

# 論文 鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐荷性状におけるせん断スパン比の影響について

薛 昕\*1・広森 紳太郎\*2・関 博\*3

**要旨:** 軸引張鉄筋の腐食による付着低下とRCはりのせん断耐荷性状との関係におけるせん断スパン比の影響を実験により検討した。実験要因は、せん断スパン比、鉄筋腐食レベル、スターラップの有無である。実験結果から以下のような知見が得られた。スターラップがなく、a/dが2.6の場合、鉄筋の付着低下により耐荷力が増加したが、a/dが1.5の場合、耐荷力はほとんど変化しなかった、a/dが4.0の場合、耐荷力が減少した。スターラップがある場合、鉄筋の付着低下により耐荷力が増加した。その中に a/d が 2.6 の場合の増加率が一番大きいことが確認された。

**キーワード:** せん断スパン比, せん断耐荷性状, 鉄筋腐食, 付着低下, アーチ機構, スターラップ

## 1. はじめに

RC 構造物において、塩害、中性化などによる鉄筋の腐食により部材の構造性能低下につながる研究から明らかにされている<sup>1)</sup>。

鉄筋腐食が RC はりの曲げ耐荷性能に与える影響についての研究例は多いが、せん断耐荷性能に関する研究例は少ないのが現状である。鉄筋が腐食したはり部材のせん断耐力を適切に評価するためには、より多くの実験データの蓄積が必要である。鉄筋の腐食が進行すると、断面の減少以外に、腐食ひび割れの発生、付着強度の低下などを引きこす。これらの劣化性状ははり部材のせん断力、破壊モードなどの耐荷性状に大きな影響を及ぼすと考えられる。特に軸引張鉄筋の腐食による付着低下、腐食ひび割れの発生などは部材の部材の剛性低下、せん断耐荷機構変化などを引き起こすことが既往の研究で明らかになっている<sup>2), 3)</sup>。しかし、既往の研究は主にせん断スパン比が2~3の供試体を対象とし、せん断スパン比が2より小さいあるいは3より大きいはり部材に関する実験データが不足しているのが現状である。健全な供試体の耐荷性状はせん断スパン比の影響を受けるが、鉄筋が腐食した場合には、軸引張鉄筋の付着低下の影響も加わり、耐荷メカニズムはより複雑になると考えられる。劣化した部材のせん断耐力を適切に評価できる手法を構築するためには、せん断スパン比の影響を調査し、耐荷メカニズムを解明することが不可欠である。

そこで、本研究では、せん断スパン比、鉄筋の腐食、スターラップの有無をパラメータとして実験を行い、研究データが不足しているせん断スパン比の小さいあるいは大きい供試体を加えて考察するとともに、既往の研

究を検証することを目的とした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

表-1 に供試体一覧、図-1 に供試体概略を示す。供試体の断面は 120mm×240mm である。せん断破壊を先行させるため、軸引張鉄筋に高強度のねじ節鉄筋 D19 を使用した。すべての供試体の軸引張鉄筋の鉄筋比は 2.17%である。φ3 の鉄線を組立鉄筋として用いた。スターラップは SR235 の φ6 を使用した。コンクリートの配合及び鉄筋の特性は表-2 に示す。腐食による端部の定

表-1 供試体一覧

	番号	供試体名	a/d	$P_w$ (%)	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食 レベル
P- はり	①	P-A0	1.5	0	28.7	健全
	②	P-A1			35.1	小
	③	P-A2			36.8	大
	④	P-B0	2.6		33.1	健全
	⑤	P-B1			35.1	小
	⑥	P-B2			36.2	大
	⑦	P-C0	4.0		35.2	健全
	⑧	P-C1			34.7	小
	⑨	P-C2			33.7	大
S- はり	⑩	S-A0	1.5	0.39	28.7	健全
	⑪	S-A1			37.0	小
	⑫	S-A2			36.0	大
	⑬	S-B0	2.6		33.1	健全
	⑭	S-B1			35.1	小
	⑮	S-B2			35.9	大
	⑯	S-C0	3.2		35.2	健全
	⑰	S-C1			34.9	小
	⑱	S-C2			33.3	大

$f'_c$  : 載荷時コンクリート強度  $P_w$  : スターラップ配筋率

\*1 早稲田大学 大学院理工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

\*2 早稲田大学 大学院理工学研究科 建設工学専攻 (学生会員)

\*3 早稲田大学 理工学術院社会環境工学科教授 工博 (フェロ)

着破壊を避けるため、軸引張鉄筋を供試体の端部より出して鉄板及びナットで固定した。スターラップの腐食をできるだけ避けるため、軸引張鉄筋とスターラップとの接触箇所には絶縁処理を行った。

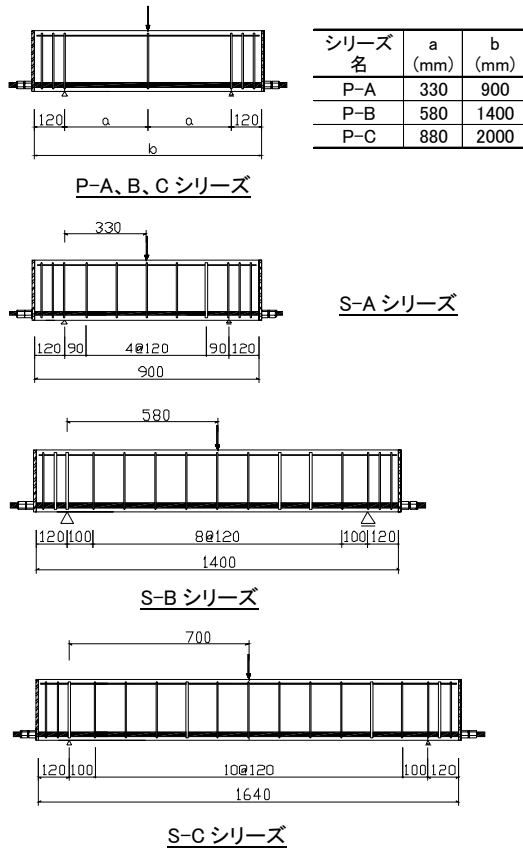


図-1 供試体概略

表-2 材料物性

コンクリートの配合(単位: kg/m³)

セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
387	186	881	842	5.8

鉄筋の特性

種別	規格	断面積 (mm²)	降伏強度 (N/mm²)
D19	USD685A	287	706
φ6	SR235	28	300

## 2.2 腐食促進方法

短期間で鉄筋の腐食を模擬するため、電食試験を行った。図-2 に電食の概略を示す。すべての供試体で軸引張鉄筋を電食対象とした。供試体内部の鉄筋、外側の銅板をそれぞれ外部直流電源の-と+に接続した。積算電流量は目標腐食量からファラデー法則に基づいて電食係数を考慮して計算した。載荷試験が終了後、鉄筋を取り出して除錆作業を行った後に、測定した鉄筋の重量差

を平均腐食減量とした。

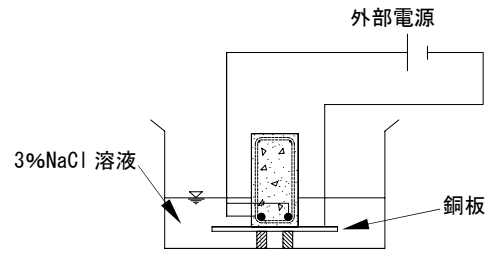


図-2 電食概略図

## 2.3 載荷方法

載荷方法は3点曲げ載荷とした。載荷試験の概略は図-3 に示す。測定項目は、スパン中央断面下部のたわみ、鉄筋のひずみ及びせん断ひび割れの進展状況とした。

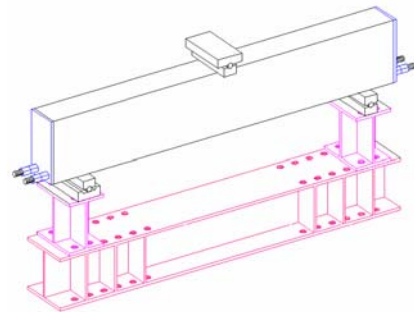


図-3 載荷概略図

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 せん断スパン比 a/d=1.5

#### (1) P-A シリーズ (スターラップがない)

表-3 に実験結果を示す。電食試験が終了した後、供試体の腐食性状を確認したところ、軸引張鉄筋に沿うひび割れがすべての供試体に確認された。腐食レベルが小さい場合、比較的均一な腐食性状を呈しているが、腐食進行に従い不均一な腐食が発生した。載荷試験の破壊性状としては、P-A シリーズのすべての供試体で斜めひび割れがはりの上下面を貫通することにより耐力を失った(以後、この様な破壊モードを割裂破壊と呼ぶ)。せん断強度のコンクリート強度による影響を取り除くため、既往の研究<sup>4)</sup>によりせん断強度  $\tau$  を  $f_c^{(2/3)}$  で除した結果を表-3 に示す。各供試体の鉄筋の腐食状況は異なったが、 $\tau/f_c^{(2/3)}$  の値はほとんど同じである。

表-3 P-A シリーズ実験結果

	$f'_c$ (N/mm²)	腐食減量 (%)	せん断耐力 $V_u$ (KN)	$\frac{\tau}{f_c^{(2/3)}}$
P-A0	28.7	-	84.5	0.34
P-A1	36.8	6.7	97.9	0.34
P-A2	36.8	10.4	100.4	0.34

$\tau$ : せん断強度,  $\tau = V_u/bd$

図-4 に破壊時のひび割れ図を示す。腐食ひび割れを点線、終局に繋がるひび割れを太い線で表す。健全供試体には、載荷点と支点とを結ぶ線に沿ったひび割れが発生した。腐食した供試体の場合、載荷点の付近に傾きが急である斜めひび割れが発生したが、斜めひび割れが下部へ進展し、腐食ひび割れ付近で傾きが緩やかになった後、支点方向に進展した。各供試体のひび割れパターンに相違があったが、載荷点から支点への力の伝達経路は同様であるため、各供試体とも割裂破壊が発生した。耐荷機構及び破壊モードは同様であるため、コンクリート強度で修正したせん断強度の差がほとんどない。

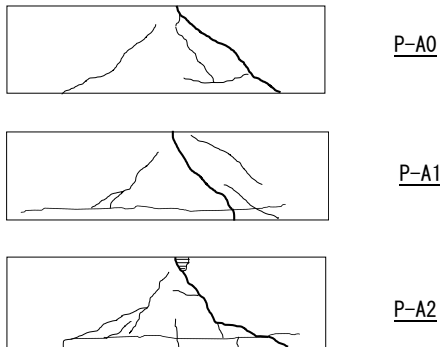


図-4 P-A シリーズ終局ひび割れ図

(2) S-A シリーズ(スターラップがある)

表-4 に実験結果を示す。電食試験終了後、すべての電食供試体に軸引張鉄筋に沿うひび割れが確認された。除錆作業の終了後、スターラップの腐食も確認された。すべての供試体の破壊モードはせん断圧縮破壊である。健全供試体と比べ、腐食した供試体のせん断耐力が若干増加した。

表-4 S-A シリーズ実験結果

供試体	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食減量(%)		せん断耐力 $V_u$ (KN)
		軸鉄筋	スターラップ	
S-A0	36.0			108.3
S-A1	37.0	6.4	4.8	124.3
S-A2	36.0	9.6	4.4	115.0

図-5 に終局ひび割れ図を示す。健全供試体では、トラス機構が腐食供試体より大きいと思われる。腐食供試体では、傾きが急である1本の斜めひび割れのみが発生したため、圧縮力が直接支点到に伝達されるいわゆるアーチ的な耐荷機構が大きいと考えられる。また、スターラップの配置により斜めひび割れが腐食ひび割れまで進展し、付着ひび割れに発展しないため、頑丈なアーチ機構が形成され、圧縮部コンクリートが圧壊まで荷重を耐え続けた。スターラップの配置はアーチ機構の形成に有効に働き、はりの耐力を増加させたと考えられる。既往の研究もこの可能性を指摘している<sup>5)</sup>。

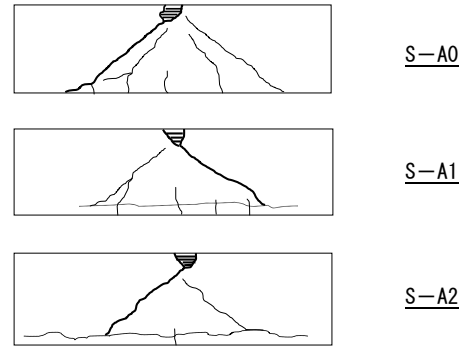


図-5 S-A シリーズ終局ひび割れ図

3.2 せん断スパン比  $a/d=2.6$

(1) P-B シリーズ (スターラップがない)

表-5 に実験結果、図-6 に荷重-変位関係を示す。中央下部のたわみを変位はとした(以下同)。電食試験後、すべての電食供試体に軸引張鉄筋に沿うひび割れが確認された。各供試体の破壊モードは異なった。腐食減量の増加に従い、破壊モードは斜め引張破壊からせん断圧縮破壊、曲げ破壊の順に変わり、破壊荷重も腐食量が大きいほど増加した。一方、腐食減量が増加すると、軸引張鉄筋の付着低下によりテンションスティフニング効果が弱くなり部材の剛性が低下した。

表-5 P-B シリーズ実験結果

	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食減量 (%)	破壊荷重 $P_u$ (KN)	せん断耐力 $V_u$ (KN)	破壊モード
P-B0	33.1		86.4	43.2	斜め引張
P-B1	35.1	7.0	101.4	50.7	せん断圧縮
P-B2	36.2	13.9	111.0	—	曲げ

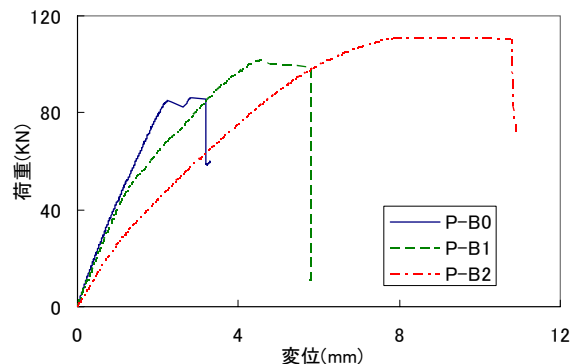


図-6 荷重-変位関係

図-7 に終局ひび割れ図を示す。健全供試体と比べ、軸引張鉄筋の腐食減量が大きいほど、斜めひび割れの傾きが急になり、発生場所が載荷点に近づくことが確認された。これは、鉄筋の付着低下により鉄筋が負担する引張力がコンクリートに伝達しにくくなったため、テンションスティフニング効果が減少すると共にせん断スパン内で部材の断面保持が出来なくなり、耐荷メカニズムが変わり、アーチ機構が形成されたと思われる。アーチ機構の形成が破壊モード及び破壊荷重の変化をもたら

したと考えられる。既往の研究<sup>2), 3)</sup>と一致している。

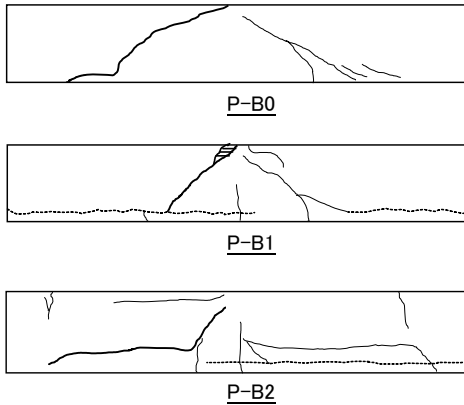


図-7 P-B シリーズ終局ひび割れ図

(2) S-B シリーズ (スターラップがある)

表-6 に実験結果を示す。すべての電食供試体は軸引張鉄筋沿う腐食ひび割れが発生した。供試体 S-B2 には、スターラップに沿う腐食ひび割れも確認された。スターラップも軸引張鉄筋と同程度の腐食減量である。健全供試体と比べ、腐食した供試体の破壊荷重は増加した。すべての供試体の破壊モードはせん断圧縮破壊である。

表-6 S-B シリーズ実験結果

供試体	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食減量(%)		せん断耐力 $V_u$ (KN)
		軸鉄筋	スターラップ	
S-B0	33.1			74.0
S-B1	35.1	3.1	3.4	77.4
S-B2	35.9	18.4	17.8	82.1

図-8 に終局ひび割れ図を示す。健全供試体の場合、トラス機構で荷重を負担する<sup>6)</sup>と思われる。健全供試体と比べ、腐食した供試体の場合、斜めひび割れが載荷点に近づき、ひび割れの傾きも急になったため、支点付近を定着部とするアーチ耐荷機構が卓越し、トラス機構の一部は徐々にアーチ機構に移行したと考えられる。供試体 S-B2 では、トラス耐荷機構をほとんど形成せず、主にアーチ機構で荷重を支えたと考えられる。

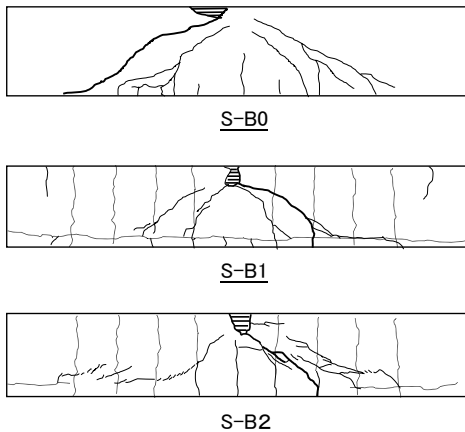


図-8 終局ひび割れ図

3.3 せん断スパン  $a/d > 3$

(1) P-C シリーズ (スターラップがない,  $a/d=4.0$ )

表-7 に実験結果を示す。健全供試体と比べ、腐食した供試体のせん断耐力は低下した。破壊モードもそれぞれ異なった。

表-7 P-C シリーズ実験結果

	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食減量 (%)	破壊荷重 $P_u$ (KN)	せん断耐力 $V_u$ (KN)	破壊モード
P-C0	35.2		66.8	33.4	斜め引張
P-C1	33.3	3.7	60.3	30.1	付着圧縮
P-C2	34.9	4.9	53.7	26.8	付着割裂

図-9 に荷重-変位曲線、図-10 に終局ひび割れ図を示す。健全供試体の破壊モードは斜め引張破壊で、支点及び載荷点に急激に進展した1本の斜めひび割れの形成により耐力を急激に失った。供試体 P-C1 の場合、斜めひび割れが軸引張鉄筋まで進展した後、鉄筋に沿う付着ひび割れが発生した。この付着ひび割れが進展することにより部材の剛性が大きく低下し、支間中央断面のたわみ及び曲率が大きくなり、断面上縁のコンクリートの早期圧壊により耐力を失った(本論文では、付着圧縮と呼ぶ)。供試体 P-C2 の場合、載荷点付近に傾きが急な斜めひび割れが発生し、アーチのような耐荷機構が形成し始めた。斜めひび割れが軸引張鉄筋の付近まで発達し、鉄筋に沿う軸方向の付着ひび割れに進展した後、支点より手前のところで下端面に進展した。それと同時に斜め

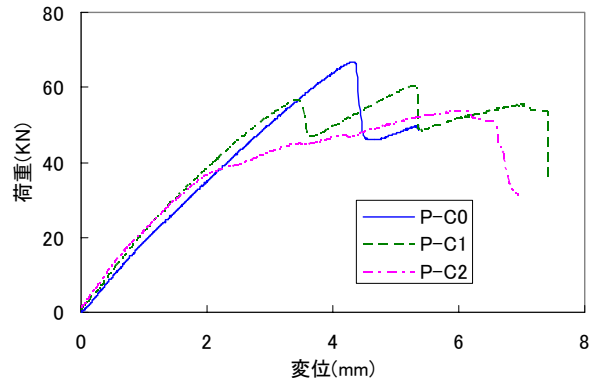


図-9 荷重-変移曲線

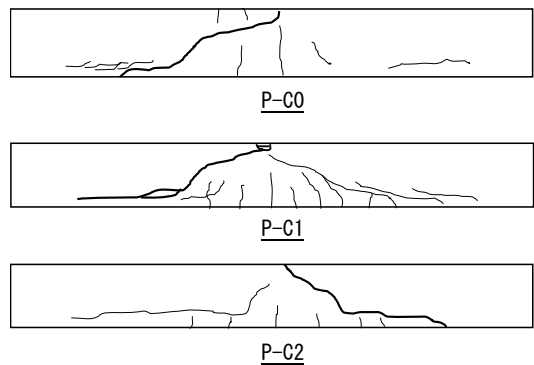


図-10 P-C シリーズ終局ひび割れ図

ひび割れも上端面に進展し、貫通した斜めひび割れを発生したことにより耐力を失った（本論文では、付着割裂と呼ぶ）。これは、せん断スパンが大きい場合、圧縮力が支点に伝達できず、完全なアーチ機構を形成することができないためと考えられる。

(2) S-C シリーズ(スターラップがあり, a/d=3.2)

表-8 に実験結果を示す。すべての供試体の破壊モードはせん断圧縮破壊であり、軸引張鉄筋の腐食によるせん断耐力の変化は認められない

表-8 S-C シリーズの実験結果

供試体	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	腐食減量(%)		せん断耐力 Vu(KN)
		軸鉄筋	スターラップ	
S-C0	35.2			70.6
S-C1	34.9	5.0	2.9	70.5
S-C2	33.3	6.0	1.5	71.7

図-11 に終局ひび割れ図を示す。健全供試体と腐食供試体のひび割れパターンには顕著な相違がないようである。腐食した供試体も健全供試体と同様にトラス機構で荷重を負担する。理由としては、せん断スパンが大きいため、軸引張鉄筋の付着低下が発生しても、端部からアーチ機構が発達しにくいと考えられる。

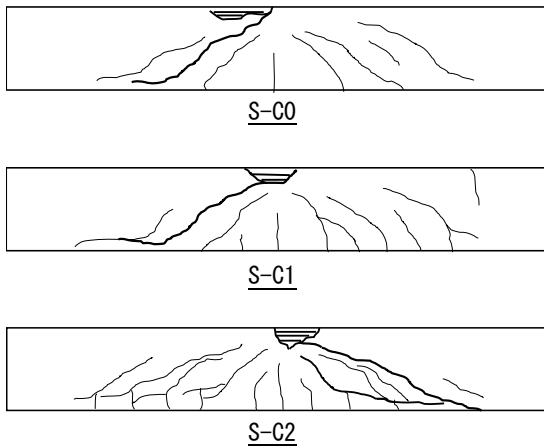


図-11 S-C シリーズ終局ひび割れ図

4. せん断スパン比 a/d の影響に関する考察

以上の実験結果から、鉄筋が腐食した RC はりのせん断性状は、せん断スパン比の影響を受けるのは明らかである。スターラップがある供試体では、スターラップの腐食もみられたが、軸引張鉄筋と比べて軽微な供試体が多いため、本研究は主に軸引張鉄筋の腐食に焦点を当てて考察する。

(1) スターラップがない場合における a/d の影響

図-12 にスターラップがない場合の a/d の影響を示す。縦軸に各供試体のせん断耐力  $V_u'$  を健全供試体の耐力  $V_u$  で除して無次元化した値をとっている。スターラップがないはりでは a/d が 1.5 であれば、腐食による軸引張鉄筋

の付着低下がせん断耐力に及ぼす影響はほとんどない。しかし、a/d が 2.6 の場合、軸引張鉄筋の付着低下により耐荷機構ははり機構からアーチ機構に変わり、せん断耐力が増加した。a/d が 4.0 の場合、軸引張鉄筋の付着低下により付着破壊が発生しており、完全なアーチ機構の形成ができず、せん断耐力は減少したと考えられる。

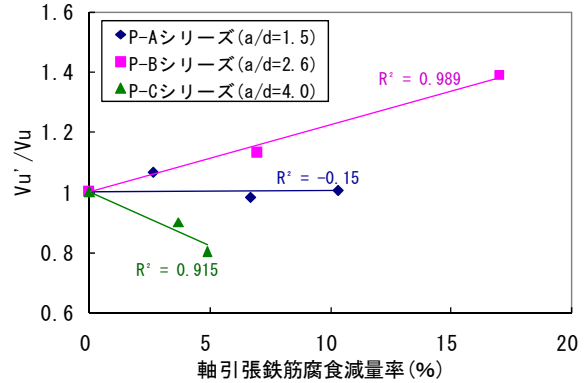


図-12 スターラップなし場合の a/d の影響

二羽式<sup>7)</sup>を用いて本実験の結果を評価した結果を図-13 に示す。a/d が 1.5 の場合、二羽式でほぼ評価できたが、a/d が 4.0 の場合は危険側にある。a/d が 2.6 の場合、破壊モードの変化が起こったが、二羽式では安全側にある。

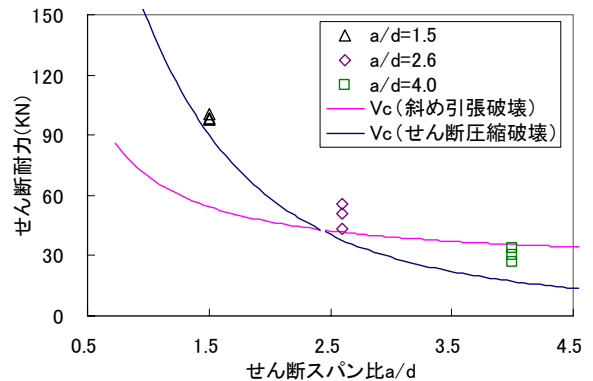


図-13 二羽式で評価結果

(2) スターラップがある場合における a/d の影響

図-14 にスターラップがある場合の a/d の影響を示す。a/d が 1.5 の場合、スターラップは軸鉄筋の付着低下により形成されたアーチ機構に有効に働くためと考えられ、せん断耐力を高めた。a/d が 3.2 の場合、軸引張鉄筋の付着が低下しても、耐荷性状はほとんど変わらない。

a/d が 2.6 の場合、軸鉄筋の付着低下によりトラス機構の一部がアーチ機構に移行したため、せん断耐力が増加したと考えられる。但し、スターラップの配筋量が大きくなる場合、軸引張鉄筋の腐食が進行すると、せん断耐力は減少傾向になる可能性がある。理由としては、図-15 に示すように、軸引張鉄筋の付着状況は完全アンボンドになると、スターラップの役割は働かなくなり、完全なアーチ機構で荷重を支えることになる。すなわち、

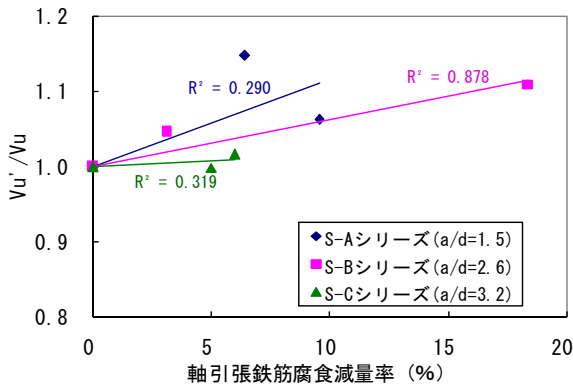
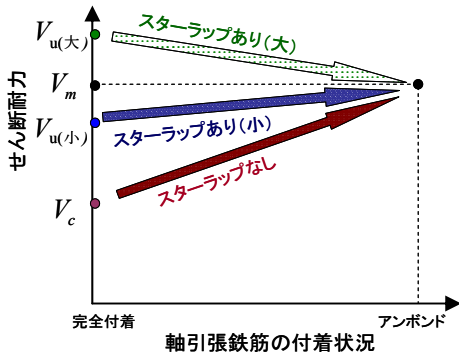


図-14 スターラップがある場合の a/d の影響

アンボンド状態のスターラップがあるとスターラップがない供試体の破壊は中央断面での破壊荷重はほぼ同じになると予想される。軸引張鉄筋の付着低下が進むと、せん断耐力  $V_u$  は  $V_m$  に収束するため、健全時の  $V_u$  は  $V_m$  より大きければ、軸引張鉄筋の付着低下により減少傾向になり、逆の場合増加傾向になると考えられる。



ここに、 $V_c$ : スターラップがない場合のせん断耐力  
 $V_u$ : スターラップがある場合のせん断耐力  
 $V_m$ : 部材の中央断面で破壊発生時のせん断耐力

図-15 せん断耐力の変化におけるスターラップ配筋量の影響 (a/d=2.6 の場合)

## 5. まとめ

本実験では、軸引張鉄筋の腐食によるせん断耐力への影響を検討した。特に、せん断スパン比  $a/d < 2$  あるいは  $a/d > 3$  の供試体の実験データを補足するとともに、 $2 < a/d < 3$  の既往の研究結果を検証することを目的とした。本実験範囲では、以下の事項が明らかとなった。

- 1) せん断スパン比が 1.5 のはりでスターラップがない場合、軸引張鉄筋の付着低下ははりのせん断耐荷機構に及ぼす影響は少ない。スターラップがある場合、スターラップがアーチ機構に有効に働いたため、せん断耐力を高める。
- 2) せん断スパン比が 2.6 のはりでスターラップがない場合、軸引張鉄筋の付着低下により耐荷機構ははり機構からアーチ機構に変わり耐力が増加する。スタ

ーラップがある場合、スターラップによるトラス機構の一部はアーチ機構に移行するため、耐力が増加するようであり、既往の研究結果と一致していることが確認できた。

- 3) せん断スパン比が 4.0 のはりでスターラップがない場合、完全なアーチ機構を形成できず、軸引張鉄筋の付着低下により付着ひび割れが発生した後に割裂破壊あるいは圧縮破壊が発生し、せん断耐力は減少する。
- 4) せん断スパン比が 3.2 のはりでスターラップがある場合、軸引張鉄筋の付着低下がはりのせん断耐荷機構及びせん断耐力に及ぼす影響は認められない。

謝辞：本研究では東京鐵鋼株式会社よりねじ節鉄筋を提供いただいた。また、学部卒業生の樋口僚君、物江潤君、関雅人君には、実験の遂行に当たって多くのサポートをいただいた。ここに本研究にご協力頂いた各位に深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の長期性能照査支援モデルに関するシンポジウム，委員会報告書，論文集，pp1-3，2004
- 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荷性能評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.2，pp.1009-1014，2003
- 3) 松尾豊史，酒井理哉，松村卓郎，金津 努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，第 15 巻第 2 号，pp.69-77，2004.5
- 4) 二羽純一郎：FEM 解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式，日本コンクリート工学協会，第 2 回 RC 構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，119～128，1983.10
- 5) 池田尚治・宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第 293 号，pp.308-316，1980
- 6) 土木学会：2002 年制定コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp. 67-72，2002.3
- 7) 二羽淳一郎，山田一字，横沢和夫，岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断挙動式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp.167-176，1986..