

図4 供試体形状の一例 (実験Ⅱ)

塗布したSRC供試体 (ML 3, SL 3), ④せん断補強鋼材がスターラップのみであるRC供試体 (MR, SR)。なお、実際の極太異形棒鋼は8角形断面で平坦面とふし突起部を有するが、ここでは供試体製作の都合上円形断面 (φ51 mm相当) とし、全周に高さ2 mm, ピッチ30 mmのふしを設け、若干コンクリートとの付着力を低下させたものを使用した。供試鋼材の機械的性質を表2に、コンクリートの性質を表3に、および模型極太異形棒鋼の付着試験結果を表4に示す。

2.3 実大SRCはりの静的載荷実験 (実験Ⅲ)³⁾

実験Ⅲシリーズでは、従来鉄筋径を大きく越える極太異形棒鋼を鉄骨フランジ材として使用する際に、太径化がSRC部材の耐荷特性に及ぼす影響を調査するため、極太異形棒鋼鉄骨を用いたSRCはりの実大模型供試体 (U-1) とその1/2.2模型供試体 (U-2) の計2体を製作し、せん断スパン比2.1の条件で静的載荷実験を行った。

供試体の形状および内容を図5、および表5に示す。なお、極太異形棒鋼としては、実大模型の場合、実験Ⅰの付着試験結果から形状を決定したφ110 mm相当試圧延材を使用し、小型模型の場合は実験Ⅱシリーズと同様φ51 mm相当機械加工材を使用した。供試鋼材の機械的性質を表6に、コンクリートの性質を表7に示す。

2.4 SRCはりの繰返し載荷実験 (実験Ⅳ)⁴⁾

実験Ⅳシリーズでは、極太異形棒鋼鉄骨を用いたSRC部材の地震時の基本耐荷特性を把握することを目的に、はり模型の静的交番繰返し載荷実験を実施した。

供試体は曲げ卓越、並びにせん断卓越の各載荷条件に対し、実験Ⅱシリーズと同一形状の計8体 (MH, ML 1, ML 2, MR, 並びにSH, SL 1, SL 2, SR) とした。荷重の増減は変位制御で行い、RC供試体 (MR, SR) の各短期許容設計荷重時のはり中央変位 δ_0 を基準として、中央変位 δ が目標値 $\delta/\delta_0 = 1, 3, 5, 7, 10$

(せん断卓越載荷ではさらに20, 30) にて一旦除荷し、負側にも同一変位振幅を与え、この正負変位振幅で3回繰返し載荷を行った後、次の目標変位に進めることとした。なお、加力は供試体の上下方向から2つ

表1 供試体の内容 (実験Ⅱ)

曲げ卓越	せん断卓越	使用鋼材比	備 考
MH	SH	1.00	鉄骨H490×200×6×1Q2
ML 1	SL 1	0.81	極太異形棒鋼 φ51, ラチス t16×b50
ML 2	SL 2	0.92	極太異形棒鋼 φ51, ラチス t16×b100
ML 3	SL 3	0.81	極太棒鋼 φ51, ラチス t16×b50
MR	SR	0.65	極太異形棒鋼 φ51を鉄筋使用

表2 供試鋼材の機械的性質 (実験Ⅱ)

材 料	耐力 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸び (%)	備 考
鋼板 t10.2	30.2	47.0	31.4	Hフランジ材
鋼板 t6	32.9	44.9	30.6	Hウェブ材
鋼板 t16	24.3	43.6	33.4	ラチス材
丸鋼 φ51	44.1	54.6	18.9	極太異形棒鋼
鉄筋 D19	37.0	55.2	33.0	曲げ鉄筋
鉄筋 D10	40.9	58.2	27.6	スターラップ

表3 コンクリートの性質 (実験Ⅱ)

圧縮強度 (%)	引張強度 (%)	ヤング率 (%)	備 考
252	21.0	2.09×10 ⁵	4週強度

表4 極太異形棒鋼の付着強度 (実験Ⅱ)

初期付着強度 τ 0.25 (%)	最大付着強度 (%)	備 考
62	114	$\sigma_c = 252$ (%)

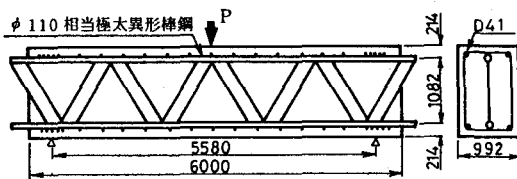


図5 実大供試体形状 (実験Ⅲ)

表5 供試体の内容 (実験Ⅲ)

供試体	はりの幅×高さ	曲げ補強鋼材量 (%)	せん断補強鋼材量 (%)
U-1	992×1510	1.64	1.37
U-2	440×670	1.66	1.37

※ ラチス材はスターラップ換算

表6 供試鋼材の機械的性質 (実験Ⅲ)

分 類	項 目	耐 力 (Kg/mm ²)	引張強さ (Kg/mm ²)	伸 び (%)	使 用 供試体
極太異形棒鋼	φ110相当	22.4	46.2	34.7	U-1
	φ51 相当	50.5	56.1	21.6	U-2
曲 げ 鉄 筋	D41	35.3	54.0	29.4	U-1
	D16	36.1	54.7	26.7	U-2
ラチス材	鋼板 t36	24.6	40.4	35.2	U-1
	鋼板 t16	27.7	44.3	29.6	U-2
スターラップ	D22	36.6	56.3	22.3	U-1
	D10	41.5	60.4	24.4	U-2

表7 コンクリートの性質 (実験Ⅲ)

圧縮強度 (%)	引張強度 (%)	ヤング率 (%)	備 考
202	18.8	1.74×10 ⁵	4週強度

表 8 供試鋼材の機械的性質 (実験Ⅳ)

材 料	耐力 (Kg/mm^2)	引張強さ (Kg/mm^2)	伸び (%)	備 考
鋼板 t10.2	29.2	48.9	29.1	II フランジ材
鋼板 t6	26.3	37.5	31.7	II ウェブ材
鋼板 t16	24.3	43.6	33.4	ラチス材
丸鋼 $\phi 51$	50.5	63.9	17.6	極太異形棒鋼
鉄筋 D19	36.3	54.5	31.0	曲げ鉄筋
鉄筋 D10	42.6	62.2	26.5	スターラップ

の油圧ジャッキを交互に使用して行った。供試鋼材の機械的性質を表 8 に、コンクリートの性質を表 9 に、および極太異形棒鋼 ($\phi 51\text{mm}$ 相当材) の付着強度を表 10 に示す。

3. 結果と考察

3.1 引抜き付着試験 (実験Ⅰ)

(A) 引抜き耐荷特性 引抜き付着試験から得られた各供試体の公称付着応力度 τ と自由端変位の関係を図 6 に示す (供試体 No. の添字はふし高さ h とピッチ p を表す)。これより次の事が明らかである。ふしの高さピッチ比が、 $h/p \leq 0.075$ の範囲 (U_{3-60} , U_{3-40}) では、加力初期よりすべりを生じ易く、他方 $h/p \geq 0.15$ の範囲 (U_{3-20} , U_{5-20} , U_{7-20}) では、初期耐荷性能は良好であるが最大付着強度は他の供試体に比して低い。その点 $0.083 \leq h/p \leq 0.125$ の範囲では、初期耐荷性能は中間的傾向を示すが、公称最大付着強度 $\tau_{\max}$ は $80 \sim 90 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ で最も高い。

(B) 付着強度の評価 供試棒鋼の $\tau_{\max}$ をコンクリート圧縮強度 σ_c で無次元化し、過去の試験データ^{5),6)}とともに h/p で整理した結果を図 7 に示す。供試棒鋼は平坦面の存在により、従来 D51 に比べ付着強度が $15 \sim 35\%$ 低いものの、学会許容値に対して 3 以上の安全率を有している。なお、引抜き荷重と平坦部の付着抵抗力 (平坦部面積とふしなし供試体 U_0 の $\tau_{\text{flat}} = 18 \text{ Kg}/\text{cm}^2$ の積) との差をふし頂面のコンクリートせん断面積で除した値を τ^* とすると、図 8 に示すとおり、 $\delta = 0.25\text{mm}$ 時の初期すべり時 $\tau^*_{0.25}$ と最大時の $\tau^*_{\max}$ の各々は、多少ばらつきはあるが、図中に示した実験式を用いて、平坦面の有無に関係なく h/p のみで評価できる。

上記諸点を総合的に判断すると、全体的な付着耐荷性能に優れ、かつふし突起部が占める材料割合を小さくし得る効率的な極太異形棒鋼のふし形状は、ピッチが高さの 10 倍程度と考えられる。

上記諸点を総合的に判断すると、全体的な付着耐荷性能に優れ、かつふし突起部が占める材料割合を小さくし得る効率的な極太異形棒鋼のふし形状は、ピッチが高さの 10 倍程度と考えられる。

表 9 コンクリートの性質 (実験Ⅳ)

圧縮強度 (%)	引張強度 (%)	ヤング率 (%)
236	19.7	2.1×10^5

表 10 極太異形棒鋼の付着強度 (実験Ⅳ)

初期付着強度 $\tau_{0.25}$ (%)	最大付着強度 (%)	備 考
89	142	$\sigma_c = 236$ (%)

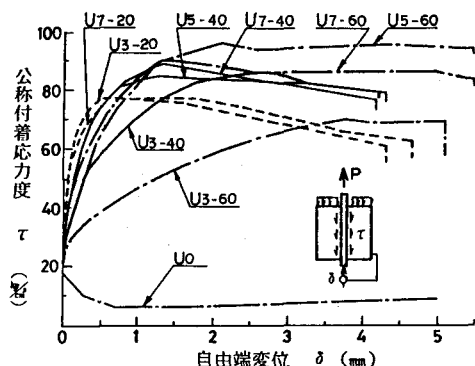
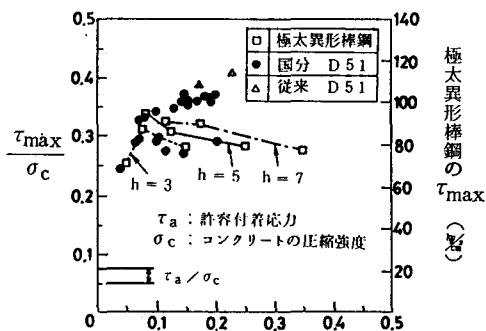
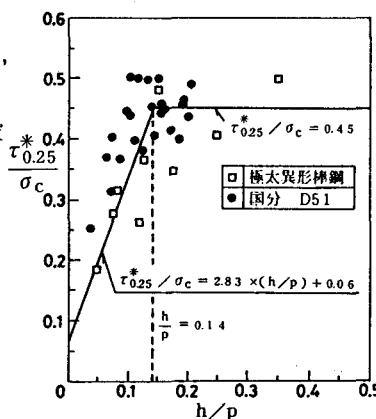
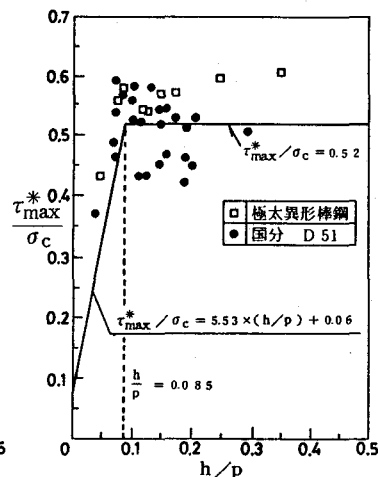


図 6 公称付着応力度と自由端変位 (実験Ⅰ)

図 7 $\tau_{\max}/\sigma_c$ と h/p (実験Ⅰ)

(a) 初期すべり時



(b) 最大時

図 8 τ^*/σ_c と h/p (実験Ⅰ)

3.2 SRCはりの静的載荷実験（実験Ⅱ）

(A) 耐力特性 曲げ卓越並びにせん断卓越の両載荷条件における各供試体の荷重とはり中央変位の関係を図9, 10に示す。これらよりSRC部材の耐力特性に関し、以下の事が明らかである。

(1) 曲げ卓越耐力： 破壊形式は、何れの供試体も引張側フランジ材が降伏する曲げ破壊を示し、ラチス材の大小（ML1, ML2）が耐力特性に及ぼす影響はわずかである。また付着を切った棒鋼鉄骨供試体（ML3）の初期耐力性能は、ふし突起を有する供試体（ML1）に比べて劣っている。

(2) せん断卓越耐力： 破壊形式はRC供試体（SR）がせん断破壊を示すが、その他の供試体では曲げで引張側フランジ材が降伏した後ウェブ材が降伏する曲げせん断破壊を示す。また、ラチス材を大きくすれば（SL2）、せん断耐力並びに耐力性能も向上し、H鉄骨を用いた供試体（SH）とはほぼ同等の性能が得られる。他方付着を切った棒鋼鉄骨供試体（SL3）の最大耐力は、ふし突起を有する供試体（SL1）のそれとはほぼ同等であるが、初期の耐力性能は劣っている。

以上より、極太異形棒鋼の鉄骨化により構造物は靱り強さを付与され、かつふしの効果で初期耐力性能が大幅に改善されるといえる。

(B) コンクリートと鋼材の一体性 コンクリートと鋼材の付着状況を検討するため、供試体端部でコンクリートと鋼材の相対変位 δ^* を測定した結果を図11に示す。これより、H鉄骨を用いたSRC供試体（SH）および付着を切った棒鋼鉄骨供試体（SL3）では、何れも載荷初期から引張側フランジ材とコンクリートのずれが生じるが、極太異形棒鋼鉄骨供試体（SL1, SL2）では引張側フランジ材が降伏するまで δ^* 量が小さく、ふしの効果でコンクリートと鋼材の一体性は良好である。なお、SRC規準⁷⁾の考え方に準じてラチス材のせん断力の分担を考慮し、局部付着応力度の検討を行うと、極太異形棒鋼鉄骨供試体（SL2）では曲げせん断破壊した $P_{max}=189t$ で、極太異形棒鋼に要求される付着応力度は $\tau_{max}=50\text{ Kg/cm}^2$ であり、一方RC供試体（SR）では $P_{max}=124t$ に対して $\tau_{max}=56\text{ Kg/cm}^2$ であった。これらの事から極太異形棒鋼の必要付着力は、鉄骨化により同一荷重レベルの鉄筋的使用に比べ、約60%で良いことが判る。

(C) ひび割れ分散性 付着に対して厳しいせん断卓越条件にて、コンタクトゲージを用いてはり下面の最大ひび割れ幅を測定した結果を図12に示す。これより、引張側鋼材が降伏する荷重 $P \approx 135t$ と比較すると、極太異形棒鋼鉄骨供試体（SL1, SL2）のひび割れ幅は、H鉄骨供試体（SH）のその50～80%と小さく、また、付着を切った棒鋼鉄骨供試体（SL3）の20～50%であり、ふしの付着によるひび割れ分散効果が認められる。これらのことから、極太異形棒鋼を用いればひび割れ幅を小さくでき、耐久性の見地から

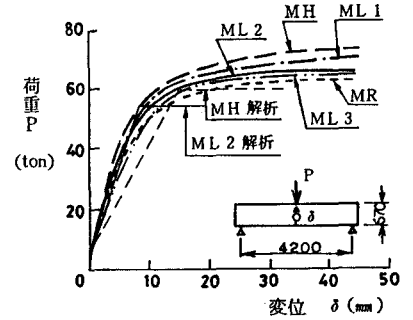


図9 曲げ卓越条件での $P-\delta$ （実験Ⅱ）

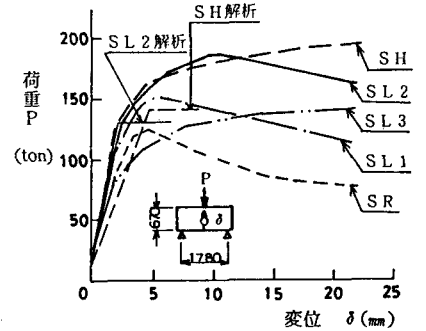


図10 せん断卓越条件での $P-\delta$ （実験Ⅱ）

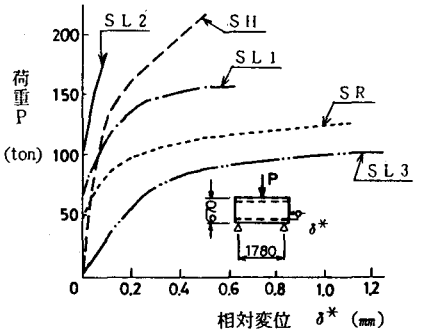


図11 せん断卓越条件での鋼材とコンクリートの相対変位（実験Ⅱ）

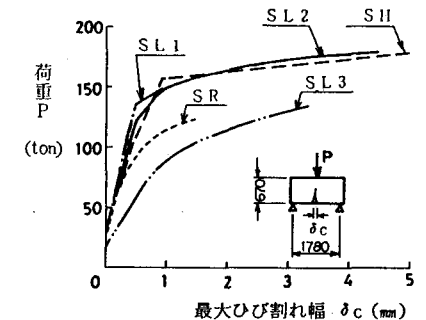


図12 せん断卓越条件でのはり下面最大ひび割れ幅（実験Ⅱ）

良好といえる。

(D) SRC構造の耐荷性能の評価 耐力は、H鉄骨使用供試体では累加強度式により評価し、極太異形棒鋼鉄骨使用供試体ではコンクリートとの一体性が良かったのでこれを鉄筋と見なし、ラチス材にせん断力を一部分担させる方法で評価した。また変形は、曲げ剛性並びにせん断剛性に対し、ひび割れの進展を考慮した補正⁸⁾⁹⁾を行った。結果は図9、10に示すように、実用範囲内で耐荷性能を概略説明できる。

3.3 実大SRCはりの静的載荷実験（実験Ⅲ）

(A) 耐荷特性 $\phi 110\text{mm}$ 相当の極太異形棒鋼試圧延材 ($h/p=0.13$)を用いた実大供試体(U-1)と縮尺1/2.2の小型供試体(U-2)の荷重Pとはりの中央変位 δ の関係を図13に、また前節の耐荷性能の評価手法を用いて各供試体のP並びに δ を計算曲げ終局耐力 P_{MC} および P_{MC} に到達時の計算変位 δ_c で無次元化した結果を図14に示す。これより、曲げ並びにせん断補強鋼材比が同一の実大はりと小型はりの無次元化された剛性および耐力は、引張側鋼材が降伏するまで寸法によらずほぼ同等で、相似則が成立していると考えられる。すなわち、ラチス鉄骨化したSRC構造では、異形棒鋼の太径化がはりの耐荷特性に及ぼす影響は小さいと考えられる。なお、実大供試体端部のコンクリートと引張側鋼材の相対変位は最大0.2mmであり、コンクリートと鋼材の一体性は良好で、図13に示したとおり前節で述べた耐荷性能の評価手法は、実大はりに対しても十分適用できる。

(B) ひび割れ分散性 ひび割れ幅と鋼材のコンクリートかぶりの関係を把握する意味で、実験Ⅲにおいてもはり下面のひび割れ幅を測定した。引張側鋼材応力が長期許容応力値に至った時の最大ひび割れ幅とかぶりの関係を図15に示す。これより、ひび割れ幅はかぶり量に依存し、限界状態設計指針¹⁰⁾(案)と傾向的に一致しており、8角形断面で平坦面を有する極太異形棒鋼を用いても、ひび割れ分散性が良好なものと推察される。

3.4 SRCはりの繰返し載荷実験（実験Ⅳ）

(A) 耐荷特性 繰返し載荷実験より得られた各供試体の履歴曲線を数例図16、17にその荷重ピーク包絡線を図18、19に示す。また、各供試体の変形能に関わるウェブ形式と靱性の関係を表11に示す。これらより耐荷特性について以下の事が判る。

(1) 曲げ卓越載荷:

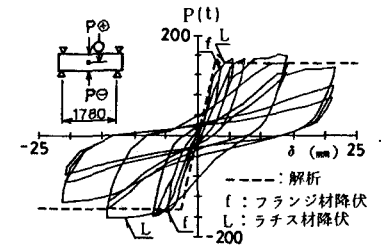


図16 SL2の履歴曲線（実験Ⅳ）

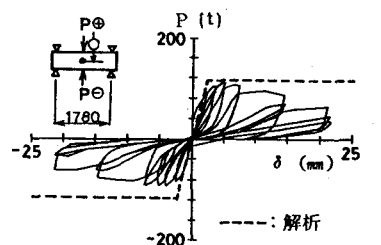


図17 SRの履歴曲線（実験Ⅳ）

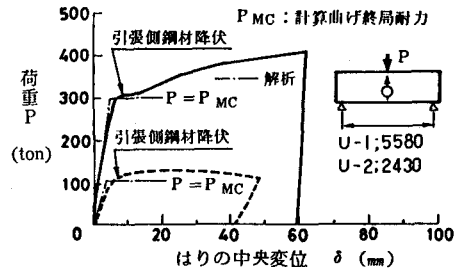


図13 P-delta（実験Ⅲ）

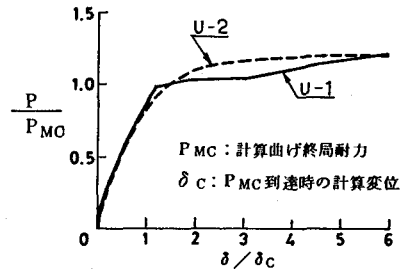


図14 P/PMC - delta/delta_c（実験Ⅲ）

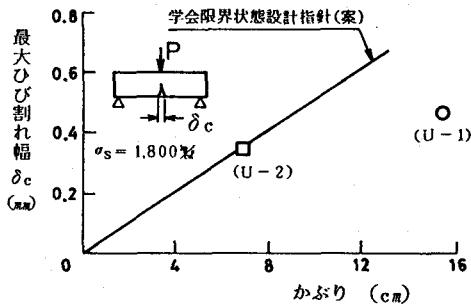


図15 かぶりと最大ひび割れ幅（実験Ⅲ）

ピーク包絡線で見た各供試体の耐荷特性は静的実験（実験Ⅱ）のそれと類似で、耐力に及ぼすラチス材の大小の影響は小さい。しかし、極太異形棒鋼鉄骨を用いた供試体（ML1, ML2）の靱性率は、RC供試体（MR）に比べて1.4倍以上あり、静的実験に比べラチス材による靱性向上効果が認められる。

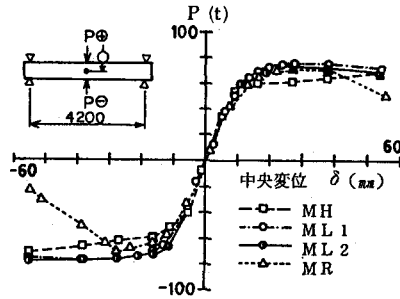


図 18 曲げ卓越条件での $P-\delta$ 包絡線（実験Ⅳ）

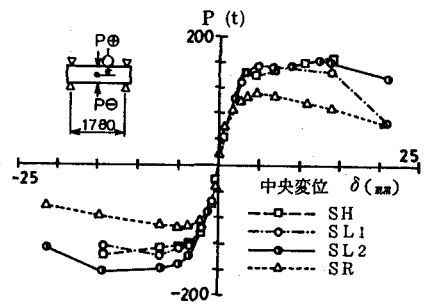


図 19 せん断卓越条件での $P-\delta$ 包絡線（実験Ⅳ）

(2) せん断卓越载荷： 各供試体の耐荷特性はやはり静的実験と類似であるが、ラチス材が小さい極太異形棒鋼鉄骨供試体（SL1）は、曲げ鋼材の降伏に先行してラチス材が降伏するせん断破壊を示し、繰返し载荷によるコンクリートの劣化の影響が現れたものと考えられる。他方ラチス材面積をSL1の2倍とした供試体（SL2）では、曲げ破壊が先行するとともに靱性率も大きく向上し、かつH鉄骨を用いた場合（SH）とほぼ同等のエネルギー吸収能力が得られ、耐力並びに靱性に及ぼすラチス材の大小の影響が大きい。

以上より、繰返し荷重条件下では静的条件下よりもさらにせん断補強の必要性が大きく、極太異形棒鋼をラチス材とともに鉄骨化し、かつラチス材板厚を適宜選択することにより、地震時変形性能を向上させることが可能といえる。なお、図18に示すとおり繰返し载荷条件でも本報告で述べた耐荷変形性能の評価手法が有効である。

(B) コンクリートと鋼材の一体性並びにひび割れ分散性 繰返し荷重下でも静的実験と同様、極太異形棒鋼鉄骨を用いた供試体（SL1, SL2）のコンクリートと鋼材の一体性は良好である。かつ、はり下面の最大ひび割れ幅は、H鉄骨フランジ材の降伏荷重 $P=107$ t 時に、H鉄骨使用供試体（SH）よりも35%小さく、ひび割れ分散性も良好である。

4. 結 言

以上4つの実験シリーズから、極太異形棒鋼並びにこれをラチス材とともに鉄骨化したSRCはりに関し次の事が判明した。①付着耐荷性能に優れた極太異形棒鋼のふし形状は、ピッチが高さの10倍程度である。②極太異形棒鋼をラチス材とともに鉄骨化すると、コンクリートはりの靱性が向上し、ひび割れ分散性も良好である。また、棒鋼の太径化が耐荷性能に及ぼす影響は小さい。③極太異形棒鉄骨を用いたSRCはりの耐力および変形は、極太異形棒鋼を鉄筋と見なし、かつラチス材のせん断力分担を考慮した評価手法で概略説明できる。

参考文献

- 1), 2) 森本, 小林: 土木学会第40回年次学術講演会, 第5部門, P 415, P 411, S 60. 9
- 3), 4) 森本, 小林: 土木学会第41回年次学術講演会, 第5部門, S 61. 11
- 5) 国分, 岡村: 土木学会論文報告集, No 202, 1972年6月
- 6) 土木学会: コンクリートライブラリー, 第43号, 1977年8月
- 7) 本四公団: 鉄骨鉄筋コンクリート構造 設計指針・同解説, S 52. 8
- 8) Branson, D. E.: Jour. of A C I, vol. 63, No 6, P 638, 1966
- 9) 武藤: 鉄筋コンクリート構造物の塑性設計, P 200, 丸善, S 55
- 10) 土木学会: コンクリートライブラリー, 第52号, S 58. 11