

報告

[1143] ステンレス異形棒鋼の機械的性質及びせん断補強筋に用いたRCはりのせん断実験

正会員 松嶋育弘（東京理科大学工学部）

正会員 ○中野克彦（東京理科大学工学部）

井上隆夫（鹿島建設建築設計本部）

古川知明（新日本製鐵ステンレス鋼技術部）

1.はじめに

近年、コンクリート中の鉄筋の腐食によるコンクリート構造物の劣化が問題となっている。腐食の原因は、全体的なアルカリ性の喪失（炭酸化）と塩化物イオンの付着であり、工業、海洋、農業環境化等の露出環境条件が厳しい場合、又は、入手し得る材料の品質が劣るために良質のコンクリートが作り出せない場合等では、耐食性合金鋼であるステンレス鋼が適している。表1にステンレス鋼の一般的な化学成分を示すが、合金成分量により、マルテンサイト系(SUS410)、フェライト系(SUS430)、オーステナイト系(SUS304)の3種類に分けられ、クロム・ニッケルの含有量を増すことにより耐食性が高まる性質のものである。特に、オーステナイト系は約8%のニッケルを含み塩基物の高い環境化において有効であり非磁気性である。一方、製造プロセスを考慮せず、合金成分量のみによるコストを比較すると、SUS410, 430, 304についてそれぞれ、鉄筋の4.7, 4.3, 5.7倍となり、アルカリ度、塩化物イオン等の環境条件、及び、経済性により鋼種を選択することが重要である。本研究では、コンクリート構造物の抜本的な防食策として鉄筋の代りにステンレス鋼を利用する方法をとりあげ、上記の3鋼種について異形棒鋼を試作し、最初に機械的性質の把握を行い、次に梁部材の曲げ降伏を保障する部材耐力を把握するために、せん断補強筋としての効果を実験により明らかにし、RC部材への利用について検討することを目的とする。

2.ステンレス異形棒鋼の機械的性質

2.1 一方向引張試験

試験片はJIS G 3112の規格・寸法により、ステンレス鋼3種(SUS410, SUS430, SUS304)、3径種(D10, D13, D19)

表1 ステンレス鋼の化学成分 (%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SUS410	0.15以下	1.00以下	1.00以下	0.040以下	0.03以下	0.60以下	11.5~13.5
SUS430	0.12以下	0.75以下	1.00以下	0.040以下	0.03以下	0.60以下	16.0~18.0
SUS304	0.06~0.08	1.00以下	2.00以下	0.045以下	0.03以下	8.0~10.5	18.0~20.0

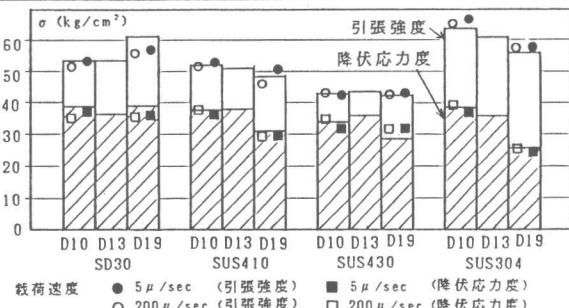


図3 各種異形棒鋼の降伏応力度・引張強度

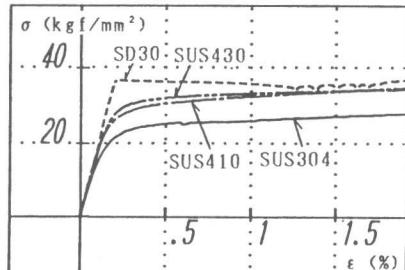


図1 D19 σ - ε 曲線

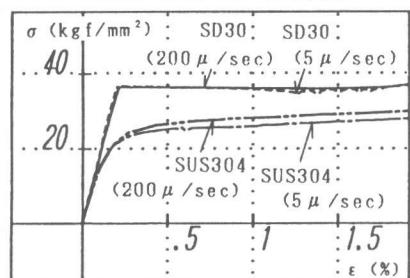


図2 D19 σ - ε 曲線(載荷速度)

の合計9種、試験方法はJIS Z 2241 金属材料試験法に従った。また、 $200\mu/\text{sec}$ 、 $5\mu/\text{sec}$ の2種類の載荷速度を目標にしてステンレス鋼3種、2径種(D10、D19)について引張試験を行った。尚、比較のため鉄筋SD30を用いて同様の試験を行った。

各種異形棒鋼、及び、載荷速度を要因とした引張試験の応力度(σ) - ひずみ度(ε)曲線をそれぞれ図1、図2に示す。ステンレス異形棒鋼の特徴は、かなり低い応力レベルで直線性を失い、歪增加に伴い耐力も増加していく点である。図3に各種異形棒鋼、及び、載荷速度を要因とした試験片の引張強度および降伏応力度をプロットしたものを示す。ステンレス鋼の降伏応力度については、0.2%offset耐力の歪値が大きすぎる嫌いがあり、0.1%耐力¹⁾、0.02%耐力²⁾を提唱している報告があるが、本実験では、0.2%offset耐力により求めた。図3より、鉄筋の降伏比が0.64～0.72、ステンレス鋼はSUS410、SUS430、SUS304についてそれぞれ0.65～0.75、0.68～0.83、0.45～0.6となり、伸びについてはSD30、SUS410、SUS430、SUS304についてそれぞれ24～28%、26～30%、33～36%、44～58%となり、SUS304がかなり延性のある材料であることがわかる。

載荷速度の影響については、鉄筋では、引張強度はあまり影響を受けないが、降伏応力度は、載荷速度の増大に伴って上昇する³⁾、ステンレス鋼304では、載荷速度の増大に伴い、降伏応力度は上昇し引張強度は低下する¹⁾、また、降伏応力度と載荷速度依存性の関係²⁾等が報告されている。本実験範囲内では、図2 図3より歪速度が $5\mu/\text{sec}$ と $200\mu/\text{sec}$ の違いでは、はっきりとした傾向は現れないが、鉄筋においては載荷速度の影響を受けず、ステンレス鋼特にSUS304においては、載荷速度の増大に伴い、降伏応力度が上昇し、引張強度が低下する傾向が見られた。

2.2 繰返し引張圧縮試験

ステンレス鋼3種(SUS410、SUS430、SUS304)及び鉄筋(SD30)について、異形棒鋼D19、D25の試験体を用いて正負繰返し載荷を行い、応力度(σ) - ひずみ度(ε)関係を比較した。試験片は、図4に示すように長さ37cmに切断し、その両端をスプライススリーブによって、ねじ鉄筋(D25)に継手をし、検長7cmとした。加力は図4に示すように100tonアムスラー型万能試験機に鉄骨フレームを組込んだ加力装置を用い、引張・圧縮時ともに試験片に貼付した歪ゲージによる歪制御のもとに行った。

図5、図6にそれぞれSD30、SUS304の応力度(σ) - ひずみ度(ε)関係を示すが、一方向引張り試験と同様に鉄筋に比べてステンレス鋼は明確な降伏点、降伏棚が現れない違いはあるが、全体の履歴としては、除荷部分の剛性が一方向引張り試験の剛性と等しく、剛性が低下するバウシンガー部分、および正負繰返し歪が大きくなるにつれて応力が上昇する傾向を示す点では鉄筋もステンレス鋼も同様であった。

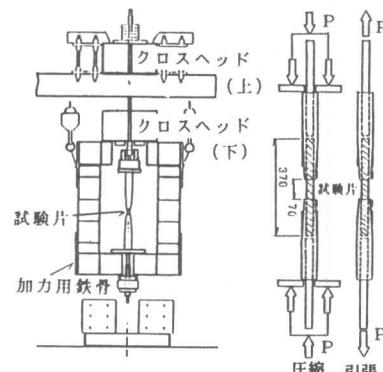


図4 加力装置・試験片形状

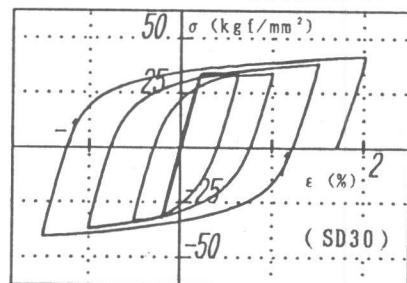


図5 引張・圧縮 σ - ε 曲線

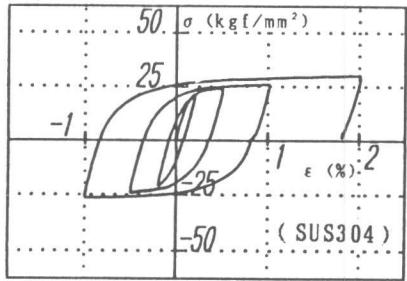


図6 引張・圧縮 σ - ε 曲線

3. ステンレス異形棒鋼のRC梁部材への利用

3. 1 実験概要

表2に試験体一覧、表3に鋼材材料試験結果を示す。試験体に与えた要因は、1)せん断スパン比(a/D)、2)せん断補強筋の種類、3)せん断補強量の3種類とし合計12体である。試験体は、図7に試験体形状を示すが、 $b \times D = 17.5 \times 27\text{cm}$ の矩形断面で、大野式加力において試験区間のせん断力が $Q=1/3P$ となるような形状とし、一方向単調載荷を行った。せん断補強筋にはステンレス3種類(SUS410, SUS430, SUS304)、及び、鉄筋SD30について、それぞれD10を使用し、主筋にはせん断破壊を先行させるためD19に焼入れ加工を施したもの用いた。また、実験時のコンクリート圧縮強度は平均 283kg/cm^2 であった。

3. 2 実験結果

表2に実験結果およびせん断ひび割れ発生荷重・せん断終局耐力の実験値と計算値との比較を示す。主筋に貼付した歪ゲージによると、曲げ降伏した試験体はなかった。以下、破壊性状、変形性状、せん断耐力について検討する。

a. 破壊性状 最終破壊状況の一例を図8に示す。せん断補強筋の種類の違いによって比較を行うと、 $a/D=1.5$ の試験体No.1(SD30)、No.4(SUS410)においては、加力点を目指すせん断ひび割れが大きく口開き、最大耐力($Q=17.3\text{ton}$, $Q=16.3\text{ton}$)に至るせん断引張破壊を起こした。No.5(SUS430)も同様に、両側のせん断ひび割れが口開いたが、 $Q=11.0\text{ton}$ で、支点間を結ぶひび割れが生じ、その後最大耐力($Q=14.5\text{ton}$)に至る斜張力破壊の様相を示した。また、No.6(SUS304)においては、右側のせん断ひび割れから部材上部に斜ひび割れが進展し、左上加力点が圧壊して最大耐力($Q=12.5\text{ton}$)に至るせん断圧縮破壊の様相を示した。 $a/D=2.0$ の試験体No.7(SD30)、No.10(SUS410)、No.11(SUS430)、No.12(SUS304)においては、違いが見られず、せん断ひび割れ発生後、上端主筋に沿って軸方向に生じたひび割れがコンクリートを割り裂き、加力点が圧壊し、変形が進んで最大耐力に至る割り裂き破壊の様相を示した。

b. 変形性状 せん断補強筋の種類を要因とした $a/D=1.5$ の試験体のせん断力(Q) - 支点間相対変位(δ)関係を図9に示す。4体を比較してみると、せん断ひび割れ発生までの剛性は概ね等しく、その後、SD30とSUS410の試験体においてはほぼ同等に、その他は、SUS304, SUS430の

表2 試験体一覧・実験結果一覧

No.	試験体	eQ_{Sc} (tf)	cQ_{Sc} (tf)	eQ_{Su} (tf)	cQ_{Su} (tf)	eQ_{Sc} cQ _{Sc}	eQ_{Su} cQ _{Su}
1	SDI-1.5-S-90	5.3	6.0	17.3	13.8	0.88	1.25
2	SUA-1.5-S-41	4.7		12.0	12.2	0.78	0.98
3	SUA-1.5-S-68	4.0		13.1	13.3	0.67	0.98
4	SUA-1.5-S-90	4.0		16.3	14.1	0.67	1.16
5	SUB-1.5-S-90	4.7		14.5	13.8	0.78	1.05
6	SUC-1.5-S-90	3.3		12.5	14.1	0.55	0.89
7	SDI-2.0-S-90	3.3	5.1	12.5	11.8	0.65	1.06
8	SUA-2.0-S-41	3.7		9.6	10.2	0.73	0.94
9	SUA-2.0-S-68	3.7		14.0	11.3	0.73	1.24
10	SUA-2.0-S-90	3.7		15.0	12.1	0.73	1.24
11	SUB-2.0-S-90	3.3		13.6	11.8	0.65	1.15
12	SUC-2.0-S-90	5.0		13.5	12.1	0.98	1.12

[記号説明]

せん断ひび割れ発生荷重: cQ_{Sc} (大野・荒川mean式), eQ_{Sc} (実験値)

せん断終局耐力 : cQ_{Su} (大野・荒川mean式), eQ_{Su} (実験値)

$$cQ_{Sc} = b \cdot j \cdot k_c \cdot (c \sigma_e + 500) \cdot 0.085 / (M/Q_d + 1.7)$$

$$cQ_{Su} = b \cdot j \cdot k_u \cdot k_p \cdot (c \sigma_e + 180) \cdot 0.12 / (M/Q_d + 0.12) + 2.7 \sqrt{p_w \cdot w \cdot \sigma_y}$$

$$j_k = 0.78, k_u = 0.87, k_p = 0.82 P_t^{0.22}, c \sigma_e: \text{コンクリート圧縮強度}$$

表3 鋼材材料試験結果

鋼種	降伏点 (kg/mm ²)	降伏歪度 ($\times 10^{-6}$)	引張強度 (kg/mm ²)	ヤング係数 (kg/mm ²)
SD30	34.6	1850	50.2	18700
SUS410 (D10)	37.7	4070	53.5	18100
SUS430	33.9	4150	44.4	15900
SUS304	38.5	4510	67.6	15900
主筋(D19焼入)	87.3	5900	108.0	17600

試験体説明】 SDI-1.5-S-90

① ② ③

①せん断補強筋種類

SDI: SD30 SUA: SUS410 SUB: SUS430 SUC: SUS304

②せん断スパン比: a/D ③せん断補強筋比: $p_w \times 1000$

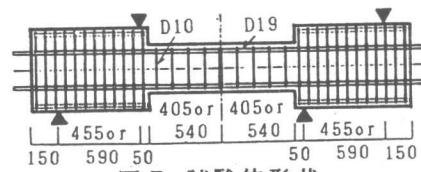


図7 試験体形状

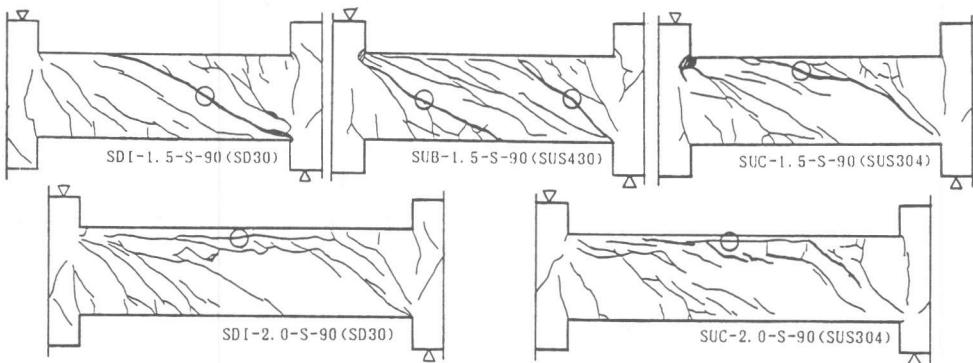


図 8 最終破壊状況一例

順に大きく剛性を低下させ、SD30、SUS410、SUS430、SUS304についてそれぞれ、 $\delta = 17.9\text{mm}, 16.3\text{mm}, 14.5\text{mm}, 12.5\text{mm}$ で最大耐力に達した。 $a/D=2.0$ の試験体も同様にSUS304、SUS430、SUS410の順に大きく剛性を低下させ最大耐力に達した。

c. 耐力 表2に実験値と計算値との比較を、図10に大野・荒川mean式との比較を示す。せん断補強筋種類により、せん断ひび割れ発生荷重については違いは見られず、せん断耐力については、SUS410、SUS430、SUS304の順に耐力が低下する傾向が見られ、実験値の計算値に対する割合は、0.9~1.2倍程度であった。また、せん断補強筋にSUS410を使用し、せん断補強筋量を要因とした部材では、せん断補強筋比の増加に伴い耐力が増加した。

4. まとめ

今回、試作したステンレス異形棒鋼の引張特性は、明確な降伏点が現れず、正確には把握できなかったが、載荷速度にも影響を受ける部材であり、特にSUS304は降伏比が大きく延性に富んだ材料であると言える。また、各鋼種とも引張・圧縮試験による履歴特性、及び、梁のせん断性状は鉄筋を用いたものと同様な挙動を示し、十分に構造材料となりうるものと考えられる。

今後、ステンレス異形棒鋼をRC部材に利用するにあたり、機械的性質を明確に定量化し、使用環境条件に応じた鋼種を選択することが重要と考えられる。

〔謝辞〕本研究をまとめるにあたり御指導・御協力頂いた新日本製鐵(株)・鹿島建設(株)の皆様、並びに昭和63年度松崎研究室卒研生 後藤俊章、馬淵優子 吾君に深く感謝します。

〔参考文献〕

- 1) 橋本、加藤、大竹:ステンレス鋼(SUS304)の機械的性質、建築学会大会 pp1119-1120 1988年
- 2) 竹下、中澤、木村、安保:常温クリープと引張特性の関係、日本鉄鋼協会春季講演大会 1989年
- 3) 若林、中村、吉田、岩井:鉄筋コンクリートの応力-歪関係に対する歪速度の影響(その1)普通丸鋼鉄筋の動的引張載荷実験、建築学会大会 pp1545-1546 1978年

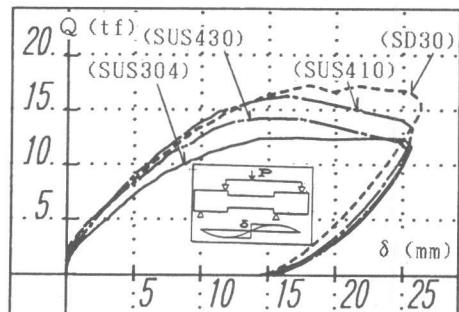


図 9 Q - δ 関係

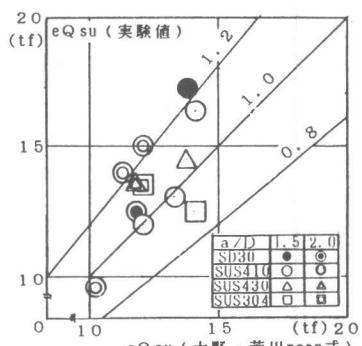


図 10 せん断終局耐力の実験値と計算値との比較