

# 論文 軸引張鉄筋が腐食したせん断スパン比の異なる RC はり部材のせん断耐力について

広森 紳太郎\*1・薛 昕\*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、せん断耐力算定式を提案した。実験パラメータは、せん断スパン比、鉄筋腐食レベルであり軸引張鉄筋のみ配置する。実験結果から得た算定式から以下のようなことが得られた。せん断耐力と鉄筋腐食減量率との関係はせん断スパン比  $a/d$  の影響を受けることが明らかになった。実験結果からせん断スパン比および腐食減量率を含むせん断耐力の算定式について検討した。

**キーワード**：RC, 鉄筋腐食, せん断耐荷性状, 付着低下, アーチ機構, 維持管理, せん断耐力算定式

## 1. はじめに

近年、融雪剤や海水の飛沫などにより RC 構造物の鉄筋が腐食し、剥離・剥落といった損傷を受ける事例が多数報告されている。コンクリート中の鉄筋が塩害、中性化、凍害などにより腐食すると RC 部材の性能は劣化する。既往の研究から<sup>1),2)</sup>鉄筋が腐食すると、鉄筋断面の減少、腐食ひび割れの発生、付着強度の低下などが生じ、はり部材の耐荷性状に影響を及ぼすことが明らかになっている。また、過度の腐食が起これば、鉄筋の定着不良、鉄筋の破断などが発生し、設計の前提条件が崩れてしまうこともある<sup>2)</sup>。

鉄筋が腐食した RC はり部材の曲げ耐荷性状に関する研究は数多くあるが、せん断耐荷性状に関する研究例が少ないのが現状である。そこで、鉄筋が腐食した RC はり部材のせん断耐荷メカニズムを解明するためにはより多くの研究データの蓄積が必要になる。

既往の研究<sup>3)</sup>から軸引張鉄筋の腐食により、せん断耐荷機構の変化はせん断スパン比の影響を受けることが明らかになったが、耐荷挙動の詳細な検討および鉄筋腐食による影響の定量化までいたっていない。

そこで、本研究では、せん断スパン比、鉄筋の腐食レベルをパラメータとしたはり供試体の載荷実験を行い、鉄筋の腐食が RC はり部材のせん断耐荷性状に及ぼす影響を調査した。さらに、実験結果をもとに鉄筋の腐食した RC はり部材のせん断耐荷性状を定量的に評価できる算定式を提案することを試みた。

なお、本論文では既往の実験結果<sup>3)</sup>をできるだけ包含して活用することとした。

## 2. 実験概要

### 2.1 供試体概要

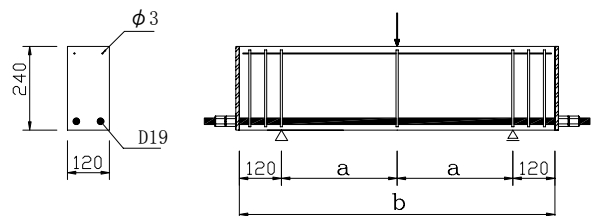
表-1 に供試体一覧、図-1 に供試体概略を示す。供試体の断面は 120mm×240mm、有効高さ 220mm である。

曲げ破壊を避けるため、すべての供試体には、高強度のネジ節鉄筋 D19 を軸引張鉄筋として使用した。軸引張鉄筋の鉄筋比は 2.17% である。せん断破壊前の端部の定着破壊を防ぐために、供試体の端部に鉄板を設置し、軸引張鉄筋にナットを用いて固定した。φ3 の鉄線を組立鉄筋として用いた。鉄筋の特性を表-2 に示す。電食試験により軸引張鉄筋のみを腐食させるため、軸引張鉄筋とスターラップの接触箇所には熱収縮チューブを用いて絶縁処理を施した。

表-1 供試体一覧

供試体名	a/d	$f'_c$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸引張鉄筋 腐食減量率		破壊 荷重 (kN)	せん断 耐力 $V_u$ (kN)	破壊モード
			平均	最大			
B(2.0)-m	2.0	43.0	0	0	123.8	61.9	せん断圧縮
B(2.0)-m1		46.4	3.8	12.3	183.6	91.8	せん断圧縮
B(2.0)-m2		44.7	15.0	29.0	191.6	95.8	端部割裂
B(2.6)-m*	2.6	33.1	0	0	86.4	43.2	斜め引張
B(2.6)-m1*		35.1	7.0	14.0	101.4	50.7	せん断圧縮
B(2.6)-m2*		36.2	13.9	31.0	124.9	62.5	せん断圧縮
B(3.5)-m	3.5	43.0	0	0	79.7	39.9	斜め引張
B(3.5)-m1		45.8	5.4	13.6	78.8	39.4	付着割裂
B(3.5)-m2		44.4	7.3	18.3	61.9	31.0	付着割裂
B(4.0)-m*	4.0	35.2	0	0	66.8	33.4	斜め引張
B(4.0)-m1*		34.7	3.7	9.1	60.3	30.2	付着圧縮
B(4.0)-m2*		33.7	4.9	11.6	53.7	26.9	付着割裂

注:\*印 既往の実験結果<sup>3)</sup>



シリーズ名	a (mm)	b (mm)
B(2.0)-m	440	1120
B(2.6)-m	580	1400
B(3.5)-m	770	1780
B(4.0)-m	880	2000

図-1 供試体概略

\*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

\*2 早稲田大学大学院 創造理工学研究科 建設工学専攻 工修 (正会員)

\*3 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博 (フェロー会員)

コンクリートの配合を表-3に示す。最大寸法 15mm の粗骨材を使用した。供試体を打設した後、1 週間湿潤養生を行い、28 日経過後に電食試験を開始した。各供試体の載荷試験日に圧縮試験を行った。得られた圧縮強度の結果を表-1に示す。

表-2 鉄筋の物性

補強材	種別	規格	断面積 (mm <sup>2</sup> )	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )
軸引張鉄筋	D19	USD685A	287	706

表-3 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				
		セメント C	水 W	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
48.1	51.8	387	186	881	842	5.8

## 2.2 電食試験方法

図-2に示すように、電食試験を行い、鉄筋を腐食させた。3%の NaCl 溶液に供試体を浸漬させ、鉄筋をアノード、外部の銅板をカソードとし、外部の直流電源を用いて約1mA/cm<sup>2</sup>の電流を印加した。積算電流量を変化させることにより腐食減量率を相違させた。

腐食生成物の除去作業については、一次処理として、サンドブラスト処理を施し、付着した腐食生成物およびコンクリートを除去した。2次処理として、60℃の10%のクエン酸二アンモニウム水溶液に鉄筋を浸漬し、腐食生成物を完全に取り除いた。

鉄筋の腐食レベルに関しては、平均腐食減量率と最大断面減少率の2つの指標を用いて評価することにした。平均腐食減量率は腐食生成物を取り除いた後の質量減量を用いて式(1)により計算した。

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

ここに、C:平均腐食減量率(%)

$\Delta w$ :腐食に伴う減少率(%)

w:腐食前の質量(g)

最大断面減少率に関しては、ノギスを用いて一番欠損した断面を垂直2方向で測定した直径を用いて計算し、せん断スパン内において一番大きな値を最大断面減少率とした。

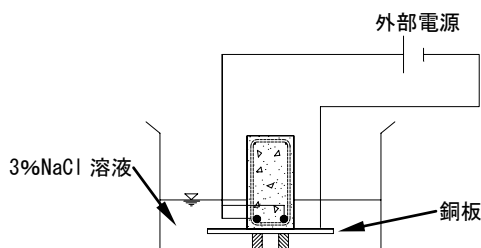


図-2 電食試験概略

## 2.3 載荷方法

載荷試験概略を図-3に示す。載荷試験は3点曲げ載荷とし、静的単調載荷を行った。載荷速度は0.2mm/minを標準とした。測定項目は、載荷荷重、スパンの中央鉛直変位、ひび割れ性状である。

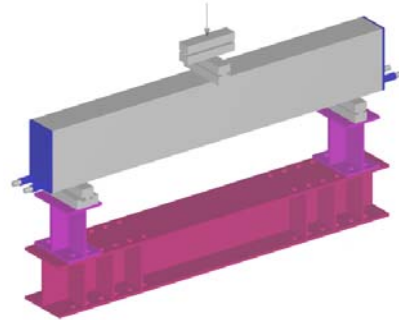


図-3 載荷概略図

## 3. 実験結果及び考察

### 3.1 電食試験結果

図-4に電食試験により供試体側面に生じた腐食ひび割れの一例を示す。腐食量が多い場合、軸引張鉄筋に沿う腐食ひび割れが確認された。腐食性状を調査するため、せん断スパン内にある軸引張鉄筋を10区間に分割するように切断し、各区間の腐食性状を調査することにした。図-5に供試体 B(3.5)-m2の軸引張鉄筋の一つの腐食減量率を示す。せん断スパン内において比較的均等な腐食が確認された。



図-4 腐食ひび割れ図

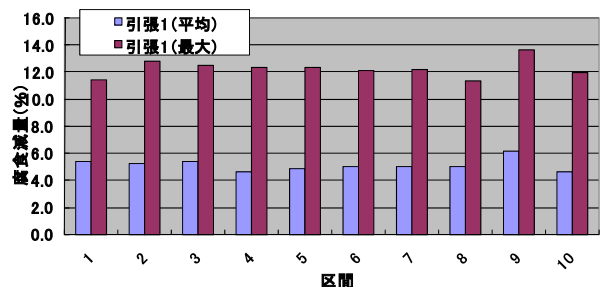


図-5 B(3.5)-m2の平均腐食減量率と最大断面減少率の関係

### 3.2 載荷試験結果

#### (1) 荷重-変位関係

図-6に荷重-変位曲線を示す。B(2.0)-m, B(2.6)-mシリーズでは健全な供試体と比べて、腐食した供試体のひび

割れ発生後の剛性が低下した。これは、鉄筋の腐食に伴う付着低下によりテンションスティフニングの効果が減少したためと思われる。軸引張鉄筋の腐食減量率の増加に従い、耐力は増加した。一方 B(3.5)-m, B(4.0)-m シリーズでは、腐食した供試体は付着ひび割れの進展によって荷重が一旦落ちた後、再び荷重が増加した。軸引張鉄筋の腐食減量率の増加に伴い耐力が減少した。

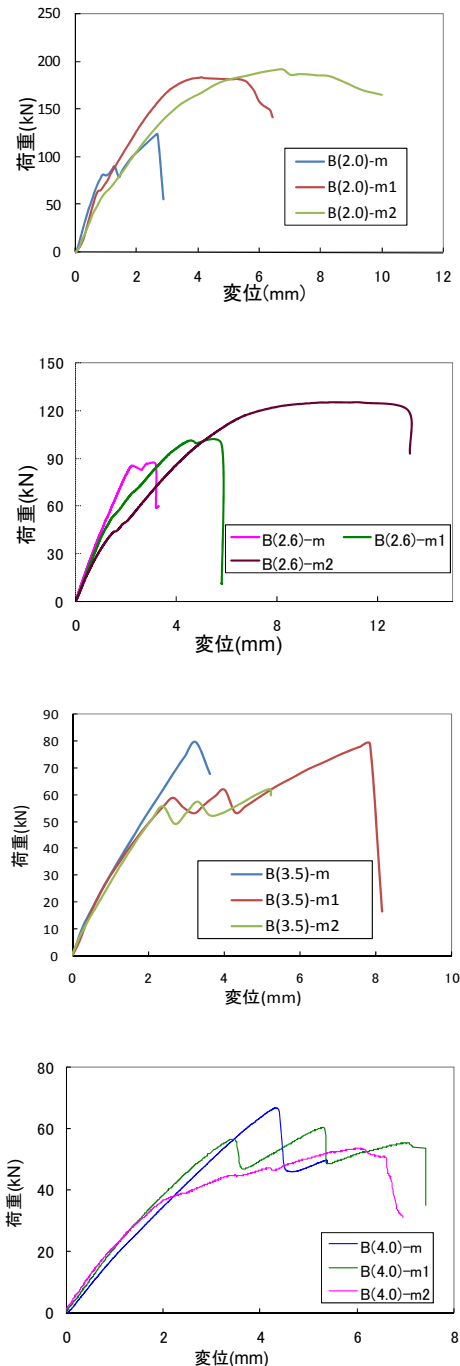


図-6 荷重-変位曲線

## (2) 斜めひび割れ性状

図-7 に各シリーズの終局時のひび割れ図を示す。太線を終局に至るひび割れ、点線を腐食膨張ひび割れとした。

B(2.0)-m シリーズでは、健全、腐食レベル小の供試体ではコンクリート圧縮域の破壊によるせん断圧縮破壊

であったが、腐食レベル大の供試体では、端部上面から発生したひび割れが支点から進展した斜めひび割れと貫通したことで耐力を失い、破壊に至った。(本論文ではこれを端部割裂破壊<sup>4)</sup>と呼ぶ)。このひび割れは、鉄筋とコンクリート間の付着低下により、鉄筋の受け持つ引張力が端部に伝達されたため、端部に負の曲げが生じ部材直角方向にひび割れが発生したためと思われる。

B(2.6)-m シリーズでは、健全な供試体が斜め引張破壊をしたのに対して、供試体 B(2.6)-m1 はせん断圧縮破壊をした。供試体 B(2.6)-m2 は終局時に載荷板付近のコンクリートが圧壊され、また軸引張鉄筋が降伏しないことが確認されたため、せん断圧縮破壊をしたと思われる。腐食が進行するにつれて、斜めひび割れが急になった。これは、軸引張鉄筋の腐食によって、鉄筋の断面積が減少し、軸引張鉄筋とコンクリートとの付着が劣化したため、アーチ的な機構に遷移したためであると思われる。この結果、破壊荷重が増加した。

B(3.5)-m シリーズでは、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。腐食した供試体の場合、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を形成し始めた。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。それと同時に斜めひび割れも上端面に進展し、貫通した斜めひび割れにより耐力を失った(本論文では、付着割裂破壊と呼ぶ)。これは、せん断スパンが大きいため、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。

B(4.0)-m シリーズでは、健全供試体の破壊モードは斜め引張破壊で、供試体 B(4.0)-m1 の場合は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、支点間のたわみ及び曲率が大きくなり、断面上部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、付着圧縮破壊と呼ぶ)。供試体 B(4.0)-m2 の場合、付着割裂破壊に至った。

## (3) せん断耐力 $V_u$ 変化率

図-8 に軸引張鉄筋平均腐食減量率と  $V_u$  変化率(腐食供試体の  $V_u$  /健全供試体の  $V_u$ ) との関係を示す。図より、 $a/d$ が増加するにしたがって腐食進行により耐力が増加もしくは減少している。破壊モードが変化しやすい領域にあるせん断スパン比の場合、アーチ機構の形成により耐力が増加するが、 $a/d$ が大きくなるにしたがって、軸引張鉄筋の腐食に伴う付着低下により、耐力の増加が鈍

くなるあるいは、耐力が減少すると考えられる。

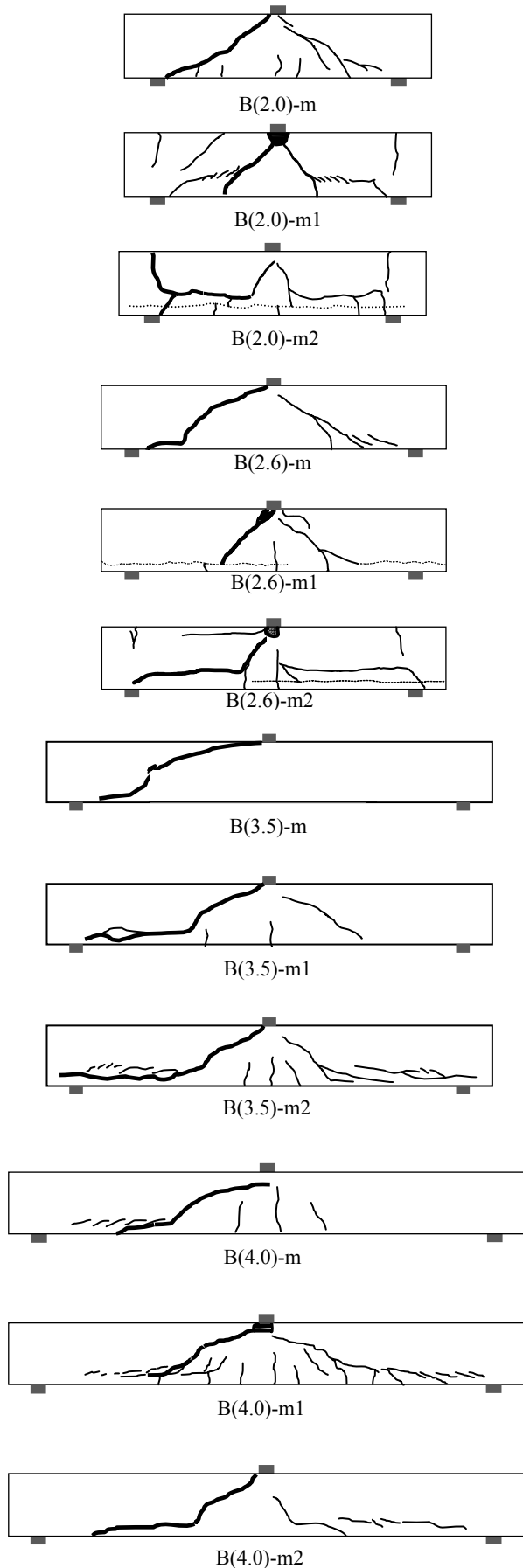
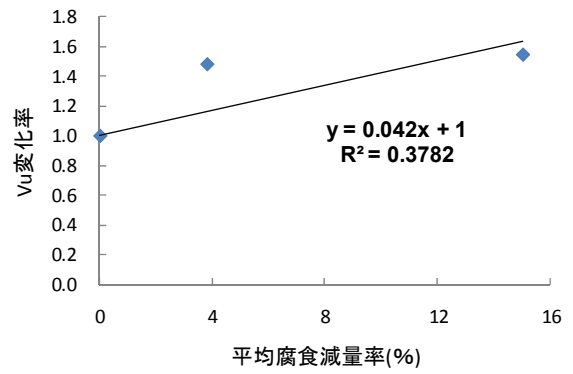
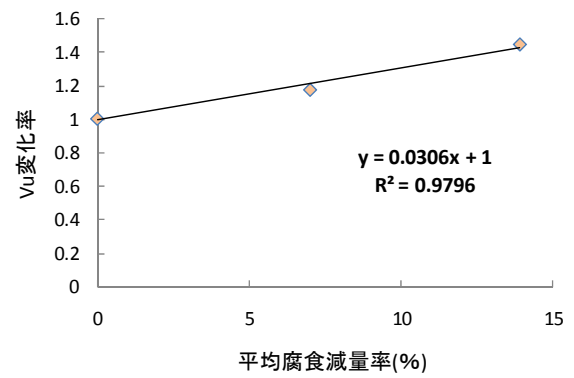


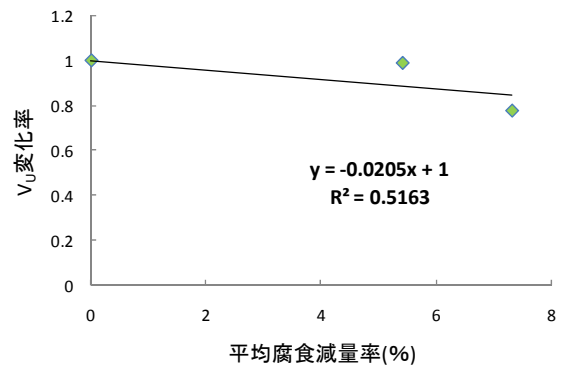
図-7 終局時のひび割れ図



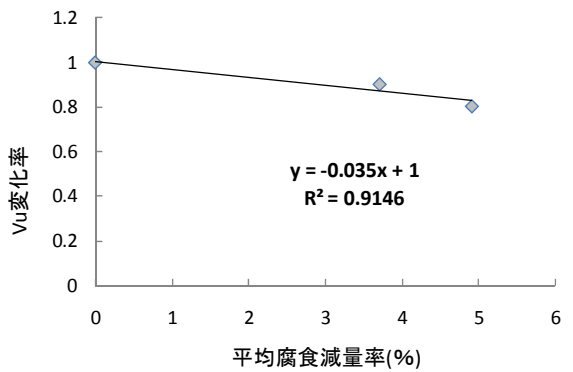
B(2.0)-m シリーズ



B(2.6)-m シリーズ



B(3.5)-m シリーズ



B(4.0)-m シリーズ

図-8  $V_u$  変化率と平均腐食減量率の関係

#### 4. せん断耐力算定式の提案

##### 4.1 既往のせん断算定式による検証

軸引張鉄筋のみ配筋されている場合のせん断耐力算定式として、式(2)、(3)<sup>5)</sup>が提案されている。

斜め引張破壊耐力:

$$V_c = 0.2 f_c'^{1/3} (100 p_t)^{1/3} \left( \frac{10^3}{d} \right)^{1/4} \left( 0.75 + \frac{1.4d}{a} \right) b_w d \quad (2)$$

せん断圧縮破壊耐力:

$$V_c = \frac{0.24 f_c'^{2/3} (1 + \sqrt{100 p_t}) (1 + 3.33 r/d)}{1 + (a/d)^2} b_w d \quad (3)$$

ここに、 $f_c'$ :コンクリートの圧縮強度

$p_t$ : 軸引張鉄筋比

$d$ : 有効高さ(mm)

$b_w$ : 部材幅(mm)

$r$ : 載荷板軸方向長さ(mm)

式(2)、(3)を用いて今回の実験を検証した結果を図-9に示す。図より、健全供試体は既往のせん断式を用いて精度よく評価できるが、腐食供試体で、 $a/d=3.5, 4.0$ の場合、おおかた危険側に評価されることが判明した。そこで、実験結果を用いて、腐食した RC はりも評価できる評価式を提案することを試みる。

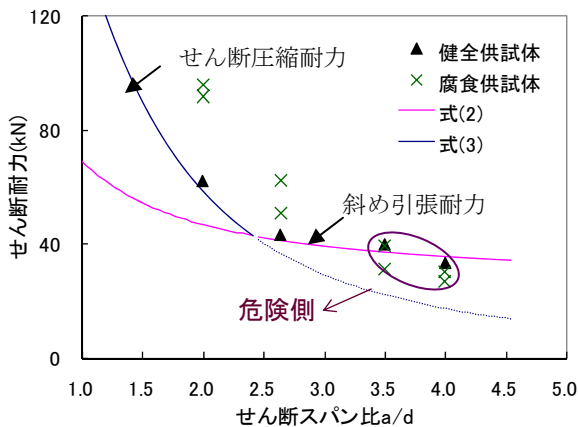


図-9 二羽式による実験結果の評価

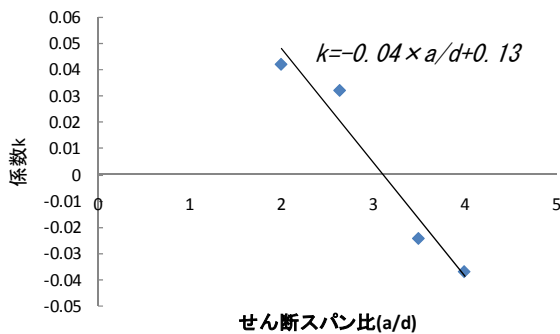


図-10 せん断スパン比と係数 k の関係

##### 4.2 軸引張鉄筋の腐食影響の定量化

軸引張鉄筋の腐食の影響を考慮する係数  $\alpha$  を導入することにより式(4)に示す算定式を考えることとした。

$$V_{u-eval} = \alpha \times V_u \quad (4)$$

ここに、 $V_{u-eval}$ : 腐食供試体のせん断耐力

$V_u$ : 健全供試体のせん断耐力

実験結果より、鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐力ではせん断スパン比  $a/d$ 、軸引張鉄筋の平均腐食減量率  $C_m$  による影響が認められるため、 $\alpha$  は図-8 に示す回帰式を参考にして式(5)で表すことができる。

$$\alpha = 1 + k \times C_m \quad (5)$$

ここに、 $C_m$ : 軸引張鉄筋の平均腐食減量率(%)

次に  $k$  と  $a/d$  の関係に関しては、図-8 に示す各回帰式の傾きを考慮することとした。両者の関係をまとめると図-10 が得られ、回帰式として式(6)を得ることができる。

$$\alpha = 1 + [-0.04 \times a/d + 0.13] \times C_m \quad (6)$$

##### 5. せん断耐力算定式の検証

本実験データと提案式を比較し、提案式の精度を確認する。表-4 に実験値と提案式による計算値を示し、実験値と計算値を比較した。図-11 にせん断スパン比と実験値/提案式による計算値の関係を示した。図より、ほとんどが 1.0 付近にあることからこの提案式は今回の実験結果に関しては概ね実験結果を精度よく推定できると思われる。

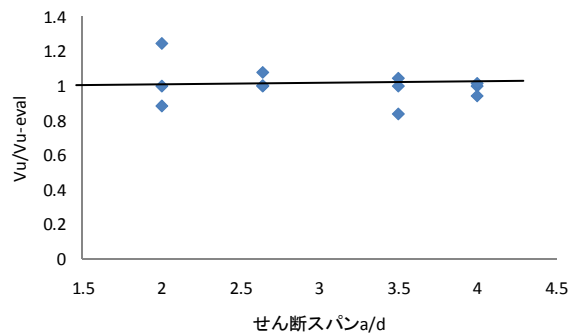


図-11  $a/d$  と  $V_u/V_{u-eval}$  の関係

##### 6 まとめ

本研究では、鉄筋の腐食が RC はりのせん断耐荷性状に及ぼす影響を検討することを目的として、せん断スパン比  $a/d$ 、鉄筋腐食レベルをパラメータとして、実験を行った。

本研究で得られた知見は以下の通りである。

表-4 実験値と計算値の比較

試験体名	平均腐食 減量率 (%)	せん断 破壊荷重 (kN)	せん断 耐力 $V_u$	$\alpha$	$V_{u-eval}$ (kN)	$\frac{V_u}{V_{u-eval}}$
						(kN)
B(2.0)-m	0.0	123.8	61.9	1.00	61.9	1.00
B(2.0)-m1	3.8	183.8	91.9	1.19	73.7	1.25
B(2.0)-m2	15.0	191.6	95.8	1.75	108.3	0.88
B(2.6)-m	0.0	86.4	43.2	1.00	43.2	1.00
B(2.6)-m1	7.0	101.4	50.7	1.17	50.6	1.00
B(2.6)-m2	13.9	124.9	62.5	1.34	57.9	1.08
B(3.5)-m	0.0	79.7	39.9	1.00	39.9	1.00
B(3.5)-m1	5.4	78.8	39.4	0.95	37.7	1.05
B(3.5)-m2	7.3	61.9	31.0	0.93	36.9	0.84
B(4.0)-m	0.0	66.8	33.4	1.00	33.4	1.00
B(4.0)-m1	3.7	60.3	30.2	0.89	29.7	1.02
B(4.0)-m2	4.9	53.7	26.9	0.85	28.5	0.94

- (1) 軸引張鉄筋の腐食進行により耐荷性状はせん断スパン比  $a/d$  の影響を受ける。 $a/d = 2.0, 2.6$  の場合、軸引張鉄筋の腐食に伴う付着低下により、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傾向がある。 $a/d = 3.5, 4.0$  の場合、軸引張鉄筋の腐食によりアーチ機構が形成されるが、付着ひび割れの発達が顕著となり、耐力は低下する。
- (2) 実験結果から軸引張鉄筋のみが腐食したせん断スパン比の異なる RC はり部材のせん断算定式を提案した。この提案式と実験結果を比較すると概ね精度よく実験値を推定できることが判明した。

謝辞：本研究を進めるにあたり、東京鐵鋼株式会社様より高張力ネジ棒鋼を提供いただいた。また、JR 東日本の井上祐介氏、早稲田大学の大坪雅英氏には、実験の遂行に当たり多大な協力を頂きました。ここに感謝の意を

表します。

#### 参考文献

- 1) 土木学会：2001年制定 コンクリート標準示方書「維持管理編」制定資料，2001.
- 2) 日本コンクリート工学協会：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.
- 3) 薛昕，広森紳太郎，関博：鉄筋が腐食した RC はりのせん断耐荷特性におけるせん断スパン比の影響について，コンクリート工学年次論文集，pp.745-750，2008.7
- 4) 広森紳太郎，薛昕，関博：鉄筋が腐食した RC はりの部材のせん断耐荷性状に関する実験的研究，第34回土木学会関東支部技術研究発表会，2007.3
- 5) 田辺忠顕，檜貝勇，梅原秀哲，二羽淳一郎：コンクリート構造，朝倉書店，pp.107-123，2000.3