

報告

[1206] ステンレス異形棒鋼を用いたRC梁の曲げ・せん断実験

正会員 松崎育弘 (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

筆者らは、これまでにコンクリート構造物の抜本的な防食策として鉄筋の代わりにステンレス鋼を利用する方法を取り上げ、異形棒鋼を試作し、構造物への利用に関する研究を進めてきた。

昨年度の報告¹⁾では、ステンレス鋼3種(SUS304, SUS410, SUS430)について、素材の機械的性質及びせん断補強筋に用いた場合のRC梁の構造性能を把握する為に実験を行い、十分に構造物と成り得ることを報告した。本報は、昨年度の結果を踏まえ、オーステナイト系ステンレス鋼SUS304を取り上げ、シリーズ1, 2では、せん断補強筋に用いることによりせん断性状を把握し、シリーズ3では、主筋・せん断補強筋に用いることにより、曲げ性状を把握することを目的とする。

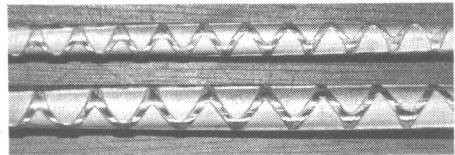


写真1 ステンレス異形棒鋼の形状

2. ステンレス異形棒鋼の材料特性

使用したステンレス異形棒鋼は、写真1に示すようなJIS G 3112の規格・寸法に従うものであり、圧延加工したものである。

今回使用したステンレス異形棒鋼と鉄筋の応力度(σ) - ひずみ(ε) 曲線を図1に示す。ステンレス異形棒鋼の材料特性は、低い応力度レベルで直線性を失い、明確な降伏点が現れない点であるが、降伏応力度については、図1に示すように0.2%オフセット耐力を求め、以後の検討に用いた。

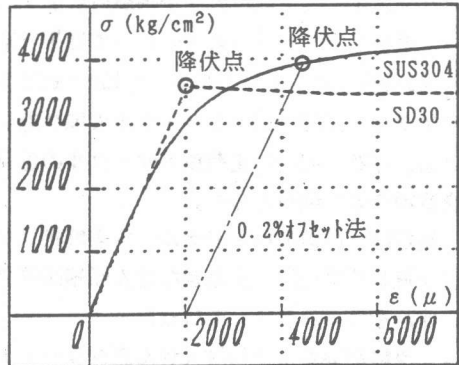


図1 ステンレス異形棒鋼のσ-ε曲線

3. 実験概要

ステンレス異形棒鋼をせん断補強筋に用いたせん断実験2シリーズ、主筋とせん断補強筋に用いた曲げ実験1シリーズを行なった。

3.1 試験体

試験体一覧を表1に、各シリーズの試験体形状・寸法ならびに配筋を図2に示す。

シリーズ1, 2に与えた要因は、せん断補強筋の材質とせん断補強筋量、シリーズ3に与えた要因は、主筋、せん断補強筋の材質とせん断補強筋量である。

表1 試験体一覧

No.	シリーズ	a/d	主筋	せん断補強筋
1	せん断実験	1 2.3	SD35焼入(4-D13) pt=1.24%	SUS304 (pw=0.41%)
2				SUS304 (pw=0.68%)
3				SUS304 (pw=0.90%)
4				SD30 (pw=0.41%)
5				SD30 (pw=0.68%)
6				SD30 (pw=0.90%)
7	せん断実験	2 1.8	SD35(5-D22) pt=2.86%	SUS304 (pw=0.59%)
8				SUS304 (pw=0.89%)
9				SUS304 (pw=1.18%)
10				SD30 (pw=0.59%)
11				SD30 (pw=0.89%)
12				SD30 (pw=1.18%)
13	曲げ実験	3 2.3	SUS304(4-D13)	SUS304 (pw=0.68%)
14				SUS304 (pw=0.90%)
15				SUS304 (pw=0.68%)
16				SUS304 (pw=0.90%)
17				SD30 (pw=0.68%)
18				SD30 (pw=0.90%)

シリーズ1、3の試験区間の断面は、 $b \times D=17.5 \times 27.0\text{cm}$ 、せん断比 $a/d=2.3$ 、主筋は引張側、圧縮側 4-D13で共通であり、シリーズ1においては、せん断破壊を先行させるため、主筋には焼き入れ処理を施し、降伏耐力を高めた。

シリーズ2の試験区間の断面は $b \times D=20.0 \times 40.0\text{cm}$ 、せん断比 $a/d=1.8$ 、主筋は引張側、圧縮側 5-D22の2段配筋で全試験体共通である。また、各シリーズにおいて使用したせん断補強筋は材質によらずD10である。

表2、表3に本実験に用いた鉄筋・ステンレス異形棒鋼、及び、コンクリートの材料特性を示す。

3.2 加力・測定方法

加力は、各シリーズとも図3に示すような逆対称モーメント载荷とした。载荷履歴は、シリーズ1、2では一方向単調载荷により破壊に至らしめ、シリーズ3においては相対変形角 $1/200\text{ rad}$ で1サイクル、 $1/100\text{ rad}$ で3サイクル、 $1/50\text{ rad}$ で2サイクルの繰り返しとし、 $1/25\text{ rad}$ のみ正荷重1サイクルの正負交番繰り返し载荷とした。

測定は、荷重をロードセル、支点間相対変位を電気式変位計、主筋及びせん断補強筋のひずみをひずみゲージで行った。

4. 実験結果および検討(せん断シリーズ)

表4に実験結果一覧を示す。以下、破壊性状、変形性状、せん断表3 コンクリート材料試験結果
断終局耐力について検討を行う。

4.1 破壊性状

図4にせん断補強筋により耐力が決定するせん断引張破壊を示した試験体(シリーズ1: $p_w=0.68\%$, シリーズ2: $p_w=0.89\%$)の最大耐力時の

破壊状況、及びせん断補強筋のひずみ分布を示す。シリーズ1、2共にせん断補強筋に鉄筋またはステンレス異形棒鋼を用いることによる破壊性状の違いは見られなかった。尚、全試験体とも主筋の降伏は確認されず、せん断破壊した。

図4に示すように、シリーズ1、2のいずれの試験体も最初に左右の材端部に発生したせん断ひび割れが主筋に沿うひび割れへと進展し、せん断ひび割れが口開くことにより破壊に至った。

シリーズ1においてせん断補強量を要因とした試験体を比較すると、 $p_w=0.41\%$ では、右側のせん断ひび割れを横切る補強筋が、 $p_w=0.68\%$ では、両側のせん断ひび割れを横切る補強筋の降伏により、ひび割れが拡大し、最大耐力に達した。一方、 $p_w=0.90\%$ では、せん断補強筋は降伏するこ

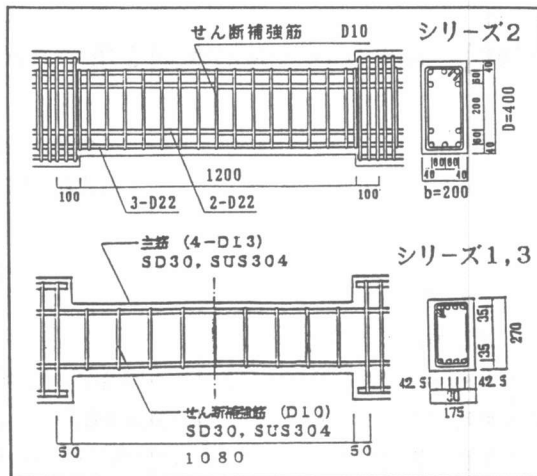


図2 試験体形状

表2 鋼材材料試験結果

鋼種	降伏点 (kg/cm^2)	降伏歪度 ($\times 10^{-3}$)	引張強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 $\times 10^4$ (kg/cm^2)	シリーズ	
主筋	SD35焼入(D13)	10430*	7820*	10430	1.81	1
	SD35 (D22)	3730	2020	5840	1.84	2
	SUS304 (D13)	3570*	4100*	6360	1.86	3
	SD30 (D13)	3445	1864	6760	1.85	3
補強筋	SUS304 (D10)	3850*	4510*	6760	1.59	1, 2, 3
	SD30 (D10)	3850	1990	5925	1.93	2
	SD30 (D10)	3550	2000	5160	1.77	1, 3

*:0.2%オフセット耐力

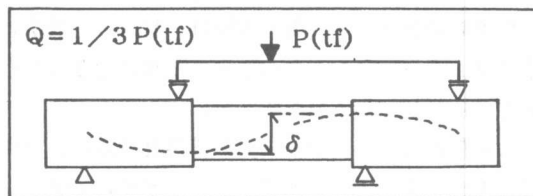


図3 加力・変形模式図

シリーズ	圧縮強度 (kg/cm^2)	引張強度 (kg/cm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{ kg}/\text{cm}^2$)
1	258	24.7	2.68
2	214	22.3	2.53
3	258	24.7	2.68

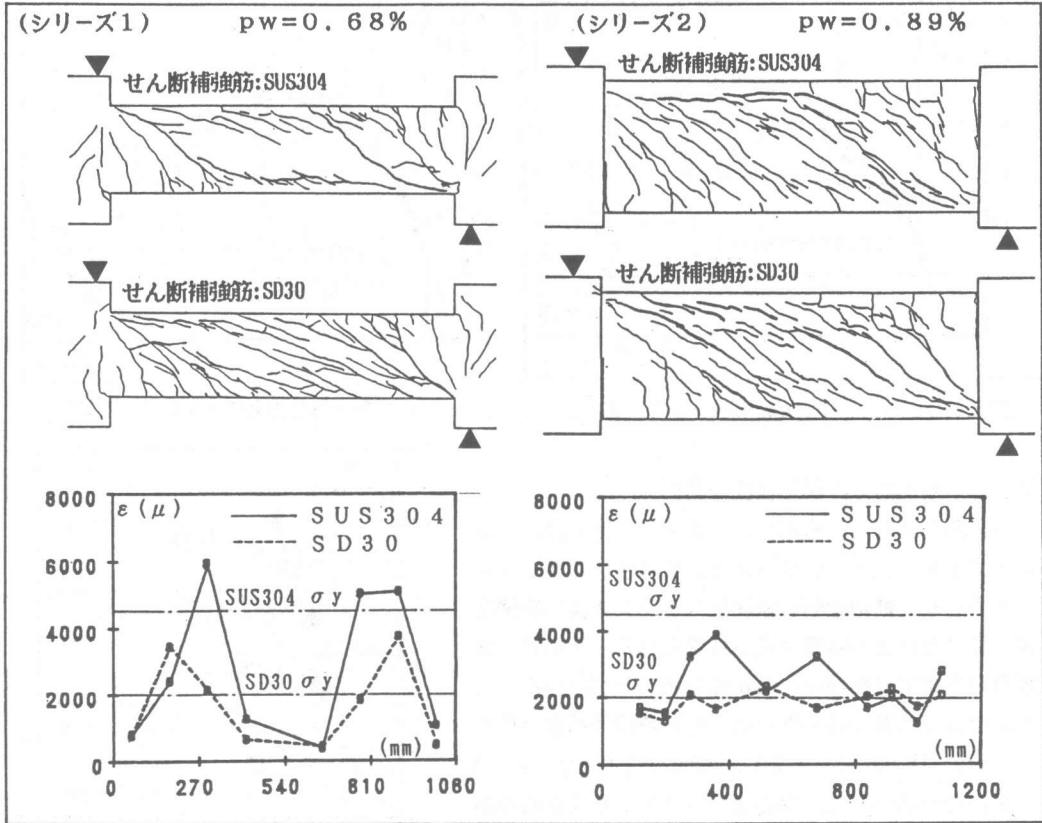


図4 最大耐力時の破壊状況及びせん断補強筋のひずみ分布

となく右側のせん断ひび割れが上端主筋に沿って進展し、左側上部加力点付近の圧壊で終局耐力に達した。シリーズ2においては、

シリーズ1に比べて、ひび割れが分散し、補強筋のひずみが荷重の増加とともに均一に増加する傾向が見られた。pw=1.18%でせん断補強筋にSD30を用いた試験体が、右側下部の加力点付近の圧壊により終局耐力に達したのを除いて、他の試験体は、両側のせん断ひび割れから主筋に沿って進展したひび割れの拡大により終局耐力に達した。尚、各試験体のせん断補強筋のひずみ分布より、ステンレス異形棒鋼を用いた試験体は鉄筋を用いた試験体に比較して高いひずみ領域で終局耐力に達しており、降伏棚のないステンレス鋼の素材の性質が現れていると思われる。

表4 実験結果一覧

NO.	せん断補強筋種類	pw (X)	実験値		計算値			
			eQsu (ton)	etsu (kg/cm ²)	crsu ₁ (kg/cm ²)	crsu ₂ (kg/cm ²)	crsu ₁	crsu ₂
1	シリーズ1 SUS304	0.41	9.9	27.4	27.1	36.5	1.01	0.72
2		0.68	13.7	38.0	30.1	53.4	1.28	0.68
3		0.90	13.5	37.4	32.2	61.9	1.16	0.58
4	シリーズ1 SD30	0.41	9.4	26.1	26.6	34.7	0.98	0.72
5		0.68	13.1	36.3	29.6	50.3	1.22	0.69
6		0.90	13.7	38.0	31.6	60.1	1.20	0.60
7	シリーズ2 SUS304	0.59	27.7	47.1	32.4	46.8	1.45	1.01
8		0.89	32.0	54.4	35.3	56.1	1.54	0.97
9		1.18	35.3	60.0	37.7	60.5	1.59	0.99
10	シリーズ2 SD30	0.59	29.0	49.3	32.4	46.8	1.52	1.05
11		0.89	32.4	55.1	35.3	56.1	1.56	0.98
12		1.18	32.5	55.3	37.7	60.5	1.46	0.91

eQsu : 実験値 (せん断終局耐力)
 etsu : 実験値 (せん断終局強度)
 crsu₁ : 計算値 (大野・荒川mean式によるせん断終局強度)
 crsu₂ : 計算値 (終局強度設計指針案式によるせん断終局強度)
 $crsu_1 = 0.098 \cdot ku \cdot pt^{0.23} \cdot (180 + \sigma_B) / (a/d + 0.12) + 2.7 \sqrt{pw \cdot w \sigma_y}$
 $ku = 0.87$ (シリーズ1), $ku = 0.72$ (シリーズ2)
 $crsu_2 = \{b \cdot jt \cdot pw \cdot w \sigma_y \cdot \cot \phi + \tan \theta \cdot (1 - \beta) \cdot b \cdot D \cdot v \cdot \sigma_B / 2\} / (b \cdot j)$

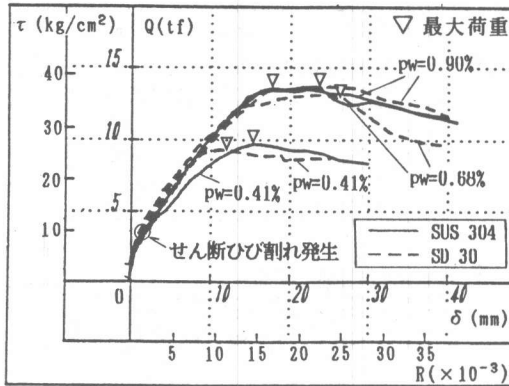


図5 せん断力-相対変位関係(シリーズ1)

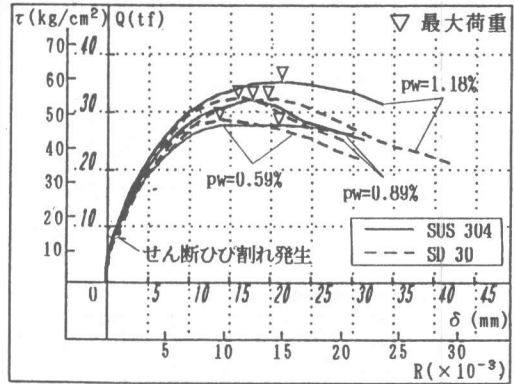


図6 せん断力-相対変位関係(シリーズ2)

4.2 せん断力と相対変位の関係

せん断力(Q)と相対変位(δ)の関係を図5(シリーズ1)、図6(シリーズ2)に示す。シリーズ1、2ともにせん断補強筋に鉄筋とステンレス異形棒鋼を用いることによる明確な違いは見られず、せん断ひび割れ発生までの剛性は、概ね等しいことがわかる。せん断ひび割れ発生後の剛性は、せん断補強筋量が小さい pw=0.41%(シリーズ1)、pw=0.59%(シリーズ2)の試験体においては、鉄筋よりもステンレス異形棒鋼を用いたほうが若干小さくなる傾向があるが、他の試験体においては、同等であると言える。また、せん断補強筋の降伏以前に圧縮破壊した試験体を除き、pwの増加とともに剛性も大きくなるという傾向は、鉄筋を用いた試験体でもステンレス異形棒鋼を用いた試験体でも同様であった。

4.3 せん断耐力

せん断終局強度の実験値・計算値一覧を表4に、大野・荒川mean式による計算値との比較を図7に、終局強度設計指針案式による計算値との比較を図8に示す。

せん断補強筋の降伏以前に圧縮破壊した試験体(図中*印)を除き、pwの増加とともにせん断終局強度は上昇する。実験値の計算値に対する割合は、鉄筋を用いた試験体もステンレス異形棒鋼を用いた試験体も差はなく、大野・荒川mean式を適用した場合には、シリーズ1では、1.0~2.0倍、シリーズ2では、1.5~1.6倍

であり、指針案式を適用した場合には、シリーズ1では、0.6~0.7倍、シリーズ2では、0.9~1.0倍であった。これらより、せん断耐力を評価する式には検討が必要であるが、ステンレス異形棒鋼を用いたRC梁のせん断耐力は、鉄筋を用いたRC梁と同様に評価できる。

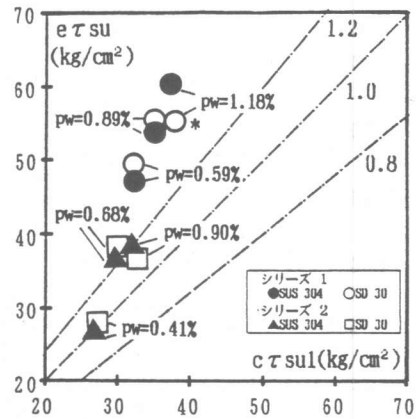


図7 実験値と計算値との比較(大野・荒川mean式)

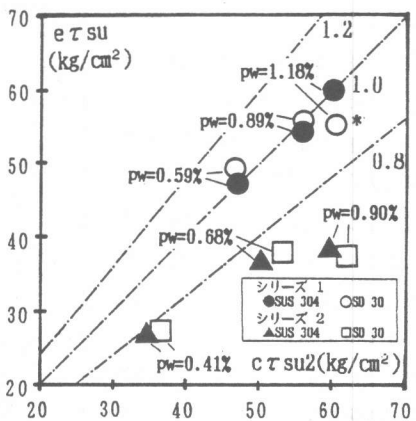


図8 実験値と計算値との比較(終局強度設計指針案式)

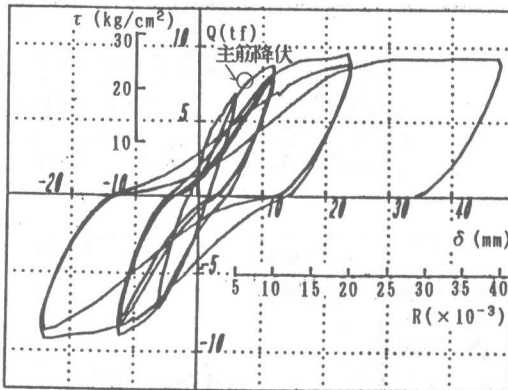


図9 せん断力-相対変位関係(SUS304, Pw=0.9%)

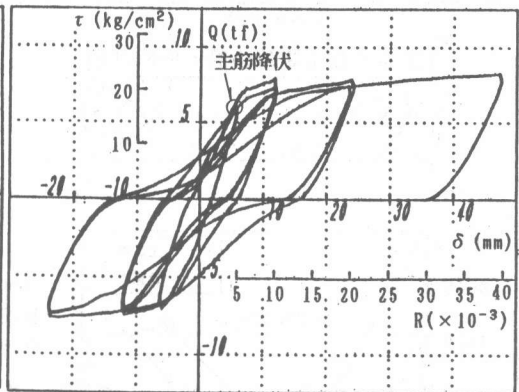


図10 せん断力-相対変位関係(SD30, Pw=0.9%)

5. 実験結果及び検討(曲げシリーズ)

5.1 耐力及び変形状

図9、図10に変形状の一例として、主筋・せん断補強筋にSUS304、SD30を用いた試験体のせん断力(Q) - 支点間相対変位(δ)曲線を、図11には、その包絡線を示す。

両者とも、約Q=2.0tで曲げひび割れが、約Q=4.0tでせん断ひび割れが発生した。

その後、主筋にSUS304を用いた試験体では、約Q=8.0t (R=1/140rad, +2CYCLE)で、SD30を用いた試験体では、約Q=6.5t (R=1/200rad)で、主筋の材端部が降伏ひずみに達した。

図12に各折り返し時の荷重の推移を示す。

これによると主筋降伏後の耐力上昇については、SUS304を用いたものが1/50radで最大荷重に至り上昇しないのに対して、SD30を用いたものは、1/25radまで徐々に増加することがわかる。

5.2 破壊状況及び主筋のひずみ分布

図13に、主筋・せん断補強筋にSUS304、SD30を用いた試験体の最終破壊状況及び上・下主筋の初期サイクルにおけるひずみ分布を示す。主筋のひずみ分布は、回転角1/200、1/100、1/50 radの繰返しにおける第1サイクルの最大荷重時の値である。

主筋にSUS304を用いた試験体において、6サイクル目に部材中央付近にせん断ひび割れが発生したが、5サイクル目までは、両者とも材端部より1D区間(D=27.0cm)内に発生した曲げひび割れ、せん断ひび割れが開閉を繰り返しており、変形は両材端部に形成された塑性ヒンジによ

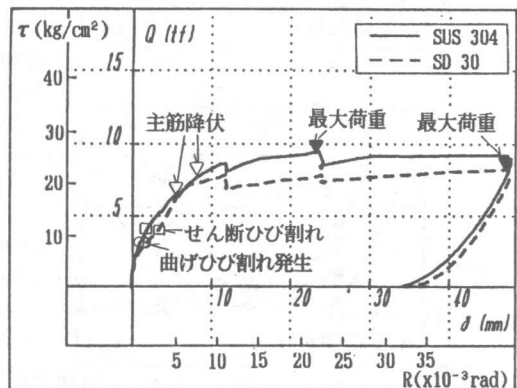


図11 せん断力相対変位包絡線(Pw=0.9%)

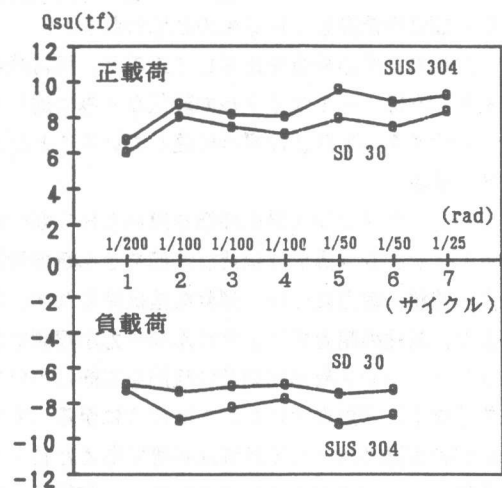


図12 折返し荷重の推移

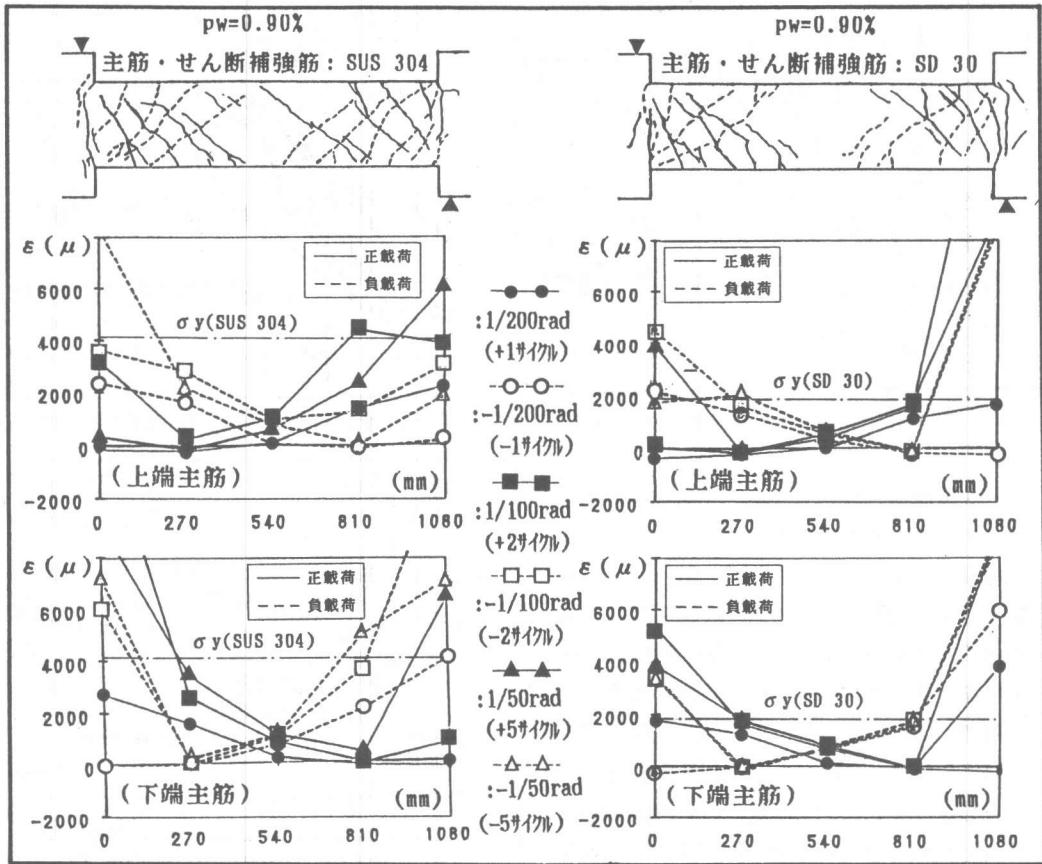


図13 最終破壊状況及び主筋のひずみ分布(Pw=0.9%)

り大部分を依存しているものと思われる。

主筋のひずみ分布を比較してみると、両材端部に貼付したひずみゲージが、SD30においては、+1または、-1サイクルで降伏ひずみに達しているのに対し、SUS304においては、+2または、-2サイクルで降伏ひずみに達していることがわかる。

6. 結論

以上、ステンレス異形棒鋼を用いたRC梁の曲げ・せん断実験により次の結果が得られた。

- 1) ステンレス異形棒鋼及び鉄筋をせん断補強筋に用いたせん断実験の結果から、ひび割れ性状、変形状、耐力について顕著な差は見られず、素材試験により得られた0.2%耐力を用いることにより、既往の耐力式によりせん断耐力が評価できる。
- 2) ステンレス異形棒鋼及び鉄筋を主筋に用いた曲げ実験の結果から、ひび割れ性状においては差はなく、変形状においては降伏に至るまでの性状に明確な降伏点が現れない違いはあるが、全体の履歴性状としてはほぼ同等であると言える。

【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、並びに平成元年度松崎研究室卒研 生 辰井淳君に深く感謝致します。

【参考文献】 1) 松崎・中野・井上・古川: 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梁のせん断実験、コンクリート工学年次論文報告集11-1, 1989年, PP839 ~ 842

2) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説, 1988年