# 論文 実構造物から採取した腐食鉄筋の座屈性状に関する基礎的な研究

嘉村 弘和<sup>\*1</sup>·Castro Juan Jose<sup>\*2</sup>·金久保 利之<sup>\*3</sup>

要旨:本研究では,鉄筋単体の座屈性状に着目し,沖縄県本島内の3つの解体建築現場より採取した腐食鉄筋 D10の試験体33本を用いて座屈試験を行い,応力-歪関係の検討および,断面減少率が最大荷重に与える 影響の検討を行った。その結果,腐食鉄筋における最小断面積の位置が腹となるモードで座屈が見られ,断 面減少率の増加に伴い最大応力および座屈荷重の低下が見られた。また,最大応力以降の曲線において,座 屈した位置が試験区間端部に近いと曲線が緩やかになる傾向が見られた。既往の研究で定式化されたモデル の式を用いてモデル化を行い,実験値とモデルを比較した。

キーワード:鉄筋腐食,断面減少,座屈,応力-歪関係

## 1.はじめに

近年,建設から年数の経った鉄筋コンクリート造構造 物が増加傾向にある。それに伴い,環境作用による構造 物の経年劣化が懸念される。また,沖縄県における鉄筋 コンクリート造構造物は,昭和47年5月の日本復帰を 契機としてコンクリート工事が急増し,海砂の需要が増 加したが,当時は洗浄した海砂の入手が不可能であった ため、生コンクリート用細骨材の塩分含有量は規定値を 超えて使用されていた<sup>1)</sup>。そのため,多くの鉄筋腐食に よる劣化構造物をもたらした。

腐食鉄筋の引張性能に関する研究は多数されているが, 座屈性能に関する研究はあまりなされていない。既往の 研究<sup>2)</sup>では,健全鉄筋,切削鉄筋,電食による腐食鉄筋 の座屈荷重,応カー歪関係の検討および最大応力以降の 応カー歪関係のモデル化の提案が行われた。

本研究では,解体建築現場(以下,現場)より採取し た異形鉄筋を用いて座屈試験を行い,応力-盃関係の検 討および断面減少率が最大荷重に与える影響の検討,最 大応力以降の応力-盃関係のモデル化を行う。

#### 2. 試験概要

#### 2.1 試験体

本研究の試験体は沖縄県内の3つの現場より採取した 異形鉄筋を使用した。採取場所等の詳細を表-1に示す。 鉄筋はD10である。異なる種類の節を持った異形鉄筋が 3種類である。採取した鉄筋の種類を図-1に,採取した 試験体の例を図-2に示す。

# a) F 現場腐食鉄筋

海岸から直線距離で約2km離れた海抜約50mの土地に 立地する築約30年の鉄筋コンクリート造構造物から採 取した鉄筋であり,試験体数は10本である。健全状態に

表-1 各シリーズ技	采取場所等詳細
------------	---------

現場名	鉄筋径	試験体数	海岸距離	築年数
F現場		10	約 2 km	約 30 年
P 現場	D10	10	約1km	46 年
NI 現場		13	約1km	52 年



図-1 鉄筋の種類



図-2 除錆前の試験体の例

\*1 琉球大学 工学部環境建設工学科建築コース (学生会員) \*2 琉球大学 工学部工学科建築学コース 教授 博士(工学) (正会員) \*3 筑波大学 システム情報系構造エネルギー工学域 教授 博士(工学) (正会員) 近い部分が多かったが、局所的に著しく腐食による断面 欠損を起こしていた。

# b) P 現場腐食鉄筋

沿岸から直線距離で約 1km 離れた海抜約 7m の土地に 立地する築 46 年の鉄筋コンクリート造構造物から採取 した鉄筋であり,試験体数は 10 本である。健全状態に近

番号	最小断面積		平均断面積	
	(mm <sup>2</sup> )	減少率(%)	(mm²)	減少率(%)
F1	33. 44	55. 74	56.29	25. 49
F2	43.71	42.14	68.54	9. 27
F3	64. 93	14. 05	73. 73	2. 40
F4	67.71	10. 37	74. 78	1.01
F5	60.65	19. 72	74. 15	1.84
F6	69.91	7.45	74.67	1. 15
F7	54. 27	28. 16	74. 26	1.69
F8	58.93	21.99	72. 52	4.00
F9	41.17	45.50	67.14	11. 12
F10	71.93	4. 79	75.54	0.00

表-2 F現場鉄筋詳細

表-3	Ρ	現場鉄筋	詳細
-----	---	------	----

番号	最小断面積		平均断面積	
	(mm <sup>2</sup> )	減少率(%)	(mm²)	減少率(%)
P1	69.91	4.09	72.89	0.00
P2	45.39	37. 73	63.73	12. 57
P3	55. 22	24. 25	67.22	7.79
P4	47.84	34. 37	61.46	15.65
P5	59.68	18. 12	70.08	3.86
P6	59.62	18. 22	66.69	8.51
P7	64. 08	12. 10	69.63	4. 48
P8	59.46	18.40	68.87	5.52
P9	53.55	26. 53	64.82	11.07
P10	61.97	14.99	71.40	2.05

東口	最小断面積		平均断面積	
留亏	(mm <sup>2</sup> )	減少率(%)	(mm <sup>2</sup> )	減少率(%)
NI1	58. 22	21.85	72. 26	3. 01
NI2	64.89	12.89	73. 42	1. 45
NI3	58.76	21.12	71.75	3.69
NI4	45. 78	38.55	67.91	8.84
NI5	47.90	35.70	65.58	11.98
NI6	48.83	34.46	62.79	15. 72
NI7	55.48	25. 53	65.00	12. 75
NI8	61.44	17.53	72. 05	3. 29
NI9	57.61	22.67	69.70	6. 45
NI10	41.14	44. 78	66. 10	11. 28
NI11	58.19	21.90	73. 93	0. 77
NI12	66.58	10.63	74. 50	0. 00
NI13	57.28	23. 12	69.53	6. 67



い部分が多かったが,広範囲に腐食による断面欠損を起 こしているものも見られた。

#### c) NI 現場腐食鉄筋

沿岸から約 1km 離れた海抜約 4m の土地に立地する築 52 年の鉄筋コンクリート造構造物から採取した鉄筋で あり,試験体数は13本である。F現場と同様に局所的に 断面欠損を起こしているものがあった。

## 2.2 試験体の矯正および断面計測

現場より採取した試験体は屈曲していたものが多く, ベンチバイスおよびハンマーを用いて試験体を直線に矯 正した。除錆方法はJCI規準<sup>3)</sup>に準拠し,腐食鉄筋を10% クエン酸アンモニウム水溶液に適当時間浸漬させ除錆を 行った。大きく断面欠損をしている試験体は,錆が残る 状態のものが見られたため,素地を傷めない範囲で欠損 を起こしている部分は重点的に除去した。除錆後の全試 験体の詳細を表-2~表-4に示す。

断面計測方法を図-3 に示す。断面積の計測はノギス を用いて 2mm ピッチで健全部分は縦節を含んだ状態で直 交 2 方向で計測を行い, 欠損を起こしている部分は詳細 に計測するため, 縦節を含んだ状態で周囲約 45°で4方 向で計測を行った。最小断面積部分が計測位置にない場 合は考慮して計測を行った。断面減少率の算出方法につ いては, 現場毎の試験体で F10, P1, NI12 が健全状態に 近く, 平均断面積が最も大きかったため基準断面積とし, それらの値を用いて断面減少率を算出した。腐食鉄筋試 験体の断面積の計測結果の例を図-4 に示す。実線は計 測結果を断面積で算出した値を示しており, 破線は公称 断面積(71.33mm<sup>2</sup>)を示している。

### 2.3 試験方法

試験方法および治具挿入部分の研磨した試験体の例を 図-5および図-6に示す。加力には2000kN万能試験機 を使用し、単調圧縮載荷を行った。試験区間は16d(d は呼び径)である。試験機のクロスヘッドに固定用の治 具を取り付け, 冶具内にベンチグラインダーで研磨した 鉄筋の端部を 8d 挿入することで境界条件を固定とし, 座屈試験を行った。冶具の孔径は 9.6mm とし, 孔と研磨 した鉄筋の間に隙間が生じないようにした。計測項目は, 圧縮力および冶具間の 3 箇所における軸方向変形である。 試験区間における圧縮変形は,計測された軸方向変形か ら冶具内に挿入した部分の変形(弾性を仮定)を差し引 くことにより求めた。

# 3. 試験結果と考察

## 3.1 試験後の座屈モード

座屈試験後の試験体を図-7 に示す。健全状態に近い



図-5 試験方法



図-6 研磨後の試験体の例



鉄筋(最小断面積減少率が約10%以下の試験体)では中 央部分で腹となるモードで座屈が見られた。最小断面積 減少率が約25%以下の試験体では欠損部分が座屈する 位置に影響を与える傾向にあったが,変形モードは健全 状態に近い試験体と同一の傾向にあった。最小断面積減 少率が約25%を超える試験体は座屈する位置に影響を 与え,鋭角なモードで座屈が見られた。NI8は最小断面 積から座屈をせず,中央から座屈した。変形モードは健 全状態に近い試験体と同一の傾向であった。

#### 3.2 応力- 歪関係

各現場の腐食鉄筋の応力-歪関係を図-8~図-10 に



図-8 F現場鉄筋



応カー歪関係



示す。応力の算出方法は,最大荷重を公称断面積で除し て算出した。どの鉄筋も最小断面積減少率の増加により 最大応力の低下が見られた。試験体の最大応力以降の曲 線の応力低下は断面減少率に関わらず,60MPa付近で緩 慢になる傾向にあった。割れを起こした試験体の例を図 -11に示す。欠損位置が腹となるモードで座屈した試験 体のうち,引張側で割れを起こすもの(F2,NI4,NI9) があり,歪約0.08以降で応力の低下が見られた。

応力を各試験体の最大応力で基準化し,最大応力時の 歪を原点に平行移動した応力-盃関係の例を図-12 に 示す。最大応力以降の曲線は,断面減少率の増加に伴い 応力の低下が緩やかになる傾向が見られ,欠損位置で腹 となるモードで座屈した試験体の曲線は,健全状態に近 い試験体よりも応力低下が緩やかになる傾向が見られた。 また,座屈する位置によって曲線に差異が見られ,試験 区間端部に欠損があり,欠損位置で腹となるモードで座 屈した試験体(例えば,P2)では,中心付近に欠損があ り,欠損位置が腹となるモードで座屈した試験体(例え ば,F2)より,曲線の応力低下が緩やかになる傾向であ った。

## 3.3 座屈荷重と最小断面積減少率の相関関係

座屈荷重に対する最小断面積減少率の相関関係を 図-13に示す。最小断面積の減少により,座屈荷重の低 下が見られた。相関は r=0.90 と非常に強い相関が見ら





図-12 基準化した応力-歪関係の例

れた。なお、本試験体は屈曲した状態のものを直線矯正 しているため強度への影響が懸念されるが、本論ではそ の影響がないものとした。

# 4. 最大応力以降の応力-歪関係のモデル化

#### 4.1 モデル化の方法

既往の研究<sup>2</sup>により,異形鉄筋 D10、D13 および D16 の 試験結果を用いてモデル化が行われ,最大応力以降の応 力歪関係が以下の式で定式化されている。

# a)健全鉄筋

$$\sigma = \sigma_b (\varepsilon_b / \varepsilon)^{\beta}$$
(1)  
$$\beta = 0.051(L/d)$$
(2)

ここで、

 $\sigma_b$ :座屈強度(最大応力)

- *ε*<sub>h</sub>:座屈開始時歪(最大応力時の歪)
- L:試験長
- d:鉄筋径





b)腐食鉄筋

腐食鉄筋では、断面減少の増加につれて最大応力以降 の曲線が緩やかになることから式(1)に対して最小断面 積における断面減少率を考慮し、式(3)で定式化されて いる。

 $\sigma = \sigma_{max}(\varepsilon_b/\varepsilon)^{\beta\sqrt{1-\alpha/100}}$ (3)

- < 、

σ<sub>max</sub>:最大応力
α:最小断面積減少率

#### 4.2 試験結果とモデルとの比較

既往の研究より得られた式を用いて作成したモデルと 試験結果との比較を図-14~図-16 に示す。NI8 は 3.1 より健全の式で行った。提案されたモデルでは最大応力 以降から歪 0.05 未満までは概ね再現出来ているが,そ れ以降の曲線ではあまり再現出来ない試験体が多く見ら れた。再現出来ていない試験体において,曲線は実験値 がモデルよりも緩やかな傾向にある。座屈変形の大きい 領域では局部的な塑性化が大きく進行して鉄筋が歪硬化 領域に入り,鉄筋断面最縁では引張強度に達しているこ とも考えられ,既往の研究で用いられた鉄筋の降伏比と 本論の試験体の降伏比の差異が一因ではないかと思われ る。

## 5. まとめ

本研究では,沖縄本島内の3つの解体建築現場から採 取した腐食鉄筋計 33 本の座屈試験を行い,モデル化を 行った。





図-14 F現場鉄筋の試験結果とモデルとの比較の例



図-16 NI 現場鉄筋の試験結果とモデルとの比較の例

体では欠損部分が座屈位置に影響を与える傾向に あったが、変形モードは健全状態に近い試験体と同 一の傾向であった。約25%以上の試験体では欠損部 分が座屈位置に影響を与え、鋭角なモードで座屈が 見られた。

- 2) 応カー歪関係では、最小断面積減少率の増加により 最大応力の低下が見られ、座屈後の応力の低下は断 面減少率に関わらず、60MPa 付近で緩慢になる傾向 にある。
- 3) 最大応力以降の曲線は、最小断面積減少率の増加により緩やかになる傾向が見られた。
- 4) 最大荷重に対する最小断面積減少率の相関関係では 最小断面積の減少により,座屈荷重の低下が見られ, r=0.90と非常に強い相関を示した。
- 5) 提案されたモデルでは座屈開始以降から歪 0.05 未 満までは概ね再現出来ているが、それ以降の曲線で

あまり再現出来ない試験体が多く見られた。

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17K18917 (金久保利之教授 代表)の助成を受けた。また冶具作成や実験では砂川恒 雄氏,照屋泰彦氏,山里將史氏,琉球大学工学部技術職 員にご尽力を頂いた。ここに記し,感謝の意を表す。

# 参考文献

- 大城武:沖縄の塩害問題, さろん, Vol. 48, No. 11, 2010.11.
- 2)墨野倉駿,金久保利之,八十島章,大屋戸理明:腐食 を模擬した鉄筋の座屈性状に関する研究,コンクリー ト工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 973-978, 2015.
- JCI-SC1, コンクリート中の鋼材の腐食評価方法,日本コンクリート工学協会,2004.