

論文 曲げせん断応力を受ける高強度コンクリート全数重ね継手の研究

師橋憲貴*1・桜田智之*2

要旨: 重ね継手を部材応力の大きい危険断面位置で全数重ね継手した高強度コンクリートはり部材の曲げせん断加力実験を普通強度コンクリートを用いたはり部材と比較して行い、重ね継手の力学的性状について検討を行った。その結果、曲げせん断応力下での継手性状について、長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅が普通強度コンクリートの試験体に比べ小さくなること、重ね継手主筋の降伏領域が普通強度コンクリートの試験体に比べより進行すること、高強度コンクリートの試験体は既往の付着割裂強度式による終局付着耐力と降伏時の付着耐力との比が小さいこと等、コンクリート強度の差異が認められた。

キーワード: 全数重ね継手、高強度コンクリート、横補強筋比、曲げせん断応力

1. はじめに

重ね継手の実験では、基本的な継手性状を把握し易いことから加力方法はモーメントを一定にした純曲げ加力が多い。純曲げ加力では重ね継手区間で継手筋の応力は等しく、重ね継手の付着劣化については重ね継手の両側から起こると考えられ重ね継手に対しては厳しい条件での実験となる。しかし、重ね継手の継手性状を把握するためには、重ね継手周囲のコンクリートの応力状態を実際の鉄筋コンクリート部材での応力状態に近似させる必要があり、曲げ応力に加えせん断応力を作用させた場合についても検討する必要がある。特に、はり曲げ降伏後の継手性状については、塑性変形により重ね継手両端のうち応力の大きい側から重ね継手の付着が劣化すると考えられる。そこで本研究では重ね継手を部材応力の大きい危険断面位置で、はり断面内の主筋を全数重ね継手したはり部材の曲げせん断加力実験を行った。重ね継手の力学的性状については、曲げ降伏以前では曲げひび割れ幅および剛性を、また曲げ降伏後では継手筋の降伏領域の進展状況、継手余裕率および塑性率に主眼を置いて検討を行った。

一方、コンクリート強度については近年鉄筋コンクリート造建築物に用いられるコンクリートの高強度化が進められている。このことから本研究では高強度コンクリートを用いた重ね継手の継手性状の把握を目的とした。実験には高強度コンクリートとともに普通強度コンクリートを用いた試験体を計画し、コンクリート強度を対比することにより検討を行った。また、重ね継手の継手性状に影響する変動因子については、重ね継手の有無および横補強筋量を取り上げ検討を行った。

2. 実験概要

2.1 試験体計画

図-1に試験体形状および断面図を示す。試験体形状は中央に柱型スタブを有するせん断スパン比3.0の単純はり形式である。スタブの幅ははり幅と同一とした。重ね継手はスタブ端部のはり下端危険断面位置にスタブを挟んで両側に設け、重ね継手長さは $30d_b$ と一定にした。主筋は上端および下端とも3-D19で、重ね継手は主筋を水平に重ねる形式とした。また、重ね継手を設けず通し配筋とした試験体を計画し、重ね

*1 日本大学助手 生産工学部建築工学科 工修(正会員)

*2 日本大学教授 生産工学部建築工学科 工博(正会員)

表-2 材料特性

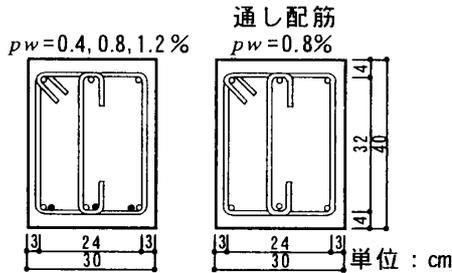
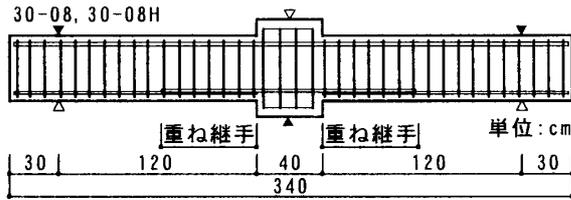


図-1 試験体形状および断面図

継手を有する試験体に対する力学的性状の指標とした。横補強筋は、外周横補強筋に中子筋を組合わせて配筋した。表-1に試験体詳細を示す。試験体は普通強度コンクリート（以降普通強度と称す）を対象とした試験体4体〔試験体番号1)~4)〕および高強度コンクリート（以降高強度と称す）を対象とした試験体4体〔試験体番号5)~8)〕の合計8体である。横補強筋比 p_w は0.4, 0.8, 1.2%の3種類とし、横補強筋の補強量が継手性状に与える影響を検討した。表-2に鉄筋およびコンクリートの材料特性を示す。主筋は普通強度を対象とした試験体では普通強度鉄筋(SD345)を使用し、高強度を対象とした試験体では高強度鉄筋(SD685)を使用した。横補強筋は、横補強筋の強度の差による重

表-1 試験体詳細

試験体名	継手長さ		横補強筋比 p_w (%)	横補強筋間隔 s (cm)	横補強筋本数 (本)		横補強筋形状
	ndb	ls (cm)			外周筋	中子筋	
1) 30-04	30db	57	0.4	18	4	4	[Diagram]
2) 30-08			0.8	9	7	7	
3) 30-12			1.2	6	10	10	
4) T-08	通し配筋		0.8	9	—	—	
5) 30-04H	30db	57	0.4	18	4	4	
6) 30-08H			0.8	9	7	7	
7) 30-12H			1.2	6	10	10	
8) T-08H	通し配筋		0.8	9	—	—	

a) 鉄筋

試験体	使用鉄筋	使用箇所	σ_y (MPa)	ϵ_y (%)	σ_{max} (MPa)	E (GPa)
1)~4)	D19(SD345)	主筋	390	0.21	570	183
5)~8)	D19(SD685)		710	0.40	920	178
1)~8)	D10(SD295A)	横補強筋	365	0.20	540	182

b) コンクリート

試験体	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	単位水量(kg/m ³)			圧縮強度 σ_B (MPa)	割裂強度 (MPa)	
				水	セメント	砂利			
1)~4)	20.0	13.7	62.5	175	280	844	962	35.0	2.50
5)~8)		25.9	28.0	174	621	554	983	72.3	3.55

ね継手の付着に対する拘束への影響は少ないものと判断し、普通強度および高強度の試験体ともに普通強度鉄筋(SD295A)を使用した。実験時のコンクリート強度 σ_B は、普通強度で35.0 MPa, 高強度で72.3MPaであった。

2.2 加力方法および測定方法

加力は正負繰り返し載荷を行い、はり曲げ降伏までは荷重制御とし、曲げ降伏後は変位により制御した。変位の測定は、ホルダーをスタブの両側に取り付け、変位計(検長50mm)により測定した。ひび割れ幅はマイクロスコープ(最小目盛り0.02mm)により、試験区間の主筋重心線上を測定した。主筋のひずみはストレインゲージを重ね継手区間の4等分の位置に貼付し測定した。

3. 実験結果

表-3に実験結果一覧を示す。

3.1 長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅

図-2は重ね継手始点(危険断面位置)が長期許

表-3 実験結果一覧

試験体名	コンクリート強度 σ_B (MPa)	曲げ降伏荷重 (kN)	最終加力荷重 P_{max} (kN)	最大曲げひび割れ幅 W_{max} (mm)	破壊種別
1) 30-04	35.0 357 (kgf/cm ²)	175	203*	0.16	FB
2) 30-08		173	234	0.14	F
3) 30-12		176	239	0.16	F
4) T-08	72.3 737 (kgf/cm ²)	178	222	0.16	F
5) 30-04H		314	355*	0.12	FB
6) 30-08H		320	395	0.12	F
7) 30-12H		317	399	0.14	F
8) T-08H		308	394	0.10	F

*最大荷重を示す FB:曲げ降伏後の付着割裂破壊 F:曲げ降伏

容応力度時 ($\sigma_t=196\text{MPa}$ 時) の最大曲げひび割れ幅 W_{\max} である。 W_{\max} となる曲げひび割れは危険断面位置に発生し、またはり両側のひび割れ幅のうち大きい方の値を示した。 W_{\max} の平均は普通強度コンクリートの試験体で 0.15mm 、高強度コンクリートの試験体で 0.13mm となり、 W_{\max} は高強度の試験体の方が小さくなる傾向が認められた。このことはコンクリート強度の増加に伴い割裂強度が増加し、曲げひび割れ発生荷重が高くなったことによるものと考えられる。図-2中には既往純曲げ実験^{1), 2)}の結果についても示したが、既往純曲げ実験に比べ本曲げせん断実験の W_{\max} は若干大きくなった。これは純曲げ実験の純曲げ区間ではモーメントが一定で応力が等しいのに対し、曲げせん断実験では危険断面位置でモーメントが最大となり応力が集中し、危険断面位置に発生したひび割れ幅は増加したものと推測される。また、横補強筋比を $p_w=0.4\% \sim 1.2\%$ に変化させたことによる W_{\max} への影響は認められなかった。さらに通し配筋の試験体 (T-08, T-08H) と重ね継手を有する試験体との比較においても W_{\max} に差はさほど認められなかった。

3.2 最終破壊形状

図-3は最終破壊形状の例示である。30-04, 30-04Hは曲げ降伏後付着割裂破壊した試験体であるが、ひび割れは各試験体とも初めに危険断面位置で曲げひび割れが発生し、はり下端からは

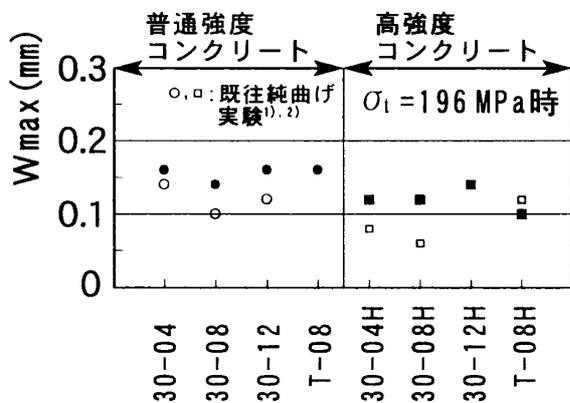


図-2 最大曲げひび割れ幅 ($\sigma_t=196\text{MPa}$ 時)

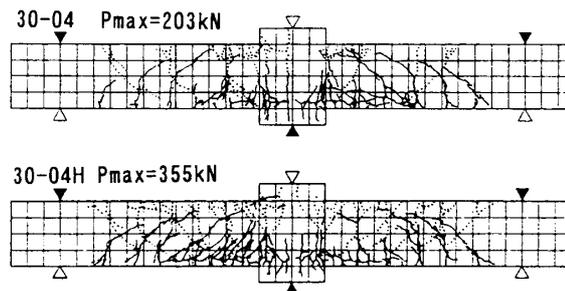


図-3 最終破壊形状の例示

り上端へ進展した。その後荷重の増加に伴い危険断面位置から離れた位置で曲げせん断ひび割れがはり下端から発生し、加力点方向に向けて進展した。付着割裂破壊時には危険断面位置の継手始点に発生した付着ひび割れが徐々に継手に沿ってはり端部に進行し耐荷力が低下した。高強度コンクリートの30-04Hは普通強度コンクリートの30-04に比べ P_{\max} の増加により、曲げせん断および付着ひび割れの主たるひび割れに付随した分散した細かいひび割れの発生が多数みられた。

3.3 変形状

図-4は荷重-たわみ曲線の例示で、図a)および図b)は普通強度コンクリートの試験体 (30-04, 30-12), また図c)および図d)は高強度コンクリートの試験体 (30-04H, 30-12H) である。試験体は危険断面位置の重ね継手始点のひずみの確認によりすべて曲げ降伏が認められた。曲げ降伏に至るまでの剛性は普通強度と高強度で差異はみられなかった。曲げ降伏時 (図中▽印) の荷重は普通強度で $173 \sim 178\text{kN}$ 、高強度で $308 \sim 320\text{kN}$ となった。曲げ降伏後付着割裂破壊した30-04および30-04Hは付着割裂破壊の発生後、正加力時の繰り返しごとにたわみの増加に伴い付着ひび割れが進行し耐荷力が低下した [図a), 図c)]。横補強筋比を $p_w=1.2\%$ で高補強した30-12および30-12Hは、最終加力荷重まで付着割裂破壊せず紡錘型の荷重-たわみ性状を示し横補強筋の効果が認められた [図b), 図d)]。

図-5に正加力時の荷重-たわみ曲線の包絡線

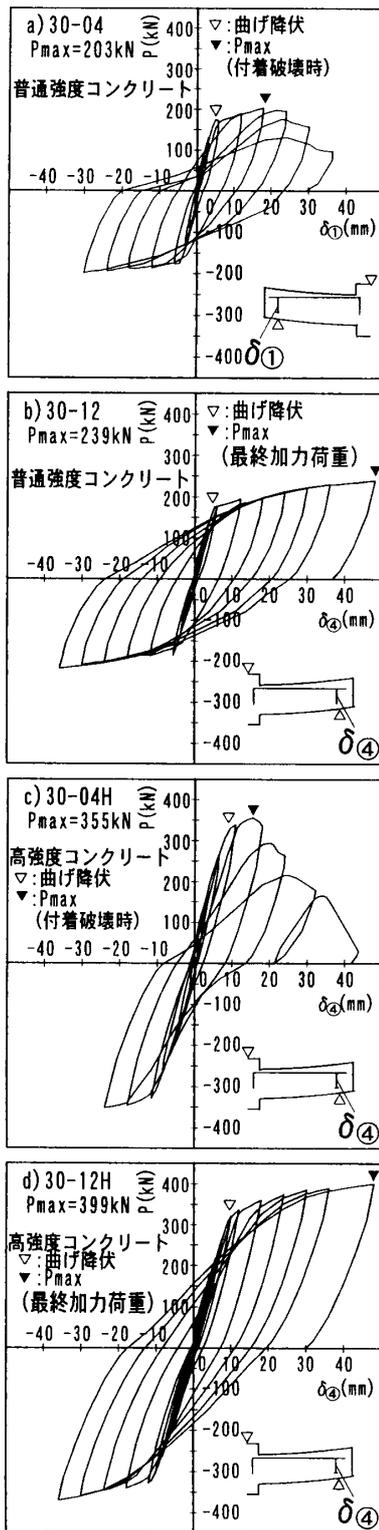


図-4 荷重-たわみ曲線の例示

を示す。 $p_w=0.4\%$ の試験体は、普通強度コンクリートの30-04で曲げ降伏後 $1/67\text{rad}$ 時に、また高強度コンクリートの30-04Hは $1/75\text{rad}$ 時に付着割裂破壊の発生がみられ徐々に耐荷力が低

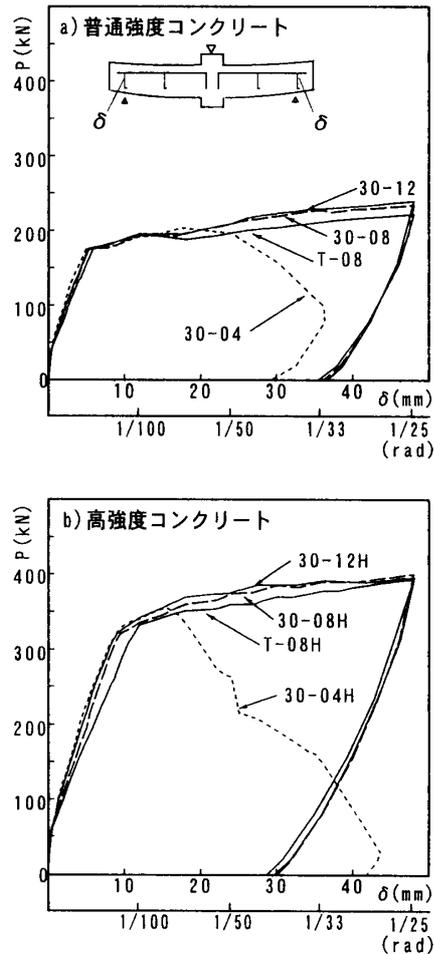


図-5 荷重-たわみ曲線(包絡線)

下した。 $p_w=0.8\%$ 、 1.2% の試験体、ならびに通し配筋の試験体は、最終加力時($1/25\text{rad}$)に至るまで安定した耐荷力を維持した。通し配筋の試験体は、曲げ降伏に至るまでの剛性ならびに曲げ降伏後の耐荷力が重ね継手を有する試験体に比べ、若干低い値を示した。

3.4 降伏領域の進展状況

図-6は曲げ降伏後付着割裂破壊した $p_w=0.4\%$ の30-04および30-04Hの重ね継手主筋の降伏領域の進展状況を示したものである。柱型スタブを通る継手筋は、曲げ降伏とともに危険断面位置で降伏ひずみに達するが($\varepsilon/\varepsilon_y=1.0$)、その後部材角の増加に従い降伏領域が危険断面位置からはり端部に向けて進展して行く。付着割裂破壊時に普通強度コンクリートの30-04では降伏領域は重ね継手長さ l_s の $1/4$ まで [$0.36D$ (D :はり全せい)]、高強度コンクリートの30-

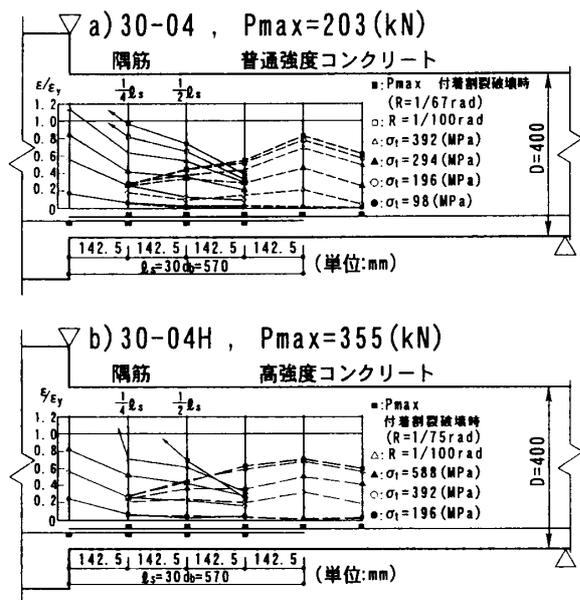


図-6 降伏領域の進展状況

04Hでは l_s の $1/4 \sim 1/2$ の範囲まで [0.36D~0.71D] 進展しており、高強度試験体の方が降伏領域の進展が継手終点に向けて進行していた。一方、最終加力荷重まで付着割裂破壊せず耐力を維持した $pw=0.8\%, 1.2\%$ の試験体の降伏領域の進展は、最終加力時 (1/25rad) で普通強度および高強度の試験体とも l_s の $1/2$ まで [0.71D] となっており、横補強筋量の増加により降伏領域の進展は抑制され付着割裂破壊に至らなかったものと考えられる。通し配筋の試験体は最終加力時 (1/25rad) において、普通強度コンクリートのT-08で危険断面位置から1.43Dまで、高強度コンクリートのT-08Hで1.07Dまで降伏領域の進展が認められ、重ね継手を有する試験体に比べ降伏領域の進展は危険断面位置からはり端部に向けて深く進行していた。

3.5 継手余裕率および塑性率

図-7は継手余裕率と塑性率の関係を示したものである。継手余裕率は曲げ降伏時のはり付着耐力 (必要 τ) に対する終局付着耐力 (保有 τ) を比で表したものである。ここで保有 τ は筆者らが横補強筋比 $pw=1.0\%$ までの高補強域を含む全数重ね継手の既往付着割裂実験により誘導した付着割裂強度算定式²⁾による値とした

(表-5)。塑性率は終局時のたわみ δ_u を曲げ降伏時のたわみ δ_y で除したものである。

普通強度コンクリートの試験体 (○印および●印) では継手余裕率 (保有 τ /必要 τ) の値は1.17以上となった。また、塑性率 (δ_u/δ_y) の値は曲げ降伏後付着割裂破壊した 30-04で 3.58 (○印), 30-04以外の最終加力荷重まで付着割裂破壊せず耐力を維持した試験体で 9.06以上 (●印) となった。一方、高強度コンクリートの試験体 (□印および■印) では継手余裕率 (保有 τ /必要 τ) の値は0.88~1.11となり、1.0を下回る値は純曲げ実験により誘導した付着割裂強度算定式²⁾が曲げせん断実験に対して過小評価しているものと考えられる。塑性率は曲げ降伏後付着割裂破壊した30-04Hで 1.54 (□印), 30-04H以外の試験体で 4.80~5.34以上 (■印) となった。これらの値から全体的にみると普通強度および高強度の試験体ともに継手余裕率が高くなるにつれて塑性率は大きくなる傾向が認められた。また pw が同じ場

表-4 継手余裕率および塑性率

試験体名	継手余裕率			塑性率		
	保有 τ (MPa)	必要 τ (MPa)	保有 τ / 必要 τ	δ_y (mm)	δ_u (mm)	δ_u/δ_y
1) 30-04	3.80	3.25	1.17	5.0	17.9	3.58
2) 30-08	4.48		1.38	5.3	48.0	≥ 9.06
3) 30-12	5.13		1.58	5.2	48.0	≥ 9.23
5) 30-04H	5.20	5.92	0.88	10.0	15.4	1.54
6) 30-08H	5.88		0.99	9.0	48.1	≥ 5.34
7) 30-12H	6.55		1.11	10.0	48.0	≥ 4.80

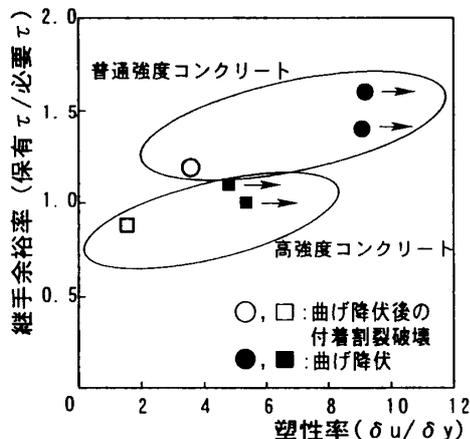


図-7 継手余裕率-塑性率の関係

表-5 継手余裕率および塑性率の計算

●継手余裕率(保有 τ /必要 τ)	
○保有 $\tau = \tau_{co} + \alpha \tau_{st}$ [文献2])	
$\tau_{co} = (0.12 + 0.07 bsi + 5.54 / \frac{l_s}{d_b}) \sqrt{\sigma_B}$	
$\tau_{st} = (1 + 2.51 \frac{n}{N}) 1.54 q_{st} \sqrt{\sigma_B}$	
$bsi = \frac{b - \sum d_b}{\sum d_b}$ $q_{st} = \frac{b \cdot p_w}{N \cdot d_b}$	
l_s : 重ね継手長さ d_b : 主筋径 b : はり幅	
σ_B : コンクリート強度 (MPa)	
N : 全重ね継手組数 p_w : 横補強筋比	
n : 横補強筋が直接かかっている重ね継手組数	
$\sum d_b$: 重ね継手の主筋の直径の総和 (重ね継手の主筋1組は2本と数える)	
$\sum d_b'$: 重ね継手の外側での主筋の直径の総和 (重ね継手の主筋1組は1本と数える)	
α : 1.0(普通強度コンクリート), 0.7(高強度コンクリート)	
○必要 $\tau = \frac{\sigma_y \times d_b}{4 l_s}$ σ_y : 主筋降伏応力度	
●塑性率 ($\delta u / \delta y$)	
δy : 曲げ降伏時たわみ δu : 最大荷重時たわみ	

合、高強度と普通強度の試験体を比べると、高強度の試験体は継手余裕率および塑性率ともに小さい値であった。高強度の試験体の継手余裕率が普通強度より小さく算定される要因は、高強度コンクリートを用いたことによる保有 τ の増加が、主筋に高強度鉄筋を用いたことによる必要 τ の増加に比べ小さいためである。一方、塑性率は荷重とたわみの関係で求まるが、 $p_w = 0.4\%$ で同一の場合、高強度の30-04Hは3.3節図-4より、普通強度の30-04とほぼ同等の変形量で付着割裂破壊しており、結果として塑性率は小さい値となった。これは3.4節で述べた重ね継手主筋の降伏領域が、高強度の試験体は普通強度に比べ長いことが影響しているものと考えられる。

以上のことから、今後コンクリートの強度と鉄筋の強度の組合わせが継手余裕率に与える影響を明確にし、継手余裕率を基にして塑性率の推定が可能かどうか、さらに検討を行っていきたい。

4. 結論

高強度コンクリートを用いた全数重ね継手の曲げせん断実験を行った結果、本実験の範囲で以下に示す知見が得られた。

1) 重ね継手始点が長期許容応力度時の最大曲

げひび割れ幅は、高強度コンクリートの試験体の方が普通強度コンクリートの試験体に比べ小さくなる傾向が認められた。

2) 既往の純曲げ実験に比べ本曲げせん断実験の方が長期許容応力度時の最大曲げひび割れ幅は若干大きくなった。

3) 重ね継手長さを30 d_b と一定にした本実験の試験体はすべて重ね継手主筋の曲げ降伏が認められ、普通強度コンクリートおよび高強度コンクリートの試験体ともに、横補強筋比 $p_w = 0.4\%$ の試験体は曲げ降伏後付着割裂破壊が発生し、 $p_w = 0.8\%$, 1.2% の試験体は最終加力時(1/25rad)に至るまで通し配筋の試験体と同等の耐荷力を示した。

4) 継手余裕率および塑性率により曲げ降伏後の継手性状を評価した結果、同一 p_w の場合、高強度コンクリートの試験体は普通強度コンクリートの試験体に比べ、継手余裕率とともに塑性率も小さい値となった。

以上、普通強度コンクリートと高強度コンクリートの全数重ね継手の曲げせん断実験を行い、継手性状について比較した結果、最大曲げひび割れ幅ならびに、継手余裕率および塑性率の評価はコンクリート強度による差異がみられたが、適切な横補強筋量を確保すれば高強度コンクリートを使用しても部材角1/25radの大変形まで十分な継手性状が期待できることを確認した。

謝辞

本研究の一部は「平成11年度 日本大学学術研究助成金(奨励研究 課題番号A99-021)」により行われた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 桜田智之・師橋憲貴・田中礼治: 重ね継手の付着割裂強度に及ぼす横補強筋および中子筋の効果に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第465号, pp.119-128, 1994.11
- 2) 師橋憲貴・桜田智之: 60MPa級の高強度コンクリートを用いた重ね継手の付着割裂強度に関する研究, コンクリート工学論文集, 第11巻1号, pp.1-10, 2000.1