

論文 促進腐食により塩害劣化した RC 部材の鉄筋腐食状態とせん断耐荷性能の評価

笠松 大輔^{*1}・森川 英典^{*2}・小林 秀恵^{*3}・湯淺 康史^{*4}

要旨：異なる暴露環境下で塩害を受けた RC はりのせん断耐荷性能を評価するために、打設から 5 年間促進腐食を行い塩害劣化させた RC はりを用いて外観調査，載荷試験，内部鉄筋調査を行った。その結果，引張鉄筋の腐食状況によっては，せん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行することでせん断耐力が増加する可能性があることが示された。また，実環境での供用を模して屋外で暴露された場合では，鉄筋の腐食は比較的小さく，かつ一様に進行せず，耐力の増加は生じない結果となった。

キーワード：RC 部材，塩害，せん断耐荷性能，促進腐食，局部腐食

1. はじめに

近年，塩害による RC 建造物の劣化に伴い建造物内部の鉄筋腐食が建造物の性能低下を引き起こすことが，社会問題となっている。塩害の進行により内部鉄筋の腐食が進み腐食ひび割れが発生することは，鉄筋の付着の低下に伴う耐荷機構の変化や，腐食ひび割れによる載荷ひび割れ経路の変化など，せん断耐力に大きな影響を及ぼすことが考えられる。このことから，塩害劣化した RC 建造物のせん断耐荷性能を評価するに当たり，佐藤ら¹⁾の電食による手法や，橋本ら²⁾の切削による手法，山本ら³⁾の塩水散水による手法など，様々方法で鉄筋に模擬腐食を施した実験が数多く行われている。しかしながら，これらの模擬腐食は実際の腐食を正確に表現できていない可能性があり，実現象との乖離が考えられる。そこで本研究では，より実橋梁に近い腐食状態にある RC 部材のせん断耐荷性能を評価するために，5 年間促進腐食を行い塩害劣化させた供試体を用いて，外観調査，載荷試験，内部鉄筋調査を行った。

2. 供試体概要

供試体の寸法および配筋は図 - 1 に示すような 150 × 220 × 1200mm の矩形断面 RC はりで，引張鉄筋に D16 を 3 本，圧縮鉄筋に D13 を 2 本，スターラップに D6 を 225mm 間隔で，スパン内にスターラップが 1 本入るように設計した。また，塩害劣化を促進させるために内在塩分として 6.0kg/m³ の塩化物イオンを導入し，目標コンクリート強度 15N/mm² で打設を行った。供試体は 2 体を同時期に作成し，ともに打設後 1 年間はスチーム室（温度 60 ，湿度 100% の湿潤環境で 3 日間，その後 4 日間乾

燥），2～3 年目は地下室（温度 60 ，湿度 80%）で暴露した。4～5 年目は供試体により暴露方法が異なり，一方は圧縮側を上面とし屋外で暴露，もう一方は乾湿繰返し環境（温度 60 ，湿度 100% の湿潤環境で 3 日間，その後温度 18 で 4 日間乾燥）で屋内にて暴露を行った。今後，屋外で暴露したものを C1 供試体，乾湿繰返し環境で暴露したものを C2 供試体とする。

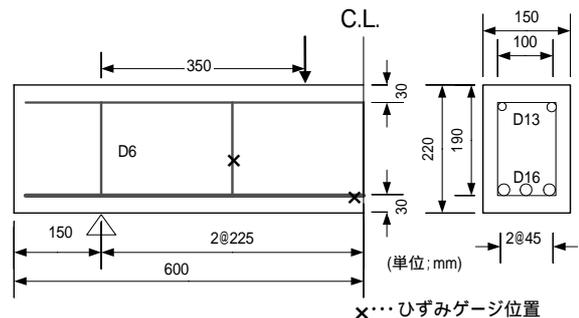


図 - 1 供試体寸法図およびひずみゲージ貼り付け位置

3. 外観調査および内部鉄筋調査

3.1 外観調査

それぞれの方法で促進腐食を行った後，ひび割れの発生状況について調査を行った。図 - 2 に腐食ひび割れ図および鉄筋名称を，表 - 1 に解体時に計測した鉄筋のかぶりを示す。ここで，ひび割れ幅は最小 0.05mm まで計測できるクラックスケールを用いて計測しており，図 - 2 中の実線はひび割れ幅 0.5mm 以上，破線は 0.5mm 未満であることを示している。図中に示す数字は，各鉄筋での最大ひび割れ幅である。また，圧縮鉄筋を A，引張鉄

*1 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 工博 (正会員)

*3 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 技術職員 (正会員)

*4 西日本旅客鉄道株式会社 (正会員)

筋を B, スターラップを St で示し, 今後鉄筋の名称はこれに従うものとする。この図から, 圧縮鉄筋に沿ったひび割れは C1, C2 とともに側面全体に広がっており, 圧縮鉄筋は両供試体とも一様に大きく腐食しているものと考えられる。対して, 引張鉄筋に沿ったひび割れ発生状況には供試体間で差異が見られる。C1 はかぶりの小さい側面にひび割れは観察されるが, 底面にはほとんどひび割れは発生していない。しかし, C2 では側面, 底面ともに引張鉄筋に沿った C1 に比べて比較的一様なひび割れが観察される。腐食ひび割れの発生により鉄筋の付着力が低下することを考慮すると, C1 は鉄筋ごとに付着のばらつきが発生しているものと考えられることに対し, C2 では引張鉄筋は 3 本とも軸方向に一様に付着が低下しているものと考えられる。

また, 外観調査からはスターラップに沿ったひび割れは観察されなかった。このことから, スターラップの付

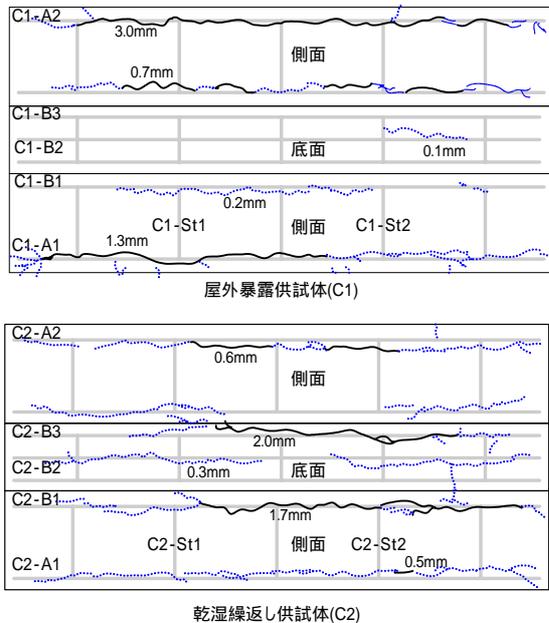


図 - 2 腐食ひび割れ図

表 - 1 鉄筋かぶり (解体時計測)

	鉄筋種類	上面・底面かぶり (cm)	側面かぶり (cm)
屋外暴露 (C1)	C1-A1	3.50	2.35
	C1-A2	3.27	2.07
	C1-B1	3.00	2.84
	C1-B2	2.93	
	C1-B3	3.06	2.02
	C1-St1		1.90
乾湿繰返し (C2)	C2-A1	4.12	2.16
	C2-A2	4.48	2.15
	C2-B1	3.24	1.89
	C2-B2	2.97	
	C2-B3	2.98	2.71
	C2-St1		1.03
	C2-St2		1.57

着低下はほとんど発生していないものと考えられ, また松尾ら⁴⁾が示している, スターラップに沿ったひび割れによるせん断ひび割れ進展の阻害は起こらないものと推測される。

3.2 鉄筋採取による内部鉄筋の腐食劣化状態の評価

(1) 腐食面積率による評価

載荷試験を行った後, 供試体を解体し内部鉄筋はつりだし, 鉄筋の腐食面積率の調査を行った。はつり出した鉄筋の一例を写真 - 1 に示す。腐食面積率は表 - 2 に示す腐食判定基準を用いて, グレード 3 以上を腐食していると見なして評価を行った。また, 引張鉄筋および圧縮鉄筋は, 軸方向に 4 等分に分割し評価を行った。C1 の結果を表 - 3 に示す。ここで, C2 は判定基準から全ての鉄筋において腐食面積率を 100%と判定している。これから C1, C2 とともに大きな腐食面積率を示しているが, 屋外暴露を受けた C1 のほうが腐食が不均一であることが分かる。特に引張鉄筋について考えると, ある区間においては 100%を記録しているが他の区間では



写真 - 1 供試体内部鉄筋例 (除錆後)

表 - 2 腐食判定基準

グレード	錆の状態
1	腐食がなく黒皮の状態
2	表面にわずかの点錆が生じている状態
3	薄い浮き錆が広がっており, 鉄筋に付着している状態
4	膨張性の錆が生じているが, 断面欠損は比較的少ない状態
5	著しい膨張性の錆が生じており, 断面欠損がある状態

表 - 3 腐食面積率 (C1 のみ)

	分割区間	腐食面積率 (%)		分割区間	腐食面積率 (%)
C1-A1	a	85.1	C1-B1	a	70.0
	b	71.6		b	76.3
	c	94.7		c	100.0
	d	100.0		d	64.7
	平均	87.9		平均	77.5
C1-A2	a	100.0	C1-B2	a	94.6
	b	100.0		b	77.3
	c	100.0		c	58.7
	d	76.4		d	72.0
平均	94.1	平均	75.8		
	C1-St1	100.0	C1-B3	a	81.1
	C1-St2	77.6		b	100.0
				c	76.1
				d	99.5
			平均	89.1	

58.7%とかなり小さい値を示すなど、鉄筋の腐食はC2に比べて軸方向に分布が存在していることが分かる。また、ひび割れ調査からはスターラップに沿ったひび割れは観察できていなかったものの、腐食面積率で見ると両供試体とも大きく腐食しており、スターラップの性能は健全状態より低下していることが推定できる。

(2) 腐食減量率による評価

腐食面積率の評価を終えた後、鉄筋を10%クエン酸二アンモニウム溶液に常温で約2日間浸漬することで、除錆を行った。日本コンクリート工学協会基準(JCI-SC1)にはこの溶液を60に保って24時間浸漬することとあるが、この方法では腐食していない部分まで溶出させる恐れがあったため、常温で浸漬することでその影響を少なくとどめることとした。除錆が終わった鉄筋の断面を丁寧に処理し、ノギスを用いて長さを計測した後重量計測を行い、単位長さあたりの重量から腐食減量率を求めた。

結果を表-4に示す。全体的に乾湿繰返しを受けたC2のほうが、腐食減量率が大きくなる結果が得られた。C2においては、圧縮鉄筋、引張鉄筋とも同程度の腐食量を示していることがわかる。また、スターラップは腐食減量率10%以上であり、非常に大きい値を示している。しかしながら、事前に行ったひび割れ調査ではスターラップに沿ったひび割れは観察されていない。スターラップにD6を用いていることから、鉄筋径が小さい場合、腐食が進行し腐食減量率がある程度大きくなっても腐食ひび割れを形成するのに十分な腐食生成物が発生せず、ひび割れが形成しないものと考えられる。

平均の腐食減量率で比較すると、圧縮鉄筋の腐食減量率はC1とC2でそれほど大きな差はない。しかしながら、1本あたりの腐食減量率で見ると屋外暴露で促進腐食を行ったC1は2本間に差があることがわかる。また、引張鉄筋においては大きな差があり、腐食減量率の標準偏差がC1で0.94、C2で0.81とC1のほうが腐食にばらつきがあるといえる。これは、C2は供試体全面から満遍なく水分と酸素の供給を受けることにより、均一な鉄筋腐

食が進んだと考えられる。対してC1は屋外にて圧縮鉄筋側を上面として暴露されており、降雨や日照などといった天候の影響に偏りが生じたものと考えられる。そのため、降雨により十分な水分の供給が行われたと考えられる圧縮鉄筋は大きな腐食量を示しているが、引張鉄筋側には十分な水分供給が行われずそれほど腐食が進行しなかったものと考えられる。

図-3に鉄筋かぶりと腐食減量率の関係を示す。ここでの鉄筋かぶりは、内部鉄筋をはつりだす際に計測した実際のかぶりを、それぞれ鉄筋毎に平均化したもの(表-1)とする。また、側面と底面あるいは上面の二面に面している鉄筋に関しては、その平均値の小さいほうのかぶりを用いている。これによると、かぶりと腐食減量率には負の相関があり、かぶりが大きくなると腐食減量率が小さくなる傾向が見て取れる。これは実構造物における加藤らの研究⁵⁾結果と同様の傾向であり、このことより十分なかぶりの確保が部材内部の鉄筋を健全に保つことにつながると言える。また、C1とC2を分けて比較を行った場合、屋外暴露を行ったC1のほうがかぶりによる腐食減量率への影響が大きくなっていると言える。このことから、ある程度のかぶりが確保されている場合、同期間の促進腐食であっても乾湿繰返し環境に比べ屋外暴露環境は腐食の進展が遅くなると考えられる。

(3) 局所的な断面減少の発生状況による評価

これまでの評価において、屋外暴露環境と乾湿繰返し環境では鉄筋の腐食分布形状に差異が生じている可能性について述べてきた。そこで、このような局所的な腐食の発生状況を調べるために、鉄筋を10cm間隔で区切り、区切り位置、およびその区間での最小直径をノギスで計測し、断面減少率を求めた。なお、使用した鉄筋は異形棒鋼であり、公称断面積から断面減少率を求めることはできない。そこで、健全鉄筋においても同様の方法で直径を計測し、その比較により断面減少率を求めた。また、この検討は引張鉄筋、圧縮鉄筋に対してのみ行った。

既往の研究⁵⁾において、塩害により劣化した実構造物

表-4 腐食減量率

	鉄筋種類	腐食減量率(%)	平均(%)
屋外暴露 (C1)	C1-A1	6.72	8.08
	C1-A2	9.43	
	C1-B1	2.76	
	C1-B2	2.83	3.46
	C1-B3	4.78	
	C1-St1	10.46	8.03
	C1-St2	5.60	
乾湿繰返し (C2)	C2-A1	8.55	8.68
	C2-A2	8.82	
	C2-B1	8.27	7.86
	C2-B2	8.60	
	C2-B3	6.73	
	C2-St1	10.74	10.42
	C2-St2	10.11	

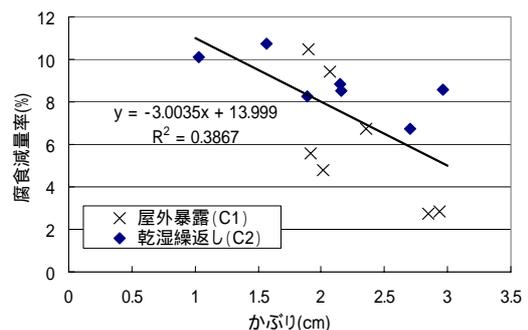


図-3 かぶり-腐食減量率

から採取した鉄筋には、平均断面減少率と最大断面減少率に相関が見られることが示されている。図-4に、本研究の供試体から得られた結果と既往の研究から得られている関係式を示す。このことから、今回の実験は、実現象に比べるとやや厳しい条件であると言えるが、実際の塩害劣化を良く模擬できていると考えられる。また、C1の結果のみに注目すると、平均断面減少率が小さい段階にも大きな断面減少が発生しており、C1における局所的な腐食の発生がうかがえる。

次に、局所的な腐食の発生頻度について評価を行った。しかし、比較を行う鉄筋ごとに全長の平均腐食減量率が異なるため、直接腐食量の発生頻度で比較をすることはできない。そこで、式(1)に示すように平均腐食減量率からの偏差により比較を行った。

$$d_i = \frac{\Delta w_i - \Delta w}{\Delta w} \quad (1)$$

ただし、 d_i ：計測点*i*での腐食量偏差

Δw_i ：計測点*i*での腐食減量率(%)

Δw ：鉄筋1本あたりの平均腐食減量率(%)

結果を図-5に示す。この結果、C2は平均腐食減量率に近い0.5を中心に対称に分布しているが、C1は腐食が大きいくらいに非対称に分布している。また、腐食減量率がほぼ同程度であった圧縮鉄筋の頻度分布を図-6に、腐食減量率の差が大きかった引張鉄筋の頻度分布を図-7に示す。圧縮鉄筋に関しては分布のばらつきが少なく、標準偏差がC1で0.78、C2で0.72と、暴露環境による大きな差は見られない結果となった。対して、引張鉄筋に関しては分布形状に明確な差が有り、C1で1.29、C2で0.70と腐食にばらつきが生じていることが見て取れる。これらから、鉄筋一本当たりの平均腐食減量率が比較的小さい段階では腐食の発生状況は不均一であるが、腐食減量率が大きくなると暴露環境による腐食の分布形状に明確な差異が見られなくなるという可能性が考えられる。しかしながら、せん断耐荷機構に大きな影響を与えると考えられる引張鉄筋については、同期間の促進腐食を受けたとしても暴露環境によって腐食減量率および腐食分布に明確な違いがみられている。これより、実環境に近い屋外暴露環境で塩害を受けた場合、腐食は比較的小さく、一様ではなく局所的に進行する傾向にあると考えられる。

4. せん断耐荷性能評価

4.1 荷重試験概要

荷重試験は、等曲げスパン 200mm とした中央 2 点荷重でせん断スパン比を 1.84 とした。また、外観調査から両供試体ともに引張鉄筋に沿った大きなひび割れが観察されており、引張鉄筋の定着不良により破壊すること

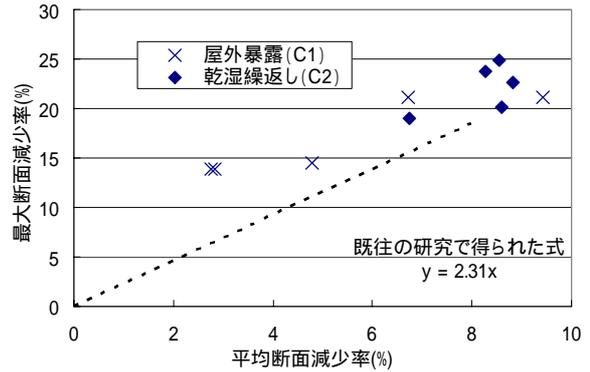


図-4 平均と最大断面減少率

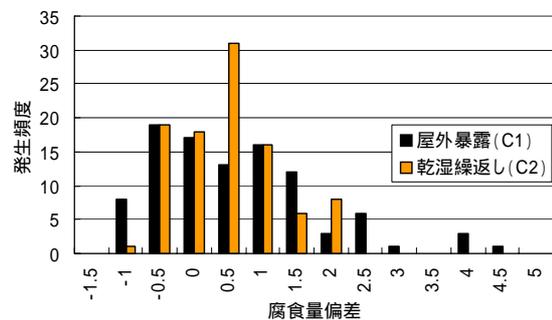


図-5 局所的な腐食の発生頻度（合計）

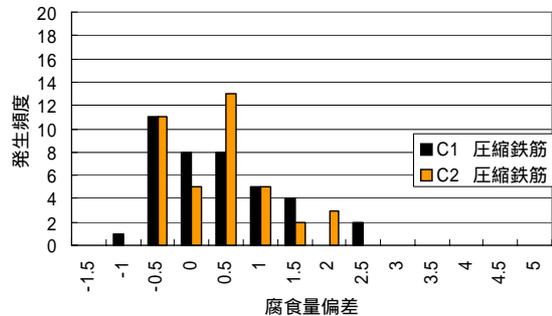


図-6 局所的な腐食の発生頻度（圧縮鉄筋）

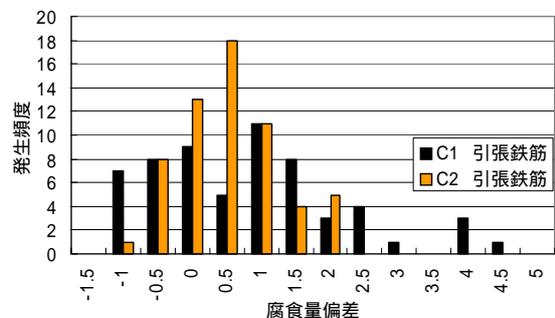


図-7 局所的な腐食の発生頻度（引張鉄筋）

が懸念され、正確なせん断耐力の評価ができないことが想定された。そのため、載荷試験を行う前に支点外側のコンクリートを一部はつり、3本の引張鉄筋を溶接することで機械的な定着を確保し、その後エポキシ樹脂モルタルで埋め戻した。また、鉄筋のひずみゲージ貼り付けに際しては、せん断耐荷機構に影響を与えないように慎重にコンクリートをはつり出し貼り付けを行い、その後エポキシ樹脂モルタルで埋め戻した。支点、載荷点位置、およびひずみゲージ貼り付け位置は図-1に併せて示している。

4.2 促進腐食を受けた供試体の力学的性質

今回用いた供試体は打設から約5年が経過しており、打設時と力学的特性が異なっている可能性がある。そこで、同時期に打設されC1と同様の促進腐食を受けた100×200mmの円柱供試体を用いて圧縮試験を行った。表-5に結果を示す。打設後長期間経過することにより、内部セメントの水和が十分に進行し、打設時の目標コンクリート強度を上回る結果となった。

また、腐食した鉄筋の力学的性質については、李らの研究⁶⁾により示されている算出式を用いて前述の腐食減量率から降伏強度を求めた。算出式を式(2)に、結果を表-6に示す。

表-5 促進腐食後の円柱供試体圧縮試験結果

打設時	促進腐食後		
	目標コンクリート強度(N/mm ²)	圧縮強度(N/mm ²)	静弾性係数(kN/mm ²)
15.0	20.04	22.72	

表-6 腐食後鉄筋降伏強度

		健全時鉄筋降伏強度(N/mm ²)	腐食減量率(%)	腐食後鉄筋降伏強度(N/mm ²)
屋外暴露(C1)	スターラップ	269.3	8.03	226.5
	圧縮鉄筋	303.6	8.08	255.0
	引張鉄筋	340.6	3.46	317.2
乾湿繰返し(C2)	スターラップ	269.3	10.42	213.7
	圧縮鉄筋	303.6	8.68	251.4
	引張鉄筋	340.6	7.86	287.6

$$f_{cy} = (1 - 1.98 \cdot \Delta w / 100) \cdot f_{sy} \quad (2)$$

ただし、 Δw : 腐食減量率(%)

f_{cy} : 腐食後の鉄筋降伏強度(N/mm²)

f_{sy} : 健全時の鉄筋降伏強度(N/mm²)

以後、せん断耐力の評価を行うにあたり、コンクリート圧縮強度および鉄筋降伏強度はこの値を用いる。

4.3 載荷試験結果

表-7に載荷試験結果、二羽式⁷⁾による評価値との比較を、図-8に荷重-たわみ曲線を示す。ここで、実験値のコンクリート分担荷重 V_c は最大荷重 V_{max} からスターラップ分担荷重 V_s を差し引くことで求めている。最大荷重に関して比較すると、C2がC1を大きく上回る結果となっており、促進腐食方法の違いによりせん断耐力に明確な差が生じる結果となった。

C1に関しては V_{max} 、 V_c ともに評価値と比較的合う結果となっており、せん断耐荷機構の変化は起こっていないと推測できる。対して、C2は V_{max} 、 V_c ともに評価値を上回る値を示している。特に V_c が評価値を大きく上回っていることから、せん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行したものと思われる。この違いは、促進腐食環境の差異による引張鉄筋の付着性能の違いによるものと考えられる。前述の通り、乾湿繰返し環境下では腐食が一樣に進行し、鉄筋に沿ったひび割れが発生することで引張鉄筋の付着が比較的均一に低下したため、C2はせん断耐荷機構が一部アーチ機構に移行したと考えられる。対して、屋外暴露環境下では腐食が局所的に進行したため、軸方向に一樣な腐食ひび割れが形成されず、引張鉄筋の付着性状が不均一になっていたため、C1はアーチ機構に

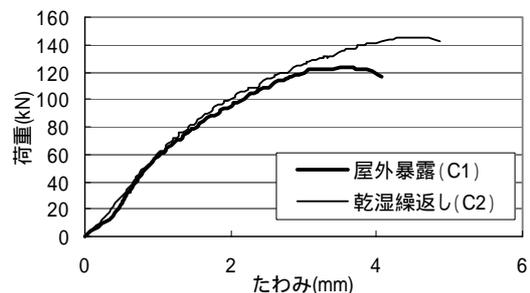


図-8 荷重-たわみ曲線

表-7 載荷試験結果および二羽式による評価値との比較

供試体名	腐食減量率(%)		実験値(kN)			実験値/二羽式評価値		
			V_c	V_s	V_{max}	V_c	V_s	V_{max}
屋外暴露(C1)	スターラップ	8.03	94.4	28.7	123.1	1.04	1.00	1.03
	引張鉄筋	3.46						
乾湿繰返し(C2)	スターラップ	10.42	118.0	27.0	145.0	1.30	1.00	1.23
	引張鉄筋	7.86						

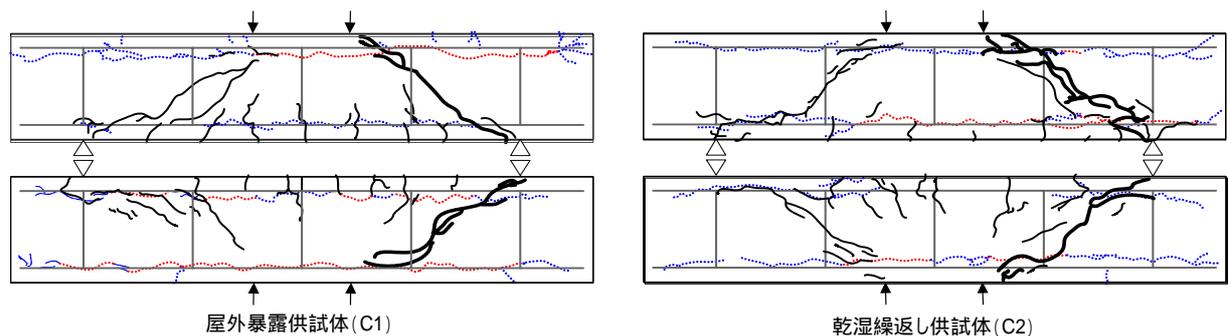


図 - 9 荷重ひび割れ図 (実線：荷重ひび割れ，破線：腐食ひび割れ)

移行しなかったものと推察される。さらに、両供試体ともスターラップの腐食は大きいですが、腐食後の降伏強度を考慮した評価値よりもせん断耐力が大幅に低下することはなかった。このことから、スターラップの腐食はせん断耐力機構に大きな影響を与えなかったものと考えられる。これはスターラップの腐食に伴う腐食ひび割れが存在していないため、付着力の大幅な低下がなかったことによるものと推察される。

図 - 9 に腐食ひび割れと荷重試験によるひび割れ図を示す。荷重ひび割れは、腐食ひび割れの影響を受け複雑な経路を示しており、側面ごとに状況が異なるため、ここでは両側面のひび割れ状況を示す。ここで、腐食ひび割れは破線で、荷重試験によるひび割れを実線で示し、特に破壊に対して支配的なひび割れについては太線で表示している。また、腐食ひび割れは、ひび割れ幅 0.5mm 以上を赤、0.5mm 未満を青の破線で示している。曲げひび割れについて比較すると、C1 に比べ C2 はひび割れの分散性が小さいことがうかがえる。このことから、C2 の主鉄筋の付着性状は一樣に小さくなっており、せん断耐力機構が一部アーチ機構に移行することにより耐荷したものと推察できる。斜めひび割れは、腐食ひび割れに誘導されている箇所もあり、ひび割れ経路はやや複雑なものになっているが、C1、C2 とともに概ね支点と荷重点を結ぶ直線上に発生していると言える。

5. まとめ

以下に、今回の検討で得られた知見をまとめる。

- (1) 本研究でスターラップに用いたような径の小さい鉄筋が大きく腐食しても、コンクリート表面に腐食ひび割れは発生せず、スターラップの極端な付着低下は起こらないため、スターラップの腐食はせん断耐力機構に明確な影響を及ぼさないという可能性を示した。
- (2) 引張鉄筋が腐食し、ひび割れを生じることで付着が低下し、その範囲が一樣であれば、せん断耐力機構

が一部アーチ機構に移行することでせん断耐力が増加する可能性があることが分かった。

- (3) 実環境に近い屋外暴露環境では、設置条件により腐食の進行が鉄筋ごとにばらつき、特に腐食量が小さい場合は、腐食の進行が局所的であり付着低下が一樣でないため、アーチ機構へ移行することによるせん断耐力の増加は生じにくい可能性を示した。

参考文献

- 1) 佐藤吉孝，山本貴士，服部篤史，宮川豊章：せん断補強筋および主筋の腐食が RC 部材のせん断耐力特性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.821-836，2003.
- 2) 橋本航，森川英典，小林秀恵：鉄筋腐食を考慮した RC はり部材のせん断耐力性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1009-1014，2003.
- 3) 山本貴士，佐藤吉孝，服部篤史，宮川豊章：鉄筋腐食 RC はりのせん断耐力挙動に関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.913-918，2005.
- 4) 松尾豊史，酒井里哉，松村卓郎，金津努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐力機構に関する研究，コンクリート工学論文集 第 15 巻 第 2 号 pp.69-77，2004.5.
- 5) 加藤絵万，岩波光保，横田弘，守分敦郎：塩害を受けた栈橋上部工の劣化状況のばらつきに関する検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.911-916，2006.
- 6) 李翰承，友澤史紀，野口貴文，鹿毛忠継：有限要素法による鉄筋の腐食した RC 梁の耐力性能評価，第 19 回コンクリート工学年次論文報告集，No.1，pp.1147-1152，1997.4.
- 7) 二羽淳一郎，崔益暢，田辺忠顕：鉄筋コンクリートはりのせん断耐力機構に関する解析的研究，土木学会論文集，No.508/V-26，pp.131-176，1995.