

論文 ステンレス鉄筋の重ね継手性能

山本 俊彦*1・山川 正克*2

要旨：鉄筋コンクリート構造物の耐久性を向上させるためにステンレス鉄筋を用いる場合、鉄筋は重ね継手とすることが想定される。しかしステンレス鉄筋は明瞭な降伏点を示さないため、普通鉄筋による継手性能と異なることが考えられる。このため、実験的にその性能を確認し普通鉄筋の性能と比較した。実験の結果、ステンレス鉄筋の重ね継手は普通鉄筋と同等以上の性能を有する事が明らかになった。試験体の載荷実験では、継手長さ 30 d 横補強筋比 0.4%で主筋の曲げ降伏、0.8%以上で変形角 1/20 以上の変形性能を示した。

キーワード：ステンレス鉄筋, 重ね継手, 横補強筋, 付着割裂

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物は、これまでその耐久性は半永久的と考えられてきたが、劣化の進行速度は予想以上に早い場合があることが、昨今の事故例等によって報告されている。このため、鉄筋コンクリート構造物の耐久性を高めて建物の長寿命化を図り、建設生産に伴う環境負荷の低減を図る必要があると考えられる。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性を向上させるための有力な手段として、過酷環境下の構造物などを対象に既に海外等ではステンレス鉄筋が使われ始めている^{1)~3)}。しかし、わが国を含めて構造・材料的な検討は十分とはいえない。このため本研究では、鉄筋コンクリート構造物にステンレス鉄筋を用いるために必要な、構造・材料・施工上の技術的問題点を解明する一環として⁴⁾、ステンレス鉄筋の重ね継手性能を実験的に明らかにするものである。

2. 実験概要

ステンレス鉄筋の継手としては、鋼材に熱的な影響を与えず、また特殊な部品も必要としない重ね継手が最適と考えられる。ステンレス鋼は、強度レベルとしては通常の炭素鋼鉄筋とほ

ぼ同程度であるが、明瞭な降伏点を有せず 0.2%耐力をその降伏点としている。この物理的特性は鉄筋の付着や継手の性能に影響を及ぼすと考えられる。ここでは、重ね長さを 30d 一定とし、横補強筋比 p_w を変化させ、ステンレス鉄筋の重ね継手性能を調べるとともに、普通炭素鋼鉄筋による継手との比較を行った。

2.1 試験体

試験体を図-1 および表-1 に示す。ステンレス鉄筋試験体 (No. 1~No. 4) および普通鉄筋試験体 (No. 5) の 5 体である。試験体は、梁幅・梁せいとも 370mm, 長さ 3200mm である。重ね継手 (30d=660mm) を有する純曲げ区間を 1250mm, せん断区間を 775mm とし、加力は 2 点 1 方向載荷とした。主筋は 4-D22 で $P_t=1.34\%$, せん断区間の肋筋は 4-D10@80 で P_w は 0.97% である。重ね継手部を含む純曲げ区間の横補強筋比を実験要因とし、配筋は 0~中子を有する 4-D10@66 までの 4 種類とし、 $P_w=0, 0.39, 0.77, 1.17\%$ とした。日本建築学会重ね継手指針 (案)⁵⁾ による必要重ね長さは 59d (ステンレス) および 60d (普通炭素鋼) であるが、横補強筋のない場合継手破壊が先行するように 30d とし、横補強筋の増加による効果を調べた。

*1 大同工業大学教授 工学部建築学科 工博 (正会員)

*2 大同特殊鋼(株) 川崎工場技術部

表-1 試験体の諸元および耐力計算値

試験体	配筋					Q_{my} (kN)	Q_{su}^* (kN)	Q_{bu}^{**} (kN)	$\frac{Q_{su}}{Q_{my}}$	$\frac{Q_{bu}}{Q_{my}}$
	種類	主筋	P_t (%)	継手部肋筋	P_w (%)					
No. 1	ステンレス	4-D22	1.31	—	0.00	207	338	162	1.63	0.78
No. 2	〃	〃	〃	2-D10@100	0.39	〃	338	199	1.63	0.96
No. 3	〃	〃	〃	4-D10@100	0.77	〃	338	235	1.63	1.14
No. 4	〃	〃	〃	4-D10@66	1.17	〃	338	272	1.63	1.32
No. 5	普通	〃	〃	2-D10@100	0.39	214	334	199	1.56	0.93

*文献 6) による **文献 7) による

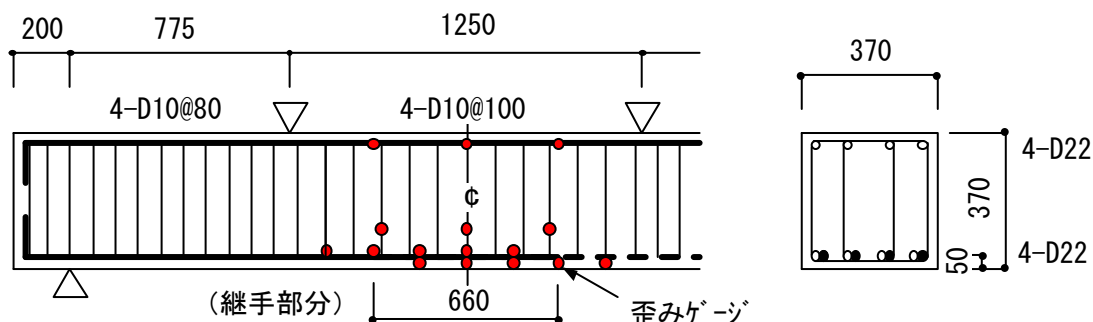


図-1 試験体の形状・寸法 (No. 4試験体の場合)

2.2 使用材料

表-2 にコンクリート、表

-3 に鋼材の性質を示す。使用コンクリートの曲げ加力実験時の圧縮強度は31.6MPaであった。使用鋼材は、ステンレスはSUS304、普通鋼材はSD345材である。曲げ主筋の降伏強度は、ステンレス鉄筋364MPa(0.2%耐力)、同降伏歪み0.446%、普通鋼材375MPa、同降伏歪み0.187%で耐力

はほぼ同等であったが降伏歪みはステンレス鉄筋の方が2倍以上となった。せん断補強筋はステンレス鋼材の方がやや高かった。

2.3 実験方法

単純梁1方向2点荷重を行い、鉄筋に所定の応力(140MPa, 200MPa)並びに各試験体に所定の変位(試験体中央変位で1/200, 1/100, 1/50, 1/25, 1/20)を与えた。歪みゲージは図-1に示すように、継手部分には内外2組の鉄筋に@165間隔で5点ずつ計20点、圧縮側鉄筋に3点、横

表-2 コンクリートの配合と材料特性

W/C (%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	スランプ (cm)	材令 (週)	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
55	324	178	18	7	31.6	30.3

表-3 鋼材の機械的性質

鋼材 (形状)	用途	直径 (mm)	降伏強度 (MPa)	引張強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	伸び (%)
ステンレス (ヨコシ)	主筋	D22	364	682	206	45.0
	肋筋	D10	395	655	204	40.0
普通鋼 (ヨコシ)	主筋	D22	375	557	202	34.6
	肋筋	D10	374	521	200	—

補強筋には継手部両端と中央位置に3点ずつ計6~12点、貼付した。

3. 実験結果

3.1 実験結果の概要

図-2 に最終ひび割れ状況を、図-3 に荷重変形曲線を示す。表-4 に実験結果の一覧を示す。

横補強筋のないNo.1試験体は試験体中央変位10mm(R=1/130)で大きな音とともに付着割裂によって耐力低下した。横補強筋比0.39%の

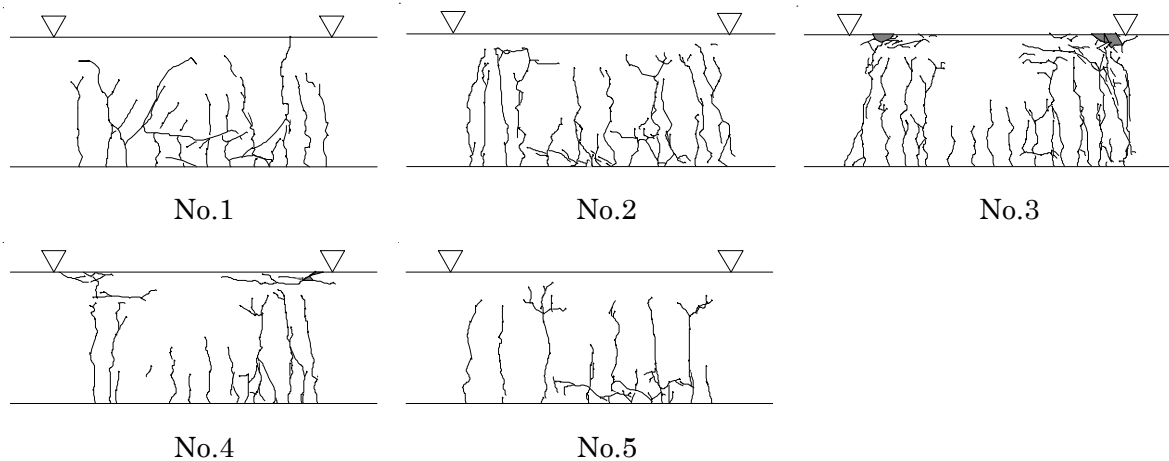


図-2 最終ひび割れ状況

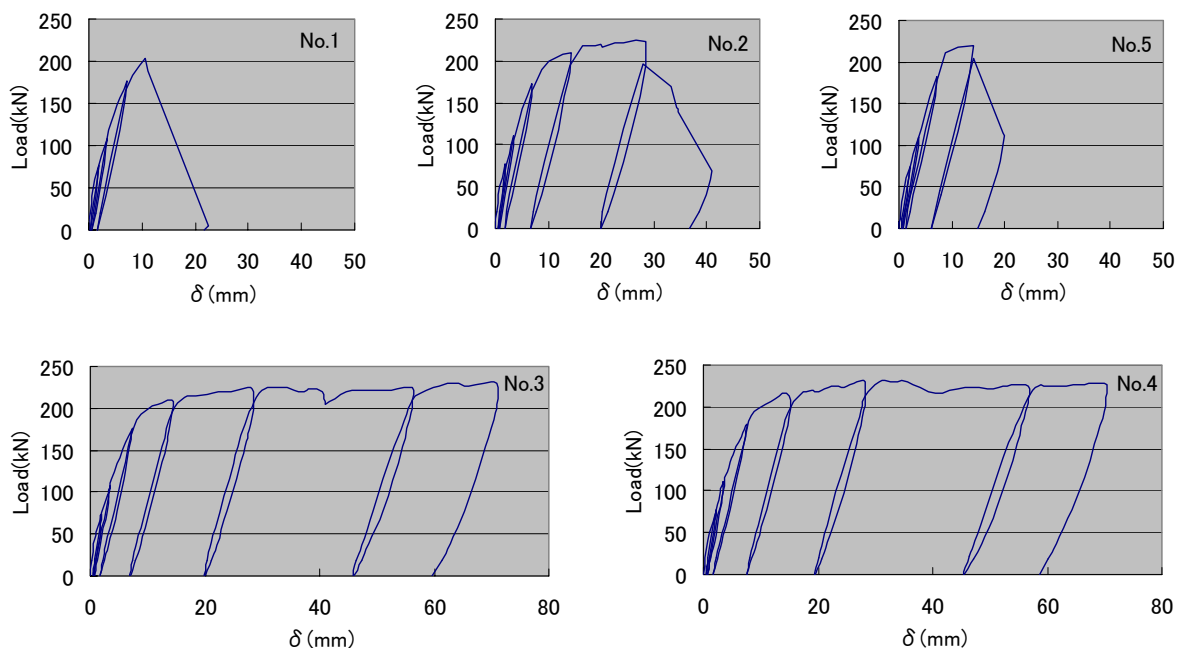


図-3 荷重－変形曲線

No.2 試験体は、中央変位 10mm ($R=1/130$) 付近で継手主筋が曲げ降伏相当歪みに達し、中央変位 28mm ($R=1/50$) の繰り返しで継手位置側面の付着割裂ひび割れの拡大によって耐力が急激に低下した。普通炭素鋼試験体で横補強筋比 0.39% の No.5 試験体は、中央変位 7mm ($R=1/200$) で継手主筋の降伏歪みに達し、同変位 14mm ($R=1/100$) の繰り返しで継手位置側面・下面の付着割裂ひび割れの拡大によって耐力が急激に低下した。

一方、横補強筋比 0.77% および 1.17% の No.3、No.4 試験体は、No.2 試験体と同様中央変位

10mm ($R=1/130$) 付近で継手主筋が曲げ降伏相当歪みに達した。No.3 試験体の側面に付着割裂ひび割れの発生が見られたが中央変位 70mm ($R=1/20$) までの変形では最終破壊に至らなかった。

3.2 曲げおよび付着割裂ひび割れ

ステンレス鉄筋では、耐久性が高いためひび割れ幅は問題とならないが、美観あるいは仕上げ等の関係から過大なひび割れは望ましくない。長期荷重相当の鉄筋応力 200MPa でのひび割れ幅の最大値はいずれの試験体も 0.10～0.15mm 以下と小さかった。

No.1 試験体は、側面と下面に同時に付着割裂ひび割れが発生し、サイドスプリット、コーナースプリットさらにV-ノッチスプリット型の複合したひび割れが見られた。No.2 試験体は曲げ降伏後、サ

表-4 実験結果

試験体	最大ひび割れ幅 $\sigma = 200\text{MPa}$ (mm)	最大荷重 $Q_e(\text{kN})$	付着応力 (MPa)			破壊形式
			最大 τ_e	割裂強度 τ_c	$\frac{\tau_e}{\tau_c}$	
No. 1	0.15	203	2.63	2.10	1.25	付着割裂
No. 2	0.10	225	2.91	2.57	1.13	付着割裂
No. 3	0.10	229	2.97	3.04	-	曲げ降伏
No. 4	0.15	231	2.99	3.53	-	曲げ降伏
No. 5	0.15	220	2.85	2.58	1.11	付着割裂

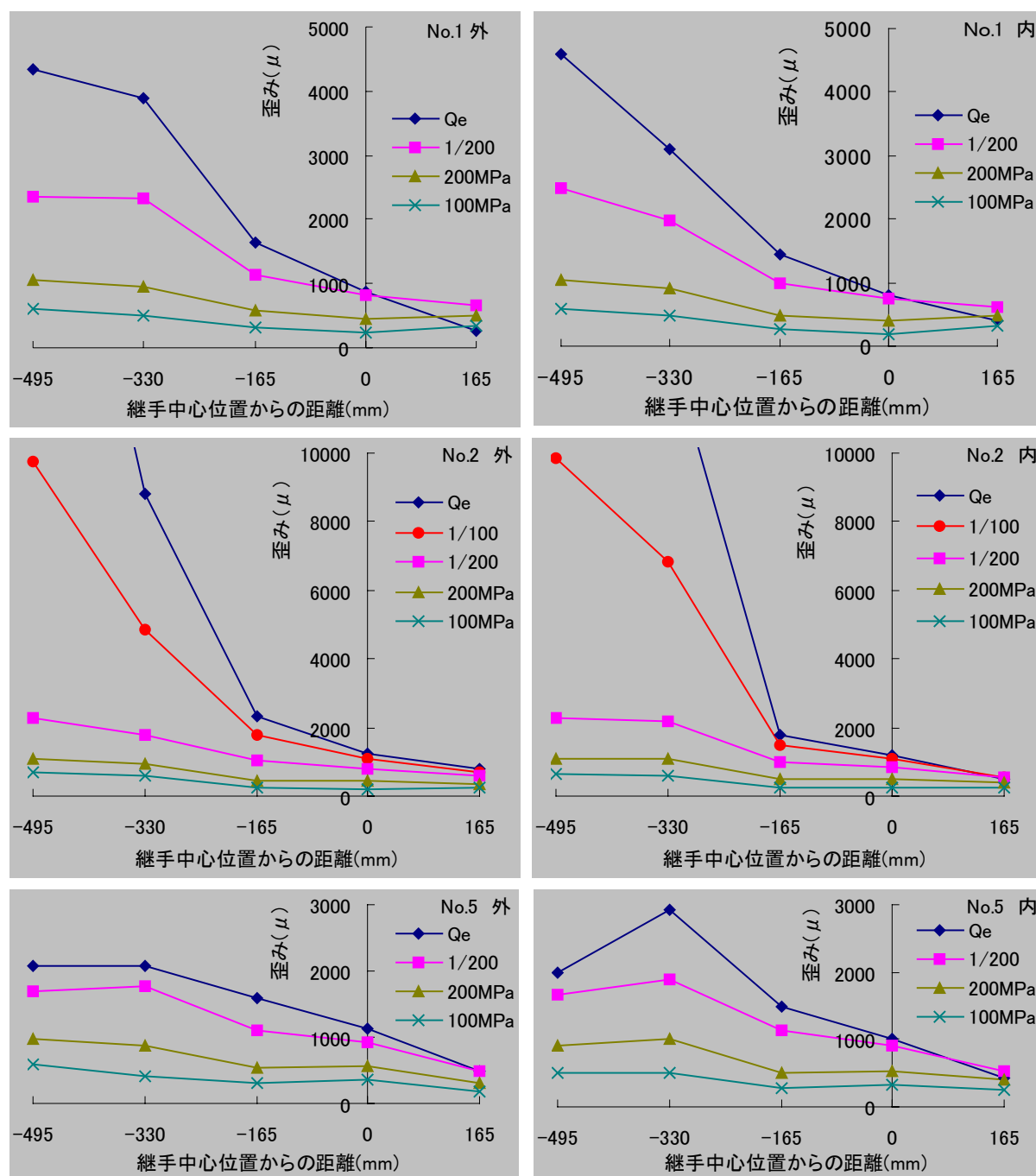


図-4 主筋歪み分布 (No. 1 : $P_W = 0$, No. 2, No. 5 : $P_W = 0.39\%$)

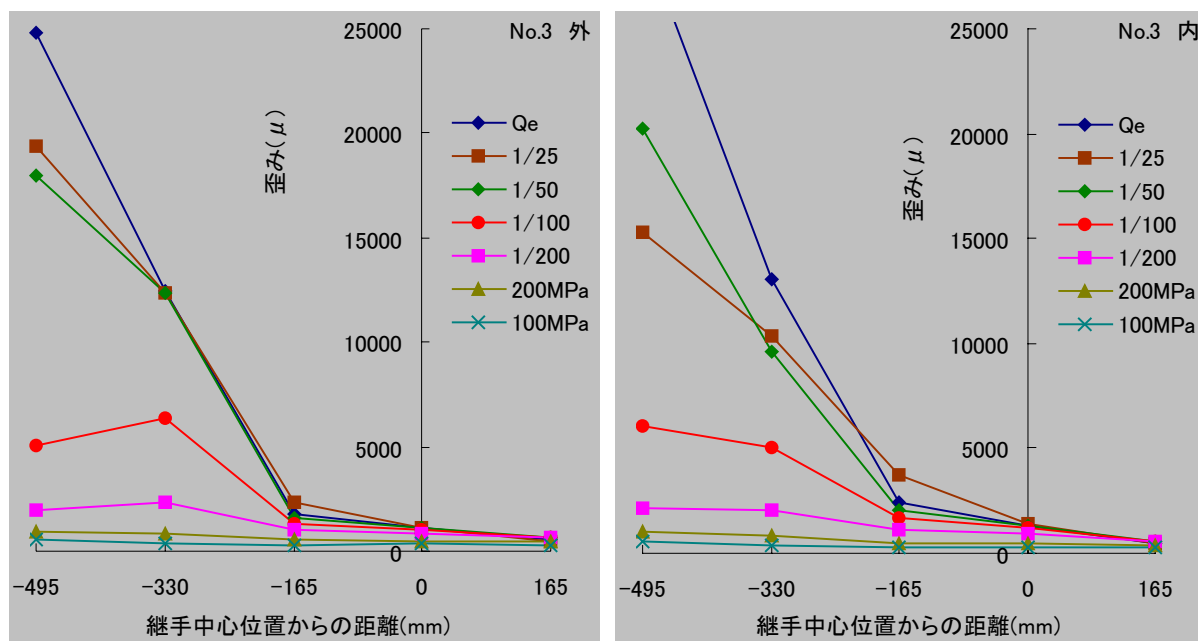


図-5 主筋歪み分布 (No.3 : $P_w = 0.77\%$)

イドスプリット型付着割裂ひび割れにより耐力が決まった。また、No.5 試験体も曲げ降伏したが、サイドスプリット型とコーナースプリット型付着割裂ひび割れとにより耐力が決まった。

3.3 付着割裂強度

最大付着応力は、以下の式によって求めた。

$$\tau_e = Me / (j \cdot \phi L) \quad (1)$$

ただし、

Me : 最大モーメント

j : 応力中心間距離, $7/8 d$ (d : 有効せい)

ϕ : 鉄筋の周長

L : 重ね継手長さ

付着割裂強度計算値は、文献 7) による提案式から求めた。横補強筋のない No. 1 試験体の最大付着応力は、26.3MPa で計算値に対する比は 1.25 であった。No. 2 および No. 5 試験体は、重ね継手部の鉄筋が降伏したが、付着割裂強度はそれぞれ 29.1MPa, 28.5MPa となり計算値に対して 1.1 倍程度となった。

3.4 主筋歪み分布

図-4 に No. 1 および No. 2 試験体の主筋歪み分

布を示す。また、図-5 に付着割裂破壊しなかった試験体のうち No. 3 試験体の歪み分布を示す。歪みは、片側の重ね継手の外側と内側の各載荷ステップごとの値を示す。歪みゲージは重ね継手区間 660mm を 4 等分し @165mm 間隔で測定している。

主筋応力 200MPa および変形角 1/200 まではいずれの試験体もほぼ同様の歪み分布を示す。継手部分では外側鉄筋の歪みがやや大きな値を示した。最終的に、No. 1 では継手端部の歪みが 0.4% となると反対側の鉄筋先端の歪みが逆に減少し破壊に至った。一方、No. 2 試験体では、最大耐力時の継手端部の歪みは 1% 程度に達している。No. 5 試験体は、降伏歪みを超え 0.3% 程度で破壊に至っている。

付着割裂破壊しなかった No. 3 試験体は、継手端部での歪みは 1% を大きく超えた。継手端部から 165mm 内側では終局まで変形の増大に伴い歪みも増加した。しかし、歪みは終局でも 0.3% 以下であった。

3.5 横補強筋の効果

表-5 に横補強筋のひずみを示す。最大変形時の横補強筋の歪みは、全平均で 0.02~0.03% 程度で試験体による差はあまり見られなかった。

歪みを計測した 3

本の横補強筋では、
継手端部の方が歪み
は大きく No. 2 およ
び No. 3 試験体では
0.06%であった。継
手中央位置の横補強
筋歪みはいずれも端

部最大歪みの 10%程度の歪みしか生じなかつた。一方中子筋のある No. 3 試験体では、端部外周横補強筋 0.1%、端部中子筋 0.05%で、中子筋の歪みは外周横補強筋の半分であった。継手部の横補強筋比 1.17%の No. 4 試験体では、外周・中子、端部・中央での歪み差は他の試験体に比してかなり小さかった。

4. まとめ

ステンレス鉄筋の全数重ね継手実験から以下のことが明らかになった。

- 1) ステンレス鉄筋は早期に非線形を有し、降伏歪みは 0.45%程度と普通炭素鋼の 2 倍以上であるが、付着割裂強度は普通鋼による既往の値とあまり変わらなかった。
- 2) No.1 試験体の付着割裂破壊型はコンクリート強度が比較的高かったためか、3 つの形の複合型を示した。
- 3) 長期荷重時(鉄筋応力=200MPa)の曲げひび割れ本数は異なるが、その最大幅は普通鋼とあまり変わらなかった。
- 4) 継手部の横補強筋の効果は大きく、0.4%で部材降伏後の付着割裂破壊となった。横補強筋は継手端部で中央よりかなり大きな歪みを示した。
- 5) No.2 試験体と No.5 試験体の比較から見られるように、ステンレス鉄筋の全数重ね継手性能は、普通炭素鋼と同等以上の性能を示した。
- 6) 横補強筋比 0.77%以上では、付着割裂破壊に至らず、十分な変形能を示した。また、横補強筋の増加によって継手内の横補強

表-5 横補強筋の最大耐力時歪み

試験体	最大変形 (mm)	外周横補強筋 (10^{-6})			中子横補強筋 (10^{-6})		
		全平均	端部最大	中央	全平均	端部	中央
No. 1	10.7	—	—	—	—	—	—
No. 2	28.4	242	643	73	—	—	—
No. 3	70.9	220	1021	71	250	544	66
No. 4	70.3	197	307	126	214	274	183
No. 5	14.0	298	640	59	—	—	—

筋歪みが均一になる傾向を示し、継手部の拘束効果が向上することが明らかになった。

参考文献

- 1) The Concrete Society: Guidance on the Use of Stainless Steel Reinforcement, The Technical Report No.51, 1998
- 2) ASTM A 955/A 955M - 01: Standard Specification for Deformed and Plain Stainless Bars for Concrete Reinforcement, 2001
- 3) BS 6744-2001: Stainless steel bars for reinforcement of and use in concrete - Requirements and test method, 2001
- 4) YAMAMOTO, T., YAMAJI, T. and YAMAKAWA, M.: Performance of Stainless Steel Reinforced Concrete Members, Proceedings of the IABSE Symposium on Towards a Better Built Environment -Innovation, Sustainability, Information Technology, IABSE REPORTS-Vol.86, pp.1-9, September, 2002 (Melbourne)
- 5) 日本建築学会：重ね継手の全数継手設計指針(案)，丸善，1996
- 6) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説，日本建築学会，1988
- 7) 田畑 卓，諸橋憲貴，桜田智之，田中礼治：太形鉄筋 D32 を用いた全数重ね継手の付着割裂強度に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.2，pp.1173-1178，1995