

論文 腐食を有する異形鉄筋の定着部補強方法の検討

森 誠^{*1}・松本 浩嗣^{*2}・酒井 舞^{*3}・二羽 淳一郎^{*4}

要旨：本研究では、腐食を有する鉄筋定着部の補強方法を検討するため、実構造物を模擬したはり型付着試験装置を作製し、直角方向の補強筋、拘束圧および連続繊維シート巻立てにより補強した腐食を有する鉄筋定着部の引抜き試験を行った。実験の結果、補強のない鉄筋は付着割裂破壊を呈したが、補強を行うことにより、全ての供試体において鉄筋に作用する最大引抜き力が増加した。また、補強により鉄筋のすべり量および鉄筋に沿うひび割れの開口も抑えられ、付着力が回復した。鉄筋のすべり量は高弾性炭素繊維シートを巻き立てたものが健全時と同程度となり、定着性能を最も回復できることがわかった。

キーワード：補強, 定着部, 鉄筋腐食, すべり量, 直角方向の補強筋, 拘束圧, 連続繊維シート

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された鉄筋コンクリート(RC)構造物の供用期間が半世紀を迎えようとしており、劣化が顕在化した構造物が増加している。このような劣化を有する構造物の補修・補強方法の開発が急務である。RC 部材において、コンクリート中に埋め込まれた鉄筋の付着を確保することが重要であることはいまでもない。劣化によって鉄筋の付着が消失すると、RC 部材の耐荷力のみならず、剛性が低下し、安全性、使用性の面で問題が生じる。また、定着部に劣化が生じ、鉄筋の付着が十分でない状態で引抜き力が作用すると、定着破壊が生じ、部材の耐荷力が大幅に減少する危険性がある。

このような背景から、著者らは、実構造物の定着部を模擬した試験体に直角方向の補強筋および拘束圧を導入したコンクリート中の異形鉄筋の付着性状を検討しており、付着力が向上することを確認している¹⁾。しかし、既往の研究では鉄筋が健全な状態で引抜き試験を行っており、腐食を有する異形鉄筋に対する補強方法に関しては検討していない。

そこで本研究では、腐食を有する異形鉄筋定着部の補強方法の検討を目的として、腐食を有する異形鉄筋の定着部に直角方向の補強筋を配置したもの、および拘束圧を導入したもの、さらには連続繊維シートを巻き立てたものを作製し、引抜き試験を実施した。最大引抜き力、すべり、ひび割れ開口幅を検討することにより、各補強方法の妥当性を検討した。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの示方配合

表-1 に、供試体作製に用いたコンクリートの示方配合を示す。セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。

2.2 供試体概要

RC はりの定着部を模擬するため、図-1 に示すはり型付着試験装置を作製した。載荷点と支点の間に働く曲げモーメントにより、試験区間の鉄筋に引抜き力が作用する。図-2 に試験区間の詳細を示す。本実験では、引抜き力作用点の鉄筋にねじ切り加工を施し、図-3 に示すアタッチメント器具を図-4 に示すように鉄筋とアルミ板をネジを介して固定し、アルミ板に変位計を当てることで引抜き力作用点付近の鉄筋のすべり量を計測した。その際、アルミ板を試験区間側面より外側に出すため、図-4 に示す空間を設けた。また、試験装置の特性上、引抜き力の作用点付近の鉄筋には局所的な曲げが発生する可能性があるため、図-2 に示すように 50mm のアンボンド区間を設けており、定着長は 350mm となっている。供試体に用いたコンクリートの設計基準強度は 30MPa とした。表-2 に鉄筋の力学特性を示す。軸方向鉄筋には、D16 の異形鉄筋を使用した。

2.3 載荷試験および計測項目

載荷には、油圧式 2000kN 試験機を用い、静的 4 点曲げ試験を行った。支点と供試体の間には減摩パッドを挿

表-1 コンクリートの示方配合

粗骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	AE 減水剤
20	60	45	177	296	838	963	0.443

*1 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*2 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻 (学生会員)

*4 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

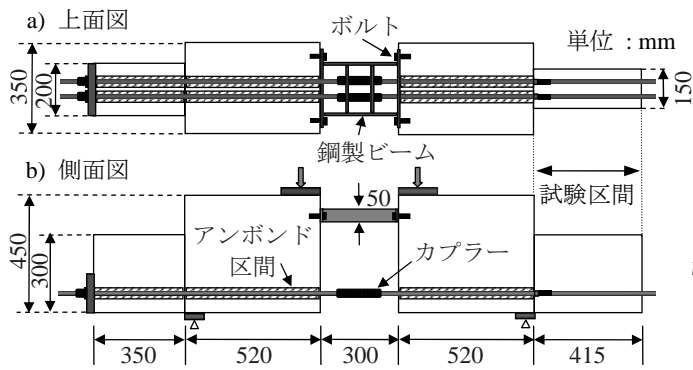


図-1 はり型付着試験装置概要図

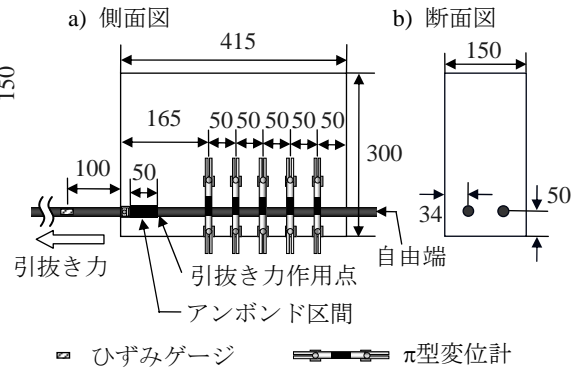


図-2 試験区間の詳細

表-2 鉄筋の力学特性

降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
341	484	197

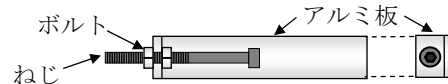


図-3 アタッチメント器具概要図

入することで、支点の拘束による水平反力を除去した。載荷試験における計測項目は、軸方向鉄筋の引抜き力作用点近傍および自由端のすべり、付着ひび割れ幅、アンボンド区間の鉄筋のひずみ、連続繊維シート（CFRP）のひずみである。付着ひび割れ幅は、図-2に示すようにπ型変位計を50mmの間隔で供試体側面に軸方向鉄筋に沿うように設置することで計測し、鉄筋のひずみゲージは試験区間より中央部側に100mm離れた位置に貼付した。連続繊維シート（CFRP）のひずみ測定位置については、3章で詳述する。

2.4 腐食促進方法

本研究では、軸方向鉄筋に腐食を生じさせるため、供試体打設後7日目以降電食を実施した。図-5に電食の概要図を示す。電食では軸方向鉄筋を陽極、ステンレス板を陰極側とした。また、電解質溶液として3%NaCl水溶液を使用し、供試体底面から2cm程度の深さまで浸漬させた。鉄筋の質量減少率がすべての供試体において同等となるように、電食時の積算電流量を供試体ごとに管理した。目標腐食量は、質量減少率で10%とした。

2.5 供試体シリーズ

表-3に、供試体シリーズを示す。本研究では、初めに腐食の有無による付着性状の差異を検証するために、腐食のない供試体Nを用意した。供試体の補強方法は、直角方向の補強筋、拘束圧、連続繊維シート（CFRP）の3種類である。直角方向の補強筋の配筋図を図-6に示す。補強筋にはD10の異形鉄筋をU型スターラップとして使用した。拘束圧は図-7に示すようにPC鋼棒および鋼板を用いて、PC鋼棒に緊張力を導入することにより直角方向に作用させた。拘束圧の大きさの異なる2つの供試体を用意した。また、連続繊維シートには弾性係数の異なる高弾性炭素繊維シートおよびガラス繊維シートを使用し、図-8に示すように、隅角部での連続繊維シートへの応力集中を緩和するため、隅角部をディスクサンダーを用

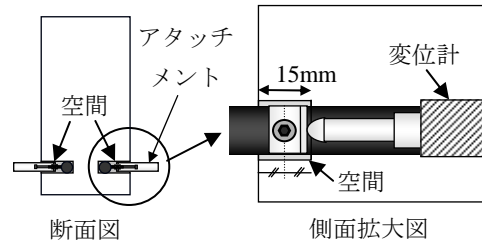


図-4 アタッチメント器具取り付け方法

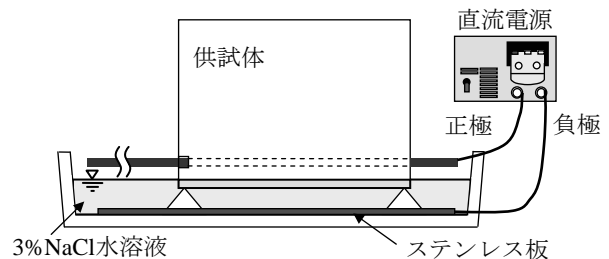


図-5 電食試験の概要図

いて面取りし、供試体全周を巻き立てることで補強した。表-4に連続繊維シート（CFRP）の物性値を示す。

3. 実験結果

3.1 腐食量の算出

軸方向鉄筋の腐食を定量的に評価するため、式(1)に示す質量減少率C(%)を用いた。

$$C = \frac{\Delta w}{w} \times 100 \quad (1)$$

ここで、 Δw は健全な鉄筋と腐食した鉄筋の単位長さあたりの質量差(g/mm)、 w は健全な鉄筋の単位長さあたりの質量(g/mm)である。

全ての供試体において、載荷試験終了後、供試体を解体して軸方向鉄筋を取り出し、鉄筋の表面を清掃し付着した腐食生成物を除去した。その後、JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」²⁾に則って、60℃のクエ

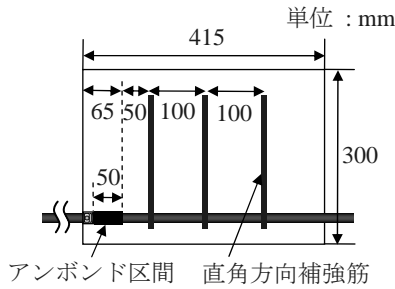


図-6 直角方向補強筋配筋図

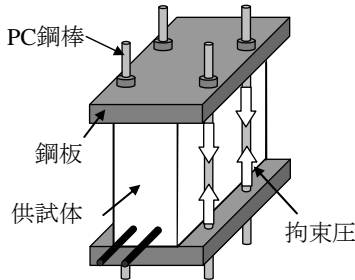


図-7 拘束圧導入方法

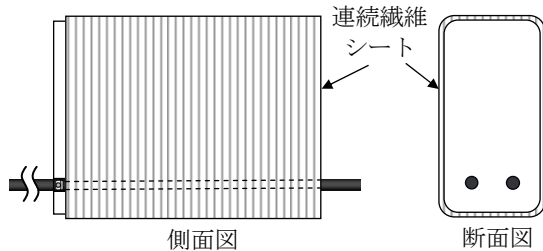


図-8 シート巻立て方法

表-3 供試体シリーズ

供試体名	質量減少率(%)		ひび割れモード	補強方法の種類	値
	目標	平均			
N	0	0	—	—	—
C10	10	11.4	底面	—	—
C10T		13.6	側面・底面	直角方向補強筋(D10)	鉄筋比0.95%
C10R2.5		9.7	側面・底面	拘束圧(MPa)	2.5
C10R5		12.9	側面・底面		5
C10C		7.7	側面	高弾性炭素繊維シート	—
C10G		7.8	側面	ガラス繊維シート	—

表-4 シートの物性値

シートの種類	繊維目付量 (g/m ²)	設計厚さ (mm)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
高弾性炭素繊維シート	300	0.143	1900	640
ガラス繊維シート	300	0.118	1500	73

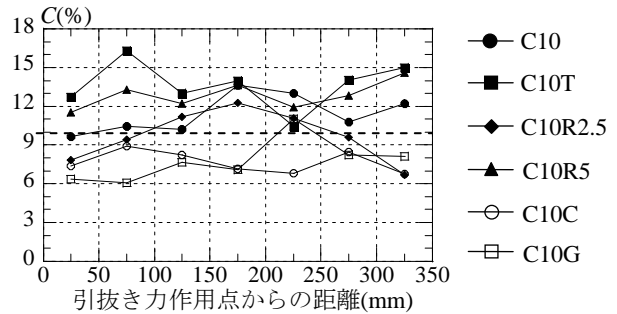


図-9 質量減少率分布

ン酸水素二アンモニウムに2日間浸漬した後、鉄筋を50mmごとに分割し、各鉄筋片の長さや質量を測定した。このようにして得られた単位長さあたりの質量を、健全な鉄筋と比較することで質量減少率を算出した。

図-9に各供試体の質量減少率の分布を示す。ここで示した質量減少率は、2本の鉄筋の区間ごとの平均であり、以降の議論では、この質量減少率を用いた。表-3に、試験区間全体の質量減少率の平均値を示す。供試体全体の平均値は、多少ばらつきは見られるが、目標値である10%から極端に離れた供試体はなかった。質量減少率の分布にもばらつきは見られるが、ひび割れ状況に大きな違いはなかった。

3.2 荷重試験結果

(1) 最大引抜き力

表-5に、コンクリートの力学特性および荷重試験結果を示す。供試体C10は付着割裂破壊を呈し、供試体C10Tを除くそれ以外の供試体は、アンボンド区間において軸方向鉄筋が降伏することにより荷重試験を終了した。最大引抜き力は、付着割裂破壊を呈した供試体に関しては、破壊時のアンボンド区間に貼付したひずみゲージの測定値に鉄筋の弾性係数および断面積を乗じた値、その他の供試体は、鉄筋の降伏強度に断面積を乗じた値

により算出した。腐食を導入した無補強供試体C10の最大引抜き力は健全供試体Nの60%程度に低下した。一方、直角方向の補強筋を配置した供試体C10Tの最大引抜き力は健全供試体Nとほぼ同等であり、補強筋により定着強度が増大していることがわかる。また、拘束圧および連続繊維シートで補強したすべての供試体の最大引抜き力は健全供試体Nと同等であり、腐食により低下した定着強度が補強によって完全に回復したことがわかる。供試体C10Tの破壊モードを議論する。健全供試体Nについては、コンクリート中の鉄筋にひずみゲージを貼付している¹⁾。アンボンド区間の鉄筋が降伏ひずみ(1731 μ)に達した時点で、引抜き力作用点からの距離が50mmの位置のひずみは1422 μ であり、降伏強度の約82%(1422/1731 \times 100)の引張応力が生じていたと考えられる。一方、供試体C10Tの引抜き力作用点からの距離が50mmの位置の質量減少率は約15%であり(図-9)、降伏強度は健全時の85%程度に低下していると考えられる。したがって、腐食により付着応力が減少していることを考えると、コンクリート埋設部の鉄筋降伏が先行して発生した後、付着割裂破壊を呈した可能性が考えられる。

(2) ひび割れ幅

図-10に π 型変位計で計測した各引抜き力ごとのひ

表-5 コンクリートの力学特性および載荷試験結果

供試体名	コンクリートの力学特性			載荷試験結果	
	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	破壊モード	最大引抜き力 (kN)
N	35.5	3.08	29.7	鉄筋降伏	67.7
C10	38.0	3.00	31.2	付着割裂	42.3
C10T	36.3	3.02	28.1	付着割裂 or 内部鉄筋降伏	67.0
C10R2.5	39.3	2.99	31.4	鉄筋降伏	67.7
C10R5	37.1	2.70	30.9	鉄筋降伏	67.7
C10C	41.8	—	31.0	鉄筋降伏	67.7
C10G	35.8	2.85	30.4	鉄筋降伏	67.7

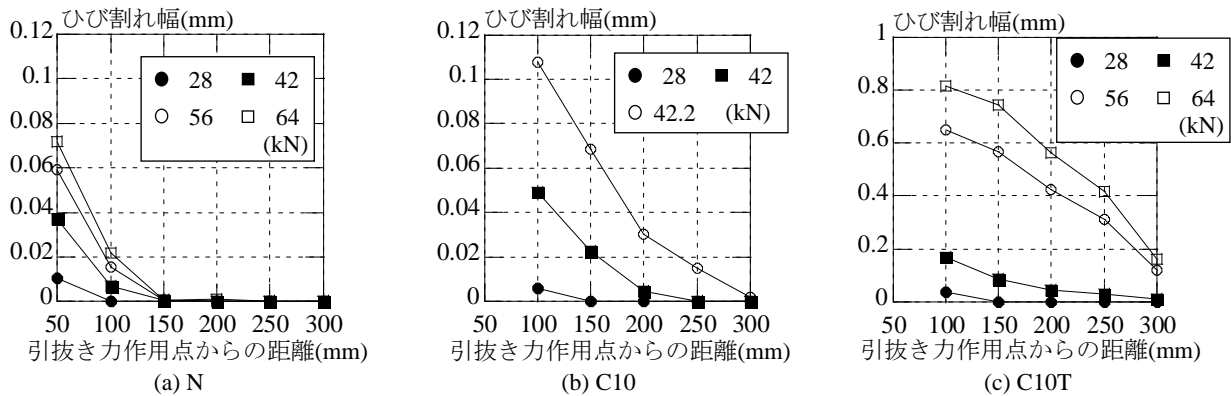


図-10 ひび割れ幅の推移

ひび割れ幅の推移を示す。供試体 C10 については、付着割裂破壊直前のひび割れ幅についても示す。なお、拘束圧を導入した供試体 C10R2.5 および C10R5 のひび割れ幅は最大引抜き力が作用した時点で 0.007mm 以下と極めて小さかったため、図示していない。また、シートを巻き立てた供試体 C10C および C10G にはπ型変位計を設置していない。

図に示す 3 つの供試体全てにおいて、引抜き力の増加に伴い、引抜き力作用点から離れた位置のひび割れ幅が増加し始めていることがわかる。これは、付着ひび割れが軸方向鉄筋に沿って進展した結果と考えられる。また、供試体 N と供試体 C10 を比較すると、同じ引抜き力が作用した時点の各位置におけるひび割れ幅の値が全てのπ型変位計設置部分において、供試体 C10 が供試体 N を上回っていることがわかる。これは、腐食ひび割れが発生したことにより、引抜き力作用時のひび割れ幅の拡幅量が大きくなったことを意味している。

また、直角方向の補強筋が配置された供試体 C10T のひび割れ幅が、供試体 C10 よりも極端に大きいことがわかる。これは、電食後、軸方向鉄筋とともに直角方向の補強筋も腐食し、補強筋に沿う腐食ひび割れが発生したためではないかと考えられる。図-11 に供試体 C10T の腐食ひび割れ図および載荷により生じたひび割れの様子を、図-12 に補強筋の腐食量の計測箇所および表-6 に補強筋の質量減少率を示す。ここで、番号 11 を除いて補

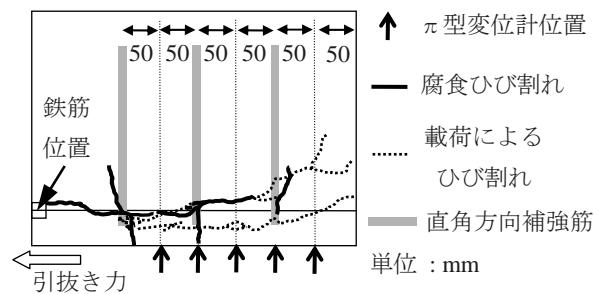


図-11 ひび割れ図 (C10T)

強筋を 20mm ごとに分割し、質量減少率を算出した。また、供試体 C10T には補強筋が 3 本配置されており、引抜き力作用点に近い方から前・中・後と表記した。軸方向鉄筋に近づくにつれて腐食量は大きくなり、特に軸方向鉄筋の下部の番号 11 の腐食量は 50% 程度以上と非常に大きくなった。図-11 より補強筋の腐食に起因するものと見られる腐食ひび割れがπ型変位計設置位置を横切って発生しているのがわかる。これにより、供試体 C10T のひび割れ本数が増え、各ひび割れ幅の総和がπ型変位計で検知されたため、極端に大きな値を示したと考えられる。また、表-3 のひび割れモードに示すように、供試体 C10T は側面と底面の両方に腐食ひび割れが発生したのに対し、供試体 C10 は底面にしか発生しなかった。そのため、供試体 C10T の方が側面ひび割れが容易に拡幅したと考えられる。

拘束圧を導入した供試体 C10R2.5 および C10R5 におい

ては、拘束圧のためにひび割れが開口することができず、ひび割れ幅が極めて小さかったものと考えられる。

(3) シートのひずみ性状

シートを巻き立てた供試体 C10C および C10G には π 型変位計を貼付することができない。そこで、ひび割れ進展の評価方法として、図-13に示すように、軸方向鉄筋に沿うようにシートの表面にひずみゲージを貼付することで確認することとした。その際、ひずみゲージはシートの繊維方向に貼付した。

図-14に引抜き力が14, 28, 42, 56, 60, 64, 67kN およびピーク時の供試体 C10C および C10G の軸方向鉄筋に沿った位置におけるひずみ分布の推移を示す。図中のひずみは、引張ひずみを正の値としている。

供試体 C10C および C10G において引抜き力が増加するに従って、引抜き力作用点から離れた位置のひずみが増加し始めていることがわかる。これは、軸方向鉄筋に沿った腐食ひび割れが拡幅したことによりシートに引張力が作用したものと考えられる。また、供試体 C10C よりも供試体 C10G の方が引抜き力作用点から離れた位置のひずみが大きくなっており、弾性係数および設計厚さの大きい炭素繊維シートは、ガラス繊維シートと比べてひび割れの進展を抑える効果が大きいことがわかった。供試体 C10C において、引抜き力作用点から150mm よりも200mmの方が、供試体 C10G において、100mm よりも150mmの方がひずみが大きい。図-15に供試体 C10C

および C10G の腐食ひび割れ図とひずみゲージ貼付位置を示す。供試体 C10C における引抜き力作用点から150mmにおける腐食ひび割れは軸方向鉄筋よりも下側に位置し、供試体 C10G における引抜き力作用点から100mmにおける腐食ひび割れが鉄筋をまたいで2本発生していることがわかる。シートのひずみはひび割れ直上で局所化していることが予想され、したがってひび割れとひずみゲージの位置が一致していないこの両者は、他の位置よりも比較的小さいひずみが検出されたものと考えられる。

ピーク時の高さ方向のひずみは、図-16より供試体 C10C は軸方向鉄筋から100mm上方の位置のひずみは 147μ 、200mm上方の位置のひずみは 0μ であり、非常に小さい値となった。また、供試体 C10G は、軸方向鉄筋から100mm上方の位置のひずみが 11μ で、供試体 C10C 同様に非常に小さい値となった。これは、シートの剥離が供試体の上縁に達していないことを意味している。

(4) すべり量の推移

引抜き力作用点付近の軸方向鉄筋のすべり量をアタッチメント器具を設置することにより計測した。図-17に各供試体のすべり量の推移を示す。なお、供試体 C10T については、計測できなかったため図示していない。ここでは、引抜き力が14, 28, 42, 56, 60, 64kN 時のすべり量の推移であり、供試体 C10 は引抜き力42.3kN で付着割裂破壊を呈したので、引抜き力が42kN までの推

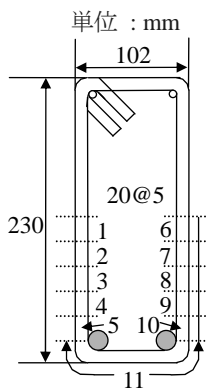


図-12 補強筋腐食量計測箇所

表-6 補強筋腐食状況

番号	質量減少率(%)		
	前	中	後
1	3.6	1.2	0.9
2	1.2	2.0	1.8
3	0.1	1.8	0.7
4	5.5	6.6	4.5
5	18.7	16.4	13.9
6	0.4	0.1	4.1
7	5.5	0.8	1.3
8	3.8	0.4	2.7
9	8.1	5.3	3.9
10	24.0	17.3	12.9
11	57.8	63.9	45.9

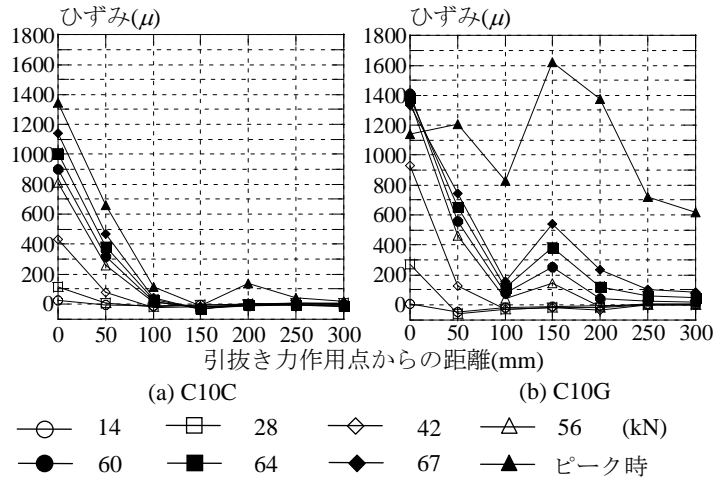


図-14 シートのひずみ分布(軸方向)の推移

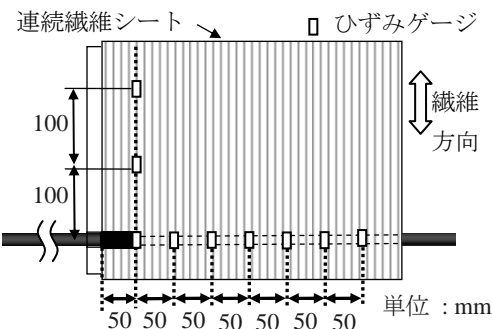


図-13 ひずみゲージ貼付位置(側面図)

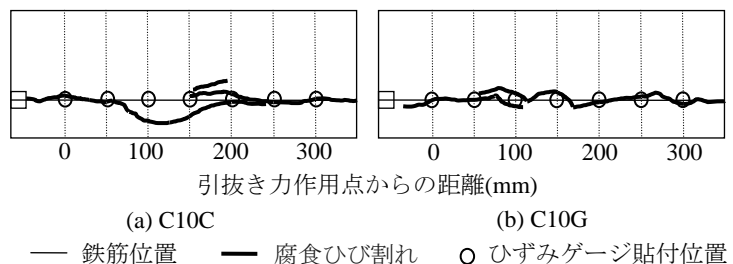


図-15 腐食ひび割れ図

移を示している。健全供試体Nのすべり量については、コンクリート中の軸方向鉄筋およびアンボンド区間に貼付したひずみゲージを用いて¹⁾、(アンボンド区間のひずみ)×(引抜き力作用点からアタッチメント器具までの距離)+(付着域におけるひずみ分布の積分値)で求めた。ここで、アタッチメント器具は図-4に示す空間の中央に設置しており、引抜き力作用点からアタッチメント器具設置位置までの距離は57.5mmである。

健全供試体Nは引抜き力が28kNの時点からすべり量が増加し始め、引抜き力が64kNに達した時点で0.21mmとなった。これは、すべての供試体の中で最も小さい値である。これに対して、腐食供試体C10は载荷初期の段階から大きなすべり量が発生している。これは、腐食により軸方向鉄筋とコンクリートとの付着力が減少したためと考えられる。

補強を施した全ての供試体のすべり量は供試体C10よりも減少しており、各補強方法により腐食した軸方向鉄筋が引抜かれるのを抑制できたことがわかる。特に高弾性炭素繊維シートで補強した供試体C10Cに関しては、引抜き力が55kNに達するまでほとんどすべりが生じていないなど、健全供試体と比較しても遜色がないほどすべり量を抑制することができた。なお、供試体C10R2.5とC10R5を比較すると、拘束圧の大きい供試体C10R5でより大きなすべりが生じていることがわかる。これは、供試体C10R2.5の軸方向鉄筋の質量減少率が供試体C10R5よりも3%程度小さいためと考えられる(表-3)。すなわち、本研究の範囲内では、拘束圧よりも鉄筋の質量減少率の影響の方がすべりに対して支配的であったと推察される。

4. まとめ

本研究では、RCはりの定着部を模擬した供試体を作製し、腐食の有無、補強方法の種類をパラメータとして、はり型引抜き载荷試験を実施した。

以下に、本研究で得られた結論を述べる。

- 1) 定着長350mmの健全供試体は軸方向鉄筋が降伏したが、質量減少率10%の腐食を導入した供試体は付着割裂破壊を呈した。また、腐食供試体に直角方向の補強筋、拘束圧、連続繊維シートを導入することにより、鉄筋降伏するまでに定着強度が回復した。
- 2) 10%の腐食を導入した供試体におけるひび割れ幅は、健全供試体よりも増加し、直角方向の補強筋を導入した供試体はさらに増加した。これは、直角方向の補強筋が腐食したことにより生じたひび割れが载荷により多数発生し、各ひび割れ幅の総和が増加したためと考えられる。
- 3) 弾性係数が大きい連続繊維シート(高弾性炭素繊維

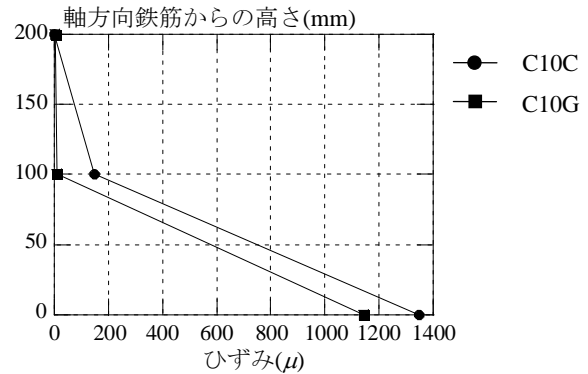


図-16 ピーク時のシートのひずみ分布(高さ方向)

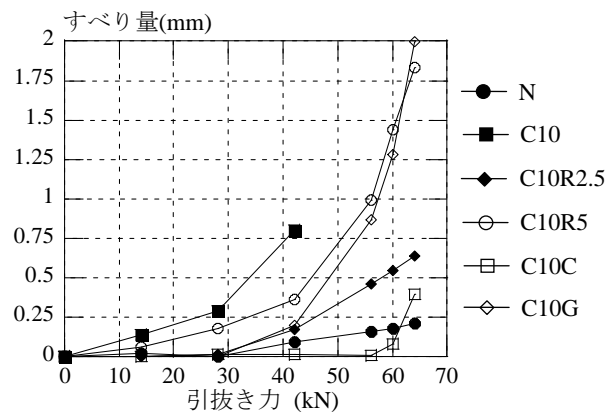


図-17 引抜き力作用点における鉄筋のすべり量

シート)を巻き立てた供試体は、小さいもの(ガラス繊維シート)より腐食ひび割れの進展および拡幅を抑えることができた。

- 4) 健全供試体と比較して、10%の腐食を導入した供試体の引抜き力作用点における軸方向鉄筋のすべり量は増大したが、各補強方法を適用することにより、これを抑えることに成功した。特に高弾性炭素繊維シートで補強したものは、健全供試体と比較しても遜色がないほどすべり量を小さくすることができた。

謝辞

本研究で使用した軸方向鉄筋は東京鐵鋼株式会社より、また連続繊維シートは日鉄コンポジット社より提供して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 森 誠, 松本浩嗣, 二羽淳一郎: 直角方向の補強筋および拘束圧がコンクリート中の異形鉄筋の付着性に及ぼす影響, 土木学会第66回年次学術講演会, V-136, pp. 271-272, 2011.9.
- 2) 日本コンクリート工学会: JCI 規準集 (1977-2002), pp. 91-94, 2004