.6
No.13	59.2	45.4
No.14	94.6	61.8
No.15	99.4	59.1
No.16	109.5	81.8



（a）鉄筋すべり量 0.05mm



（b）鉄筋すべり量 0.5mm



（c）鉄筋すべり量 2.0mm

図－8　繰返し回数と付着応力変化率の関係

最大付着応力においても，質量減少率 2%以上の供試体においては，腐食による最大付着応力の増加が見られたが，質量減少率が 2%未満の No.13，No.14 供試体では，最大付着応力が健全供試体よりも低い値を示した。

3.4 同一鉄筋すべり時の付着挙動

ここでは同一の鉄筋すべり時において，繰返し回数の増大に伴い，付着応力がどのように変化していくか見ていく。**図－8** は，No.12～No.16 供試体における，鉄筋すべり量が 0.05 mm，0.5 mm，2.0 mm のときの繰返し回数と付着応力変化率の関係を表す。ここで，付着応力変化率α_iを各鉄筋すべり時の処女載荷時の付着応力に対する割合として，式(4)のように定義する。

$$\alpha_{i-N} = \frac{\tau_{i-N}}{\tau_{i-1}} \qquad (4)$$

ここで，

τ_{i-N} ：鉄筋すべり i mm，N サイクル目の付着応力

i ：鉄筋すべり（= 0.05，0.5，1.0，2.0 mm）

N ：載荷サイクル数 （ = 1, 2,…, 10）

図－8（a）から，鉄筋すべり量が 0.05 mm 程度の載荷初期において，腐食供試体 No.13～16 は健全供試体 No.12 より付着応力は低下していないことがわかる。つまり，腐食供試体は鉄筋すべり量が小さいと，付着があまり劣化しないことがわかった。これは，腐食生成物によって発生する膨張圧の影響であると推察している。

また，**図－8**（b）から腐食供試体 No.13～No.16 は付着応力が大きく減少し，10 サイクル目の付着応力は 1 サイクル目の 40%程度の値となっていることがわかる。これより，腐食供試体はピークにおいて，付着応力が著しく低下していることがわかる。一方，健全供試体はこの鉄筋すべり量ではピーク応力に達しておらず，腐食供試体ほどの付着劣化が見られなかった。

鉄筋すべり量 2 mm ときに全ての供試体においてポストピークに至っていたが，**図－8**（c）をみると，健全と腐食供試体の付着応力は同様の挙動を示し，繰返し回数の増加に伴って付着応力が大きく低下していることがわかる。以上より，ポストピークにおいては，今回の対象程度の質量減少率では，その違いによる繰返し載荷の影響が小さいことがわかった。

3.5 繰返し回数の違いによる影響

図－9 は，前出の各供試体における付着応力－鉄筋すべり関係の包絡線を，鉄筋腐食量によって再整理したものである。いずれの質量減少量においても，繰返し回数が多いほど同一鉄筋すべり時の付着応力が同等もしくは小さくなる傾向があった。これは，繰返し載荷に伴い，付着劣化が進行したためと考える。実際には，繰返し載荷を受けた供試体の節間のコンクリートでは，損傷を受けて鉄筋境界面が平滑になっていた。また，前出の**図－5** をみると，特に繰返し回数 3 回以上の供試体において，付着面が平滑になっていた。

健全供試体における結果を示す**図－9**（a）を見ると，すべてのケースにおいて，ピークでの応力値がおおよそ等しくなることがわかった。また，プレピーク，ポストピークのいずれの挙動においても違いがみられなかった。

また，**図－9**（b）を見ると，繰返し回数 3 回以上の荷重において，繰返しの影響はプレピーク，ポストピークともに小さかった。一方，繰返し回数が 1 回と少ない場合では，最大付着応力は大きい値を示した。質量減少率 2%程度の供試体における関係を示す**図－9**（c）をみると，繰返し回数の違いによる最大付着応力の差が顕著に表れている。しかし，健全供試体と 1%の腐食供試体と同様，ポストピーク時の鉄筋すべり量増加に伴う付着応力の低下が少なかった。

図－9（d）をみると，付着応力－すべり関係の包絡線におけるプレピーク挙動には大きな違いが見られなかったが，ポストピークでは，他の供試体と比べて繰返し回

数10回のNo.16の付着応力がポストピークにおいて大きく低下していることがわかる。以上より，腐食量が多いほど繰返しの影響を大きく受けることがわかった。これは，節やリブが減少することにより，節やリブとコンクリートのかみ合う面積が減少し，それがピーク後の急激な応力低下に影響していると推察する。ただし，この付着応力が低減するといった挙動についてより詳細な検討は必要であり，今後の課題とする。

4. まとめ

鉄筋腐食による質量減少量が 0.9%～6.3%，ならびに0%の供試体を対象とした，片側押引き正負繰返し載荷実験を実施した。いずれの供試体においても腐食に伴うひび割れは生じていない。本研究で得た結論を以下に示す。

(1) 繰返し回数が 10 回までの繰返し荷重下において，鉄筋すべり量が 0.5 mm 以下では付着応力は最大値に至っていない。このプレピーク挙動において，健全供試体よりも腐食供試体の付着応力が大きくなる。

(2) 繰返し回数 3 回から 10 回までの繰返し荷重下において，腐食供試体では，繰返し回数の増加に伴う付着応力低下が，健全供試体よりも少ない繰返しサイクルで生じる。

(3) 腐食供試体では，鉄筋すべり量が 0.05 mm 程度の載荷時において，健全供試体より繰返し載荷中の付着応力の低下は小さい。

(4) 鉄筋すべり量が 2 mm 以上のすべての供試体のポストピーク挙動では，同一すべり時の繰返し載荷に伴う付着応力は低下する。その挙動に与える鉄筋腐食の影響は小さい。

(5) 腐食量が 4%程度の供試体では，他の供試体と比べて繰返し回数 10 回の供試体の付着応力はポストピークにおいて大きく低下する。

参考文献

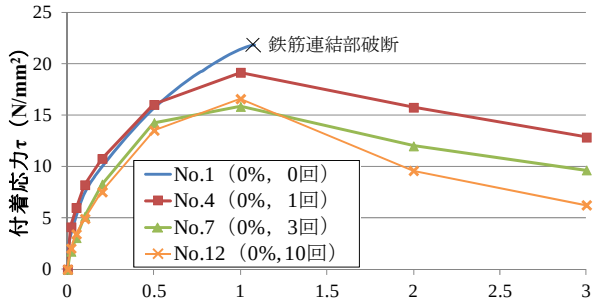
1) Fang, C., Gylltoft, K., Lundgren, K. and Plos, M.: Effect of Corrosion on Bond in Reinforced Concrete Under Cyclic Loading, Cement and Concrete Research, Vol.36, pp.548-555, 2006.3

2) 森田司郎，角徹三：繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究，日本建築学会論文報告集，第 229 号，pp.15-24，1975

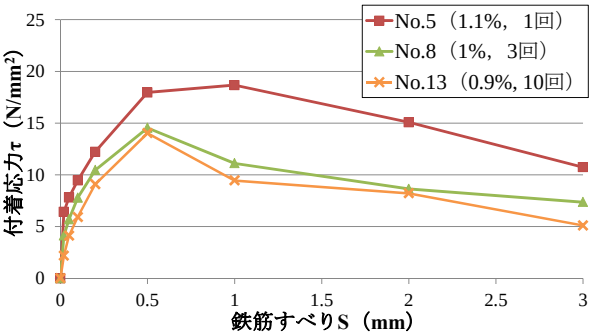
3) 鈴木三馨，堀口賢一，福浦尚之，丸屋剛：鉄筋の腐食促進条件が腐食膨張によるひび割れ発生に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，pp.1081-1086，2009

4) 日本コンクリート工学会：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

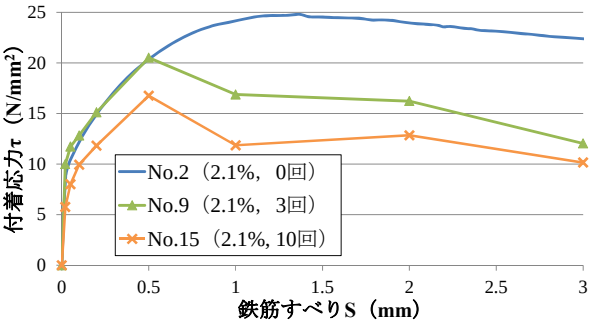
5) 塩見拓也，三木朋広：繰返し荷重を受ける腐食鉄筋とコンクリート間の付着挙動に関する実験的研究，アップグレード論文報告集，Vol.12，pp.425-430，2012



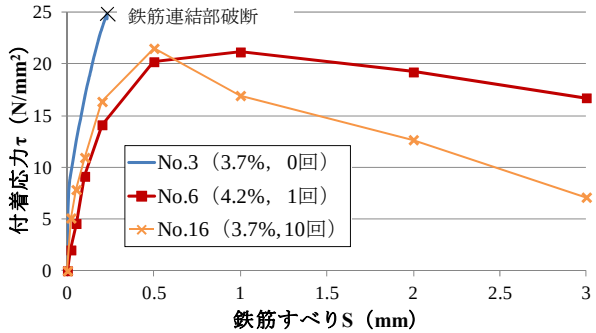
（a）0%（健全供試体）



（b）1%程度（腐食供試体）



（c）2%程度（腐食供試体）



（d）4%程度（腐食供試体）

図－9　付着応力－鉄筋すべり関係