

# 論文 横補強筋の腐食がコンクリートのコンファインド効果に及ぼす影響

李 翰 承\*<sup>1</sup>・金 仁 秀\*<sup>2</sup>・野 口 貴 文\*<sup>3</sup>・友 澤 史 紀\*<sup>4</sup>

**要旨：**横補強筋であるスパイラル筋の腐食程度を数段階に調節した供試体の一軸圧縮実験を通じて、横補強筋の腐食程度がコンクリートのコンファインド効果に及ぼす影響を検討した。その結果、横補強筋の腐食は最大応力よりも変形能力に影響を与えること、横補強筋の腐食程度が腐食重量減少率約30%以上では、腐食による横補強筋の耐力低下や破断及び腐食によるコンクリート内部への腐食ひびわれ進展のためコアコンクリートの有効断面積が小さくなってコンファインド効果がなくなることがわかった。

**キーワード：**鉄筋腐食、横補強筋、コンファインド効果、コンクリート、最大軸応力

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート造構造部材の変形性能の確保及びコンクリートの脆性的な破壊を改善するためには、横補強筋によってコンクリートを拘束するコンファインドコンクリートの利用が有効であることが実験的、解析的に明らかにされ、その性質を構造設計に反映するためのコンファインドコンクリートに関する研究が盛んに行われている<sup>1)</sup>。しかし、塩害や中性化等によって鉄筋が腐食した構造部材では、横補強筋が主筋よりひどく腐食した例が多く、横補強筋の腐食による構造部材のせん断耐力及び靱性低下の恐れがある。従って、軸力を受けているRC柱の耐力性能に及ぼす鉄筋腐食の影響を検討する上で、鉄筋腐食がコンファインドコンクリートの性状に及ぼす影響を把握する必要があるが、これに関する研究はほとんど行われていない。

本研究では、横補強筋の腐食程度がコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を把握するために、プレーンコンクリートをスパイラル筋で拘束したコンファインドコ

ンクリートの一軸圧縮実験を行うとともに、スパイラル筋を数段階に腐食させ、腐食による横拘束力の低下がコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線に及ぼす影響を検討した。

## 2. 実験概要

### 2. 1 実験の組み合わせ

表-1に実験の組み合わせを示す。実験因子は、横補強筋の腐食がコンファインドコンクリートの特性に影響を与える鉄筋の腐食程度及び横拘束力であり、横補強筋比は一般部材の横補強筋比である0.6% (S4 シリーズ)、横補強筋が密に配筋された場合の1.2% (S2 シリーズ-構造計算基準の最高値)である。また、横補強筋の腐食をモデル化させた試験体として鉄筋径を細くしたモデル試験体についても検討した。

### 2. 2 材料物性及びコンクリートの調合

使用したコンクリートの調合を表-2に、コンクリート及び鉄筋の力学的性質をそれぞれ表-3及び表-4に示す。

\*1 韓国漢陽大学校 超大型構造システム研究センター 研究助教授 博士 (工学) (正会員)

\*2 韓国麗州専門大学教授 建築工学科 工博

\*3 東京大学助教授 工学系研究科 建築学専攻 博士 (工学) (正会員)

\*4 東京大学教授 工学系研究科 建築学専攻 工博 (正会員)

表-1 実験の組み合わせ

シリーズ	試験体名	鉄筋直径 (mm)	鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	補強筋間隔 (cm)	横補強筋比 P <sub>w</sub> (%)	鉄筋の降伏耐力 σ <sub>wy</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	横拘束力 P <sub>wy</sub> ・σ <sub>wy</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	N (プレーン)	0	0.00	0	0.00	0	0
	S2-Sound (健全)	4	0.126	2	1.26	6580	82.91
	S2-Model (モデル)	2.4	0.045	2	0.45	3974	17.88
	S2-C1 (腐食1段階)	4	0.126	2	1.26	6580	82.91
	S2-C2 (腐食2段階)	4	0.126	2	1.26	6580	82.91
	S2-C3 (腐食3段階)	4	0.126	2	1.26	6580	82.91
	S2-C4 (腐食4段階)	4	0.126	2	1.26	6580	82.91
2	S4-Sound (健全)	4	0.126	4	0.63	6580	41.45
	S4-Model (モデル)	2.4	0.045	4	0.23	3974	8.94
	S4-C1 (腐食1段階)	4	0.126	4	0.63	6580	41.45
	S4-C2 (腐食2段階)	4	0.126	4	0.63	6580	41.45
	S4-C3 (腐食3段階)	4	0.126	4	0.63	6580	41.45
	S4-C4 (腐食4段階)	4	0.126	4	0.63	6580	41.45

表-2 コンクリートの調合

W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	s/a (%)	単位水量 (kg/m <sup>3</sup> )	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )			混和剤 (cc)
					セメント	砂	砂利	
55	18	4	42	185	336	718	1023	538.2

表-3 コンクリートの力学特性

圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ポアソン比
368	34.2	2.58 × 10 <sup>5</sup>	0.173

表-4 鉄筋の力学特性

鉄筋直径 (mm)	降伏強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )	伸び <sup>δ</sup> (%)
φ 4	6580	6934	2.1 × 10 <sup>6</sup>	10.9
φ 2.4	3974	4434	2.0 × 10 <sup>6</sup>	17.5

2.3 試験体の形状及び鉄筋腐食方法

試験体は、図-1に示すように100×200mmの円形で、スパイラル筋の中央部にひずみゲージを貼付した後、型枠に設置し、かぶりがないようにコンクリートを打設した。ゲージ部分は腐食しないように入念にシールした。その後、腐食実験用の試験体は、3%食塩水の水槽の中で図-2に示す電食方法で通電電流量を調節することによって鉄筋の腐食段階を調節した。電食による腐食程度は、あらかじめスパイラル筋の重量を量っておき、載荷終了後スパイラル筋

を取り出し、クエン酸二アンモニウムで洗った後、重量差から腐食重量減少率により評価した。

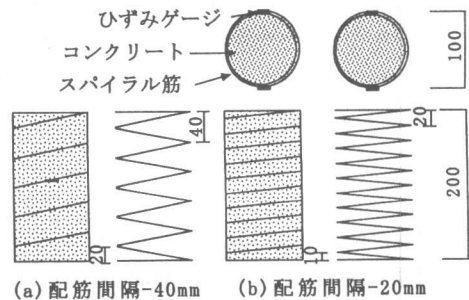


図-1 試験体の形状

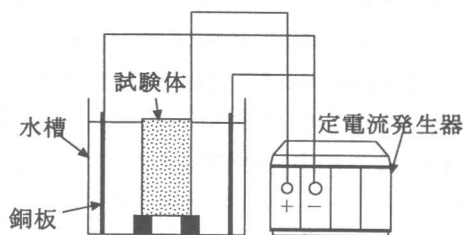


図-2 スパイラル筋の電食方法

### 2. 4 載荷方法及び測定項目

図-3に載荷方法を示す。加力は中心一軸圧縮載荷とし、ピーク点以降の下り勾配を得るために高剛性試験機を用いた。試験体は各々3体であり、測定項目は軸力、加力ヘッド間の変位、スパイラル筋の歪みである。

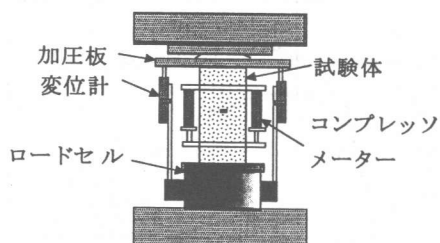


図-3 載荷方法

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 電食による鉄筋の腐食状況

図-4に示すとおり積算電流量と腐食重量減少率とはほぼ比例関係にあり、積算電流量を調節することによって腐食段階を変えることができた。また、スパイラル筋に電流を流したためスパイラル筋が水と接触した部分には局部的な断面欠損を伴った腐食部分があり、その現象は通電時間が長くなるほど激しかった。

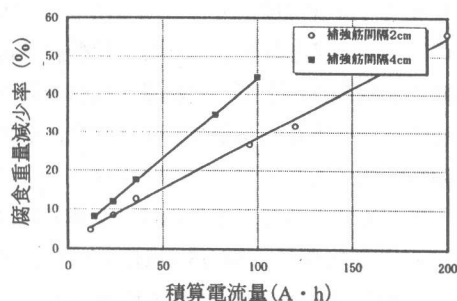


図-4 積算電流量と重量減少率との関係

### 3. 2 破壊状況及び実験結果の一覧

表-5に実験結果の一覧を示す。軸ひずみは加力ヘッド間の変位を試験体の高さで割った値とし、軸応力は、荷重を直径100mmの円の面積で割った値とした。健全試験体及びモデル試験体は、プレーン試験体に比べ最大軸応力に達した後も下降域の勾配は緩やかで靱性的な様相を示したが、最終的な破壊はスパイラル筋の切断によって急激に荷重が低下した。

表-5 実験結果の一覧

試験体名	腐食時間 (hour)	腐食重量減少率 (%)	最大軸応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	最大応力時の軸ひずみ (μ)	鉄筋破断時の応力 (kgf/cm <sup>2</sup> )	鉄筋破断時の軸ひずみ (μ)
N	0	0	366	2737	-	-
S2-Sound	0	0	630	16478	574	29685
S2-Model	0	0	488	10592	417	22472
S2-C1	12	4.8	702	16723	634	31575
S2-C2	24	8.5	665	14753	527	29927
S2-C3	36	12.7	668	13212	618	20750
S2-C4	96	26.7	395	7650	-	-
S4-Sound	0	0	428	9704	319	27814
S4-Model	0	0	380	7215	284	18025
S4-C1	14	8.1	496	7807	408	17160
S4-C2	24	11.9	477	7133	402	15111
S4-C3	36	17.51	446	6144	416	9663
S4-C4	78	34.7	296	5024	-	-

一方、スパイラル筋が腐食した腐食試験体は、腐食程度によって異なるが、最大軸応力も健全試験体より小さい値を示しており、腐食程度が大きいほど横補強筋の破断ひずみが小さくなる脆性的な破壊を示した。また、健全試験体及びモデル試験体の最大軸応力及び軸ひずみは、ばらつきが小さいが、腐食試験体の場合は、同じ腐食程度でも腐食程度が大きくなるにつれて大きなばらつきが見られた。これは、試験終了後の鉄筋の目視観察から調べた結果、鉄筋の局部腐食によって平均腐食重量減少率より大きな断面欠損部分で応力集中が生じ、コンクリートが破壊したためであると考えられる。全体的に腐食程度が腐食重量減少率 15%程度までは、最大軸応力は健全試験体より若干増加しているが、それ以後、最大軸応力は腐食程度が大きくなるほど小さくなった。

### 3.3 軸応力度－軸ひずみ度曲線

図-5は、モデル試験体の軸応力－軸ひずみ曲線である。プレーン試験体に比べスパイラル筋で補強した試験体の最大軸応力は、横拘束応力( $P_w \cdot \sigma_{wy}$ )が  $82.91 \text{ kgf/cm}^2$  である S 2 シリーズで 1.7 倍、 $41.45 \text{ kgf/cm}^2$  である S 4 シリーズで約 1.3 倍に増加しコンファインド効果が出ている。また、最大軸応力時の軸ひずみ及び鉄筋の破断ひずみもスパイラル筋で補強することにより著しく伸びており、コンファインド効果によって脆性的なプレーンコンクリートが靱性的な性状を示すことがわかった。すなわち、モデル試験体（鉄筋径を 4mm から 2.6mm とし細くする）の鉄筋径の減少率は健全試験体の 36% であるが、鉄筋径が小さくなり横拘束応力( $P_w \cdot \sigma_{wy}$ )が下がると横補強筋の拘束効果が低下して最大軸応力及びその時の軸ひずみも低下する。図-6に鉄筋破断までの腐食試験体の軸応力－軸ひずみ曲線を示す。スパイラル筋で横補強することによって脆性が大きく改善したが、鉄筋が腐食することによってコンファインドコンクリートの応力－ひずみ曲線は変化し、まず、

鉄筋の破断歪みが小さくなるが、腐食重量減少率が約 15% (腐食 3 段階) までは最大耐力は増加する傾向を示した。これは、鉄筋腐食による膨張圧によってコンクリートにさらに拘束力が生じ、横拘束剛性が増加したためであると考えられる。しかし、腐食重量減少率がそれ以上に大きくなると腐食試験体の最大応力は急激に低下し脆性的な破壊を示す。これは、横補強筋が腐食しコンファインド効果がなくなったことを意味していると言える。しかし、腐食 1, 2 段階のように腐食程度が 4% ~ 10% と小さい段階でも鉄筋の破断歪みは、著しく低下した。従って、腐食初期段階でも最大応力は腐食によってあまりその影響を受けないが鉄筋破断歪みの低下により靱性がかかなり低下することがわかる。

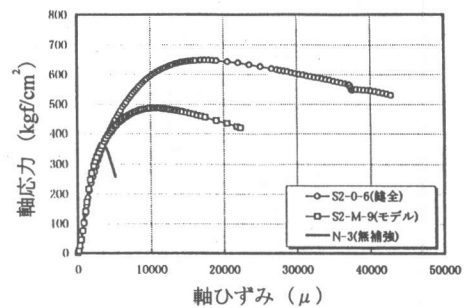


図-5 モデル試験体の軸応力－軸ひずみ曲線

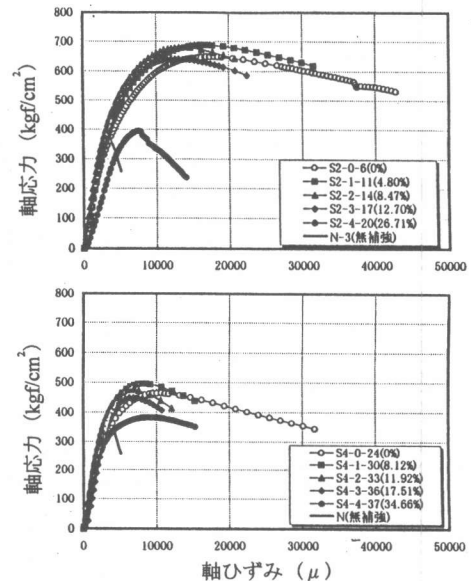


図-6 腐食試験体の軸応力－軸ひずみ関係

### 3. 4 鉄筋腐食が最大軸応力及び最大応力時の軸ひずみに及ぼす影響

腐食試験体の最大軸応力及び最大軸応力時の歪みと腐食重量減少率との関係をそれぞれ図-7及び図-8に示す。スパイラルが腐食して腐食重量減少率が大きくなるに従って最大軸応力及び最大応力時の軸ひずみは低下するが、その低下率は軸応力より軸ひずみが大きい。これは、腐食量が小さいところでは、腐食膨張圧によるプレストレスによって剛性が向上したものと、腐食量が大きい場合は、最大軸応力が低下したためであると考えられる。また、最大応力及びその時の軸ひずみは腐食程度が大きくなるにつれて局部腐食の影響のためそのばらつきが大きくなった。従って、横補強筋の腐食は試験体の応力より変形能力にもっと大きい影響を与えることがわかった。

### 3. 5 既往の最大応力算定式との比較

コンファインドコンクリートの最大軸応力及びその時の軸ひずみの算定式が既往の研究でいくつか提案されている。実験値の最大応力との比較のために、本研究では六車<sup>1)</sup>の最大応力の算定式(1)を適用することにした。

$$F_c/F_o = 1 + 150C_c \quad (1)$$

ただし、 $C_c = 2P_w \sqrt{\sigma_{wy}} / F_o (1 - S/2D)$

$F_c$ : コンファインドコンクリートの最大軸応力

$F_o$ : プレーンコンクリートの圧縮強度

$P_w$ : 横補強筋比,  $\sigma_{wy}$ : 鉄筋の降伏強度

$S$ : 横補強筋ピッチ,  $D$ : 横補強筋の直径

六車による算定式により計算した値と実験値との比較を図-9に示す。計算値は、横補強筋の腐食減量率に比例して降伏点を低下させ、 $\sigma_{wy}$ が低下するという考え方の元に、六車式の $\sigma_{wy}$ に腐食による低減係数: $\alpha = 1 - (\Delta w : \text{重量減少率})$ をかけて計算した。健全試験体とモデル試験体においては最大軸応力が実験値と計算値でほぼ一致することがわかる。しかし、腐食試験体においては計算値に比べ実験値がかなり

小さく計算値の約50%程度の応力しかない試験体がある。これらは、腐食重量減少率が30%以上のものであるが、その原因は荷重前から局部腐食により鉄筋が切れている部分がありコンファインド効果が無くなっていることと、腐食膨張圧によってコンクリート内部にもひびわれが生じ、応力を受ける有効断面積が減少したのがその原因であると考えられる。従って、鉄筋が腐食した場合のコンファインドコンクリートの最大耐力は、鉄筋の平均断面欠損から算定した耐力よりはもっと低下すると考えられる。

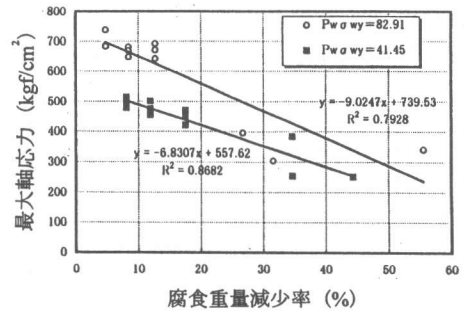


図-7 腐食重量減少率と最大軸応力

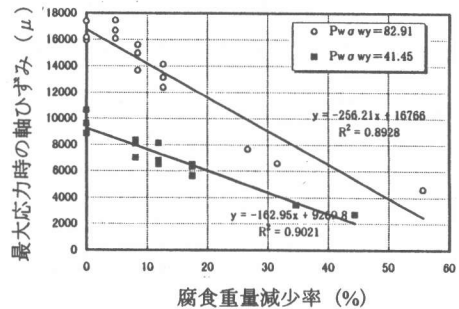


図-8 腐食重量減少率と最大軸応力時の軸ひずみ

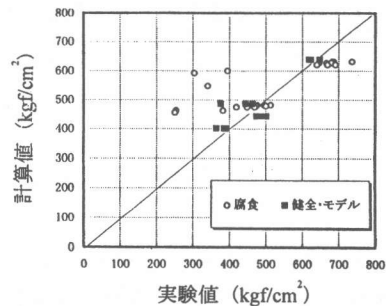


図-9 最大軸応力の実験値と計算値の比較

一方、健全試験体の最大軸応力及び軸ひずみを1とし、それに対する腐食試験体の最大軸応力比及び軸ひずみ比と腐食重量減少率との関係をそれぞれ図-10及び図-11に示す。腐食初期段階から腐食重量減少率15%までは、最大軸応力は腐食膨張圧による横拘束力増加で若干大きくなるが、約15%からは急激に低下し約30%以上では0.5と一定になり、コンファインド効果が完全になくなったと考えられる。また、最大軸応力時の軸ひずみは腐食初期段階から低下し腐食重量減少率約35%でその比が0.3となり一定になった。この結果から横補強筋の腐食程度が約30%を越えるとコンクリートのコンファインド効果はなくなると考えられる。

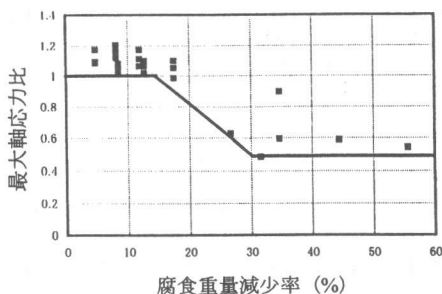


図-10 腐食重量減少率と最大軸応力比

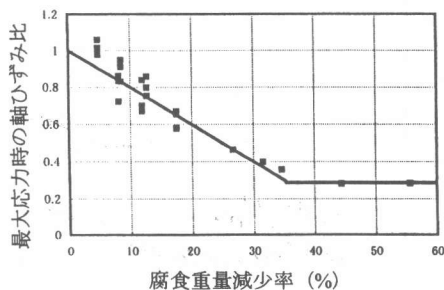


図-11 腐食重量減少率と最大軸応力時の軸ひずみ比

#### 4. まとめ

以上の実験結果及び考察を通じて得られた結果を以下に示す。

(1) 横補強筋であるスパイラル筋を腐食させた腐食試験体において、横補強筋の腐食程度が腐食重量減少率で約15%程度までは最大軸応

力は腐食膨張圧による拘束効果のため少し増加するが、横補強筋の破断歪みは小さくなり、脆性的な破壊を示す。また、腐食が過度に進んで鉄筋の断面欠損が生じ、腐食重量減少率が大きくなると最大軸応力も急激に低下する。従って、横補強筋の腐食は試験体の応力より変形能力にもっと大きい影響を与えることがわかる。

(2) 横補強筋の腐食によるコンファインド効果の低下原因は、腐食による横補強筋の耐力低下あるいは破断及び腐食膨張圧によってコンクリート内部にひびわれが生じ、応力を受ける有効断面積が減少したためであると考えられる。

(3) 健全試験体の最大軸応力に対する腐食試験体の最大軸応力は、腐食重量減少率15%までは、腐食膨張圧による横拘束力の増加で若干大きくなるが、約15%からは急激に低下し約30%以上では0.5と一定になった。また、最大軸力時の軸ひずみ比は、腐食初期段階から低下し腐食重量減少率約35%でその比が0.3となり一定になった。従って、横補強筋の腐食重量減少率が30%を越えるとコンファインド効果は完全になくなると考えられる。

#### 参考文献

- (財)国土開発技術センター：平成4年度 New RC 研究開発概要報告書，1992
- 境有紀：高強度材料を用いた鉄筋コンクリート造建物の耐震設計法に関する研究，東京大学学位論文，1990
- 中塚ただし：円形補強筋をもつコンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係について，セメント技術年報 36,255-258，1982
- 谷川恭雄：高強度コンクリートの圧縮靱性改善に関する研究（その1：円形コンファインドコンクリートの1軸圧縮実験），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.511-512，1989.10
- 渡辺史夫：高強度鉄筋によるコンクリートの横補強効果について，セメント技術年報 33, pp.475-478，1979