

(41) 高張力鋼を用いたSRCはりの ひび割れと長期たわみ性状

CRACKS AND CREEP DEFLECTION OF CONCRETE ENCASED STEEL BEAMS USING HIGH STRENGTH STEEL

俣野善治*

森野捷輔**

Yoshiharu MATANO, Shosuke MORINO

The crack development under monotonic loading and the time-dependent deflection of concrete encased steel(SRC) flexural beams using high strength steel are studied. The test models are sixteen SRC beams — twelve of those are composed of high strength steel(60kgf/mm^2 or 80kgf/mm^2), others are of mild steel(40kgf/mm^2) — and two reinforced concrete(RC) beams. The monotonic loading tests are carried out on ten SRC models, and other models are tested for 78 weeks under sustained loads.

Major findings on the high strength steel SRC beams obtained from the tests follow; (1) the maximum crack width under allowable temporary loads is less than 0.3mm ; (2) the maximum crack width under 78 weeks sustained allowable long-term loads is nearly equal to 0.3mm ; (3) the creep coefficients of the high strength steel SRC beams under allowable long-term loads are nearly equal to those of mild steel SRC beams.

1 緒言

この研究は、高張力鋼を用いた鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) はりのひび割れ性状と長期たわみ性状を実験的に調べ、そのひび割れ間隔、幅およびクリープ係数について検討したもので、その詳細は文献 [1] に報告されている。この研究の目的は、高張力鋼使用SRCはりの 1) 単調漸増載荷時のひび割れ性状、2) 長期間持続荷重のもとでのひび割れ性状および 3) 長期間持続荷重のもとでのたわみ性状を把握することにある。

2 実験計画

実験は、単調漸増載荷によるはりの曲げ実験 (実験1) [2] と、定荷重の持続載荷によるクリープ実験 (実験2) [3] よりなる。両実験の試験体は、幅20cm、せい30cm、長さ2.50mのSRCはりとし、実験2では比較用として同寸法の鉄筋コンクリート (RC) はりも用いることとした。また、コンクリートの圧縮強度はすべて 300kgf/cm^2 とした。

実験1は、単純支持されたSRCはりに2点集中荷重を単調漸増載荷する曲げ実験である。計画した実験変数は、1) 鋼材種、2) 鉄骨断面 (偏心配置を含む)、3) 鉄骨フランジの断面積、および 4) 引張鉄筋比である。表-1の上段は、軟鋼 (鋼材種47) と高張力鋼 (鋼材種68, 69, 89) のH形鋼を用いたSRCはりとしての実験変数との組合せを示した試験体断面リストである。試験体A5では上下の鉄筋量を変え、A10では鉄骨を偏心配置させてある。

実験2は、2点集中荷重を受ける、単純支持されたSRCはりおよび比較用RCはりの78週間のクリープ

*日本建築総合試験所主任研究員 構造物試験室 **工博 三重大学教授 工学部建築学科

実験で、試験体断面リストを表-1の下段に示す。計画した実験変数は、1)鋼材種、および 2)鉄骨フランジの断面積である。鉄骨断面は、2本のはりを一対にして持続载荷できるように、鉄骨フランジ断面積を調整することによって、試験体3-1と3-2、3-3と3-4、3-5と3-6の単純累加による長期許容曲げモーメント、 M_0 が互いにほぼ等しくなるように計画した。RC部の断面はすべて同一とした。

3 材料および試験体

試験体の形状・寸法・配筋を図-1.1および図-1.2に示す。鉄骨は溶接による組立H形鋼で、主筋はD16あるいはD10（いずれもSD35）、あばら筋は2-D6（SD30）を用いた。主筋は、鉄骨両端のプレートに固定した。あばら筋のピッチは、等モーメント部で100mm、せん断スパン部で50mmである。

表-1 試験体断面リスト

番号	鋼種	鉄骨断面	鉄筋	鉄筋比(%)	種類
A1	69	H-200x100x6x9	4-D10	0.24	SRC
A2	69	H-200x100x6x6	4-D16	0.66	SRC
A3	69	H-200x100x6x9	4-D16	0.66	SRC
A4	69	H-200x100x6x12	4-D16	0.66	SRC
A5	69	H-200x100x6x9	2-D10	0.24	SRC
			2-D16	0.66	
A6	47	H-200x100x6x9	4-D16	0.66	SRC
A7	68	H-200x100x6x9	4-D16	0.66	SRC
A8	89	H-200x100x6x9	4-D16	0.66	SRC
A9	69	H-100x100x6x9	4-D10	0.24	SRC
A10	69	H-100x100x6x9	4-D10	0.24	SRC
3-1	47	H-200x85x6x9	4-D16	0.66	SRC
3-2	68	H-200x75x5x5	4-D16	0.66	SRC
3-3	47	H-200x105x9x12	4-D16	0.66	SRC
3-4	69	H-200x110x6x6	4-D16	0.66	SRC
3-5	47	H-200x105x9x16	4-D16	0.66	SRC
3-6	69	H-200x100x6x9	4-D16	0.66	SRC
3-7	--	----	4-D16	0.66	RC
3-8	--	----	4-D16	0.66	RC

鋼種(例) 69：引ひ強度約60kgf/mm²，降伏比0.9

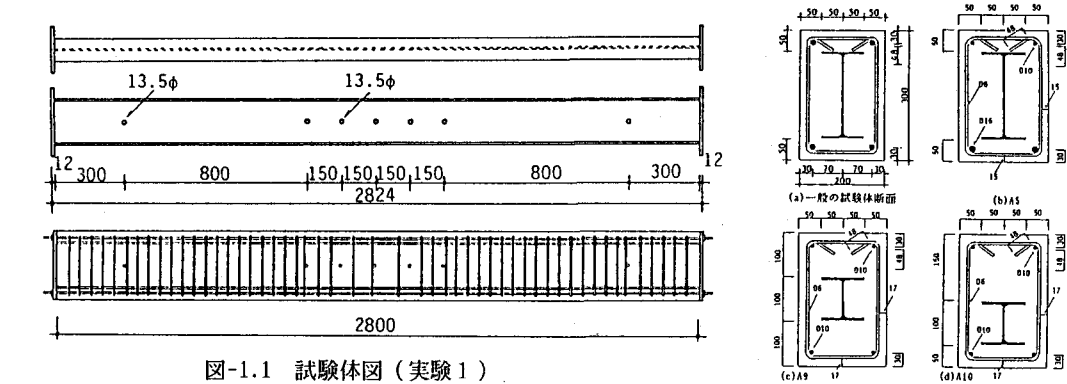


図-1.1 試験体図（実験1）

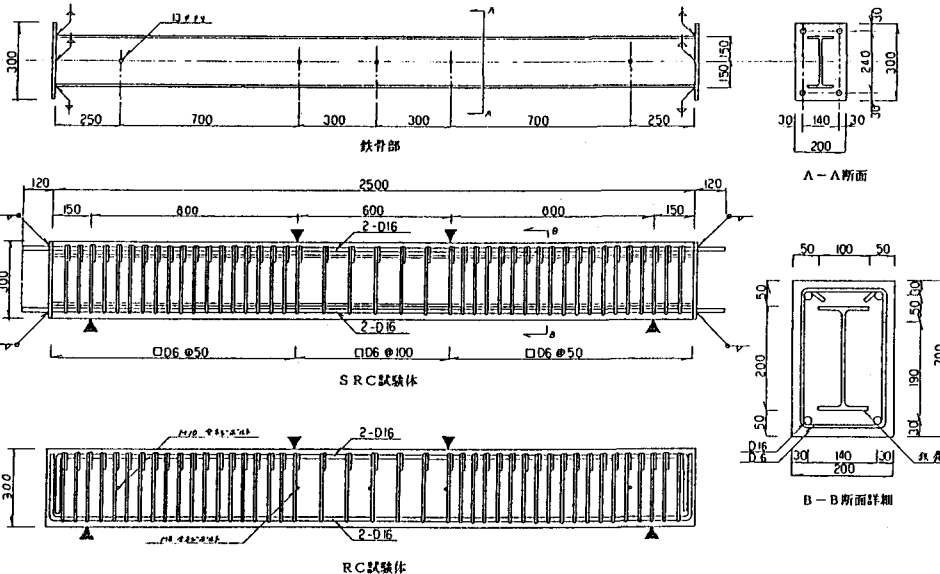


図-1.2 試験体図（実験2）

表-2に鋼材の機械的性質を示す。47b, D-10b, D-16bは試験体 A1～A10に、47a, D-10a, D-16aは試験体3-1～3-8に使用された鋼材である。

使用コンクリートの重量配合比（セメント：水：細骨材：粗骨材）は実験1では1:0.60：2.28：3.24，実験2では1：0.58：2.44：3.09で，粗骨材最大寸法は実験1が15mm，実験2が20mmとし，混和剤は実験2だけにボゾリスNo.70（35kg/m³）を用いた。なお，実験2では，はり試験体およびコンクリートの圧縮試験用供試体（φ10×20cm），圧縮クリープ試験用および長さ変化測定用供試体（10×10×40cm）は，いずれも冬期に屋外で製作し，シートがけ養生したのち，載荷開始日の6日前にクリープ実験を行う試験室内（20±2℃，65±5%RH）へ搬入した。

コンクリートの圧縮試験，割裂試験の結果を表-3.1および表-3.2に示す。実験1ではSRCはりの実験日に，実験2では載荷開始日に，それぞれおこなった試験の結果である。表-3.2には，はりのクリープ実験期間に上記の試験室内でおこなったコンクリートの圧縮クリープ試験と長さ変化測定の結果も示す。

4 実験方法

〔実験1〕 図-2.1に実験1の載荷装置および測定装置の概略を示す。支点間距離を220cmとして，両支点より80cmの位置に2点集中鉛直荷重の単調漸増載荷をおこなった。ひび割れの観察は，等モーメント部の片側側面と引張面でおこなった。ひび割れ幅の測定は，側面の主なひび割れを4～8本選び，引張面から1cm，3cmの位置で測微鏡を用いておこなった。圧縮側コンクリートの圧壊が始まった時点で，引張面より3cmの位置（引張筋位置）でのひび割れ間隔とひび割れの到達高さを測定した。

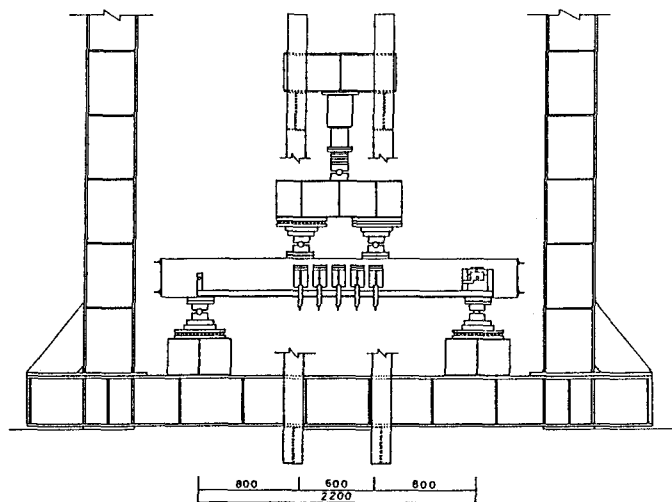


図-2.1 載荷装置および測定装置（実験1）

表-2 鋼材の機械的性質

鋼種	厚・径 (mm)	降伏点 (tf/cm ²)	引張強さ (tf/cm ²)
47a	6	3.02	4.23
	9	3.23	4.35
	12	2.57	3.95
	16	2.71	4.30
47b	6	3.04	4.25
	9	3.01	4.26
68	6	5.03	5.95
	9	4.60	5.66
69	6	6.11	6.66
	9	5.58	6.12
	12	5.82	6.58
89	6	8.15	8.62
	9	8.59	8.98
鉄筋	D-10a	2.72	5.37
	D-10b	3.72	5.22
	D-16a	3.93	5.71
	D-16b	3.81	5.72

表-3.1 コンクリートの試験結果（実験1）

試験体 番号	材齢 (日)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)
A1	50	310	28.4
A2	51	306	30.7
A3	98	341	31.9
A4	96	356	29.1
A5	39	371	34.0
A6	47	309	34.0
A7	35	364	34.1
A8	36	370	32.9
A9	38	376	37.6
A10	41	408	35.8

表-3.2 コンクリートの試験結果（実験2）

	F_c (kgf/cm ²)	E_c (10 ⁴)	ϵ_{sh} (10 ⁻⁴)	ϵ_e (10 ⁻⁴)	ϵ_{cr} (10 ⁻⁴)	ϕ
323	279000	5.1	3.6	12.5	3.5	
	(材齢4週) (材齢4週後の78週間)					
記号	F_c : コンクリートの圧縮強度					
	E_c : $F_c/3$ 時の割線弾性係数					
	ϵ_{sh} : 乾燥収縮ひずみ度					
	$\epsilon_e, \epsilon_{cr}$: 圧縮応力100kgf/cm ² 下の弾性，クリープひずみ度					
	ϕ : クリープ係数(ϵ_{cr}/ϵ_e)					

表-4 導入荷重値

試験体 番号	P (tf)	M (tf・m)
3-1,2	6.5	5.3
3-3,4	7.4	6.1
3-5,6	8.9	7.3
3-7,8	2.5	2.1

(注) P…はりと装置の重量の影響を考慮して低減された値

【実験2】 図-2.2に実験2の荷重装置および測定装置の概略を示す。この実験は、 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $65 \pm 5\% \text{RH}$ の試験室内でおこなった。2本のはりを一対として荷重装置にとりつけ、はりの2集中加力点間の曲げモーメントが単純累加による長期許容値にほぼ等しくなるように、2集中加力点にそれぞれ荷重 P （表-4）を持続して作用させることとした。なお、はり装置を支える台の位置は、これらの重量による上・下はりの2集中加力点間の曲げモーメントの平均値が相等しくなるように決めた。上記の導入荷重値 P は、これらの重量の影響を考慮して低減してある。

はりのスパン中央と集中加力点のたわみを、図2.2に示す装置で測定した。たわみ測定用変位計は、試験体両支端の10cm内側に取りつけたボルト間に架け渡した2本の治具に据えつけた。また、ひび割れの発生・進展状況を記録するとともに、2集中加力点間のはり側面引張筋位置でのひび割れの間隔と幅を測定した。

5 実験結果および考察

5.1 単調漸増荷重時のひび割れ性状（実験1）

図-3の●印は、圧縮側コンクリート圧壊時の引張鉄筋位置でのひび割れ間隔 a とひび割れ長さ l の実験値である。鋼材種のみが異なる試験体A3、A6、A8の相互比較から、ひび割れ間隔に及ぼす鋼材種の影響は小さいことが分かる。一方、鉄骨断面が小さく、はりせい中央に配置されている試験体A9では、予測どおりひび割れ間隔が大きい。また、試験体A2、A3、A4の相互比較、および試験体A1とA3の相互比較から、ひび割れ間隔に及ぼす鉄骨フランジ断面積の影響は小さいが、引張鉄筋比の影響は明瞭に現れている。

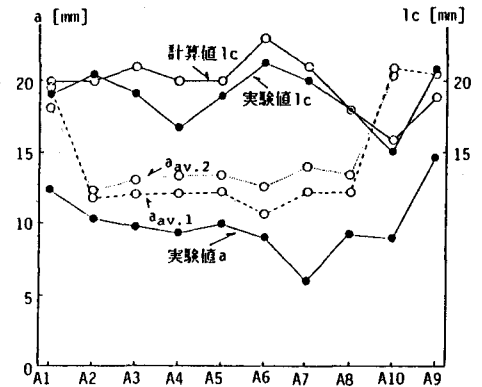


図-3 ひび割れの間隔と長さ

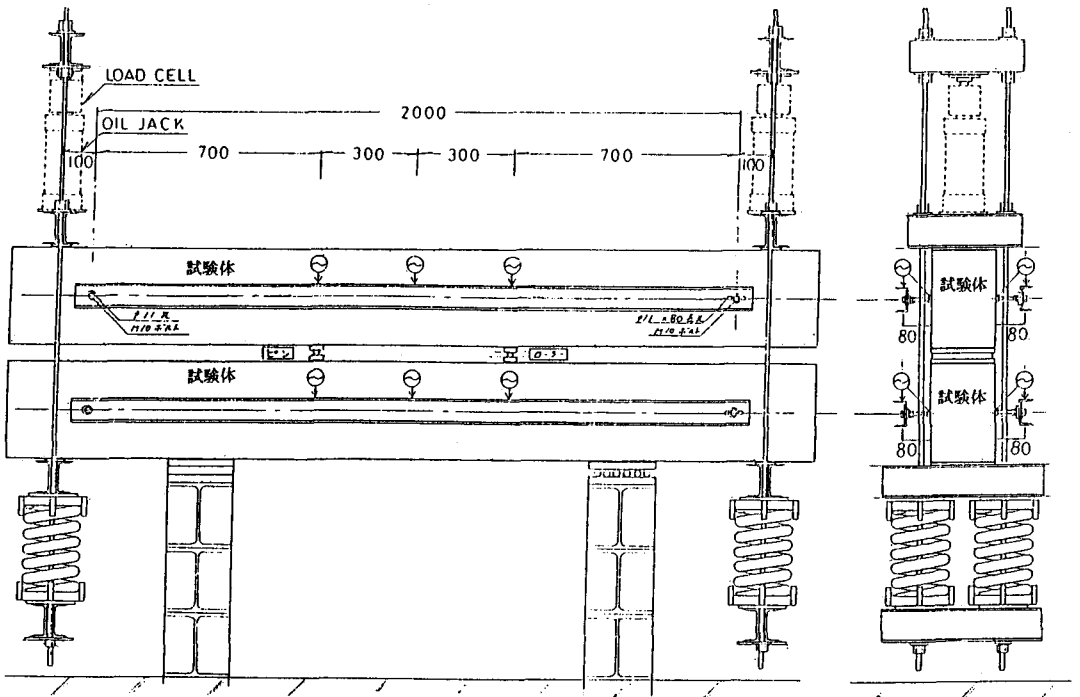


図-2.2 荷重装置および測定装置（実験2）

図-3の○印は、圧縮側コンクリート圧壊時の、文献[4]の式による平均ひび割れ間隔 a_{av} の計算値と断面分割法による弾塑性解析[2]による引張側コンクリート縁から中立軸までの距離 l の計算値を示したもので、 a_{av1} 、 a_{av2} はそれぞれ鉄筋のみ、および鉄骨フランジを鉄筋として扱って、コンクリートとの付着を考慮した場合の平均ひび割れ間隔である。ひび割れ間隔 a の実験値は計算値に比べて小さくなっており、A7やA10でその傾向が顕著である。コンクリート圧壊時のひび割れ長さの実験値は計算値とほぼ一致している。

次に、図-4は実験終了時の主な曲げひび割れを示したもので、各ひび割れの引張鉄筋位置でのひび割れ幅 w と荷重 P の関係を図-5に示している。図-5の破線は文献[4]による計算値で図中の数字は図-4に記したひび割れ位置である。また同図中に→で示す短期許容荷重時のひび割れ幅は、いずれも破線で示すひび割れ幅0.3mm以下であり、高張力鋼を用いたSRCはりのひび割れ幅が特に過大な値になることはなかった。

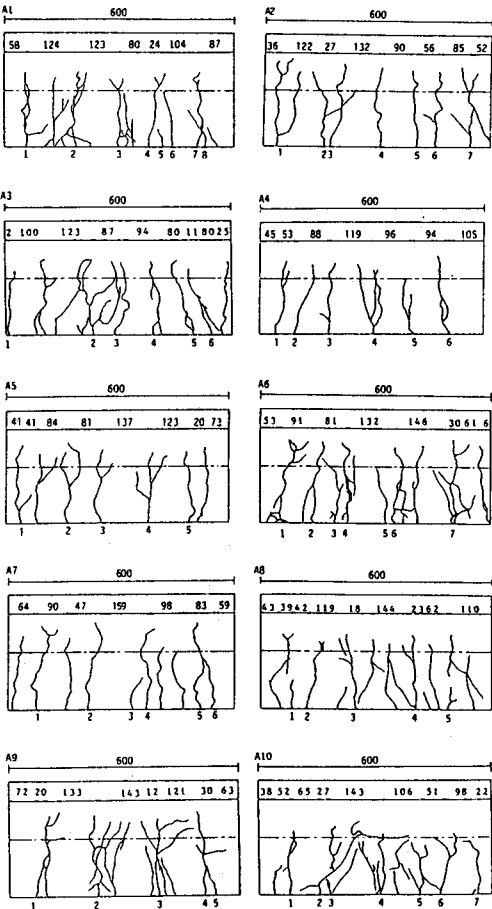


図-4 実験終了時の曲げひび割れ (実験 1)

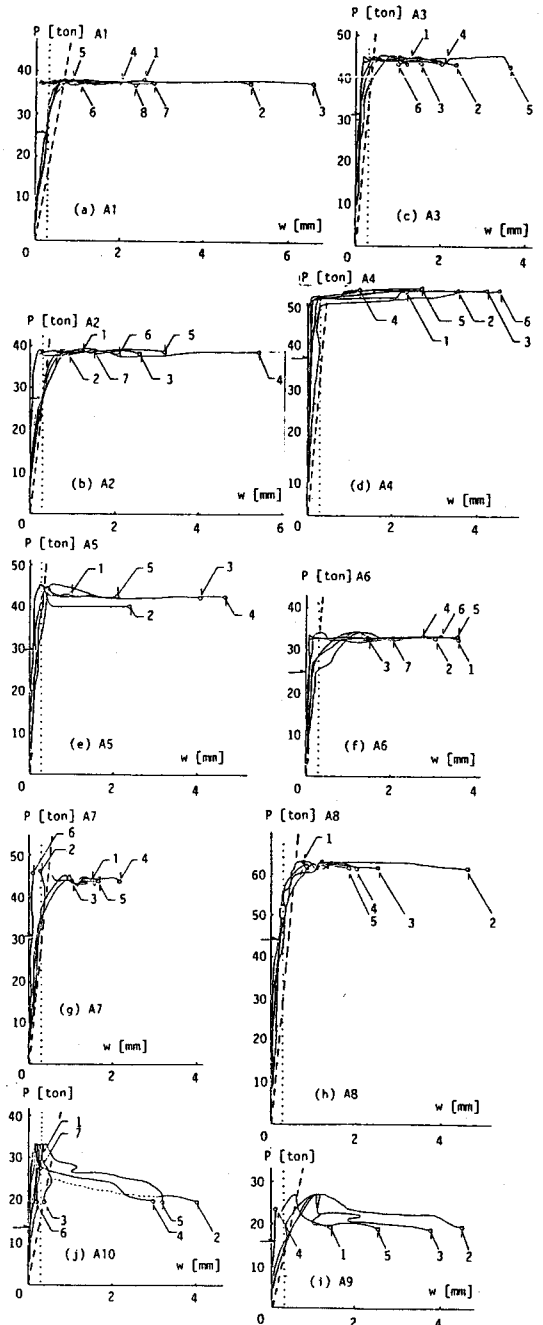


図-5 荷重とひび割れ幅の関係

5.2 長期間持続荷重のもとでのひび割れ性状（実験2）

図-6にクリープ実験におけるひび割れ図を示す。破線は荷重導入時発生、実線は持続荷重中に発生・進展のひび割れである。図中の数字は、荷重導入後ひび割れ発生までの週数（dをつけたものは日数）を表す。荷重導入直後はすべて曲げひび割れで、持続荷重によってこれらが進展するとともに、新たなひび割れも発生した。このうち、純曲げ部でははりの種類に関わらずほぼ同じ性状を示した。一方、せん断スパンについては、RCはりでは実験終了時までせん断ひび割れは発生しなかったのに対し、SRCはりでは、持続荷重によってせん断ひび割れの発生・進展・増加が、載荷荷重の大きい試験体で特に顕著であった。また、はりの2集中加力点間の平均・最大ひび割れ幅の経時変化曲線を図-7に示す。さらに、実験終了時のひび割れ幅と鉄骨比の関係を図-8に示す。

これらの図からわかるように、いずれのはりでも、荷重導入時に発生したひび割れの数、長さ、幅が、時間の経過とともに増え、1年半でほぼ安定した。この実験から次のことがいえる。：(1) 平均ひび割れ幅はクリープによって1年半で荷重導入直後の1.5～2.3倍に、最大ひび割れ幅は同じく1.6～2.6倍に増え、この増大倍率への鋼種、鉄骨比の影響は小さい。(2) 荷重導入1年半後の普通鋼使用SRCはりのはりひび割れ幅はRCはりのそれと同等で、平均0.1mm程度、最大0.2mm未満で鉄骨比の影響は小さいのに対し、高張力鋼使用SRCはり、特に鉄骨比の小さいはりのひび割れ幅は、載荷応力レベルが高いこともあって、RCはりのその約2倍で、平均0.2mm程度、最大0.3mm程度となった。なお、この実験では、60キロ級高張力鋼の長期許容応力度を、ひび割れ幅を考慮せず2.7tf/cm²とした。高張力鋼の長期許容応力度の決定に際してひび割れを考慮しない場合には、設計においてひび割れに対する注意が必要である。

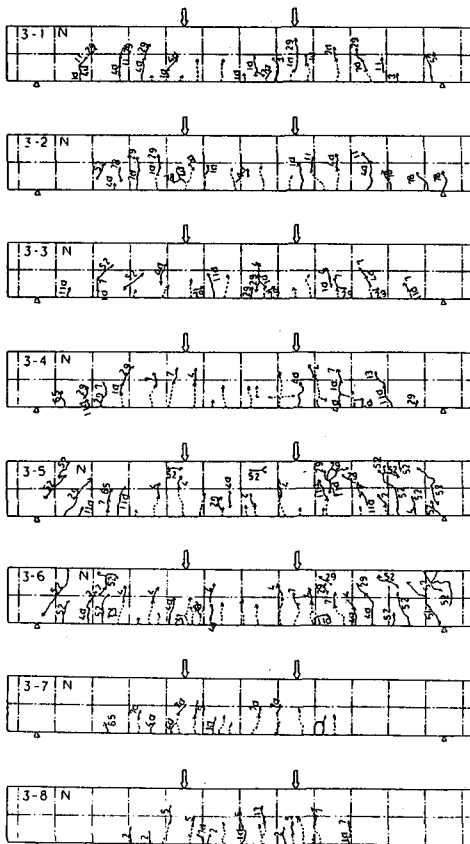


図-6 クリープ実験におけるひび割れ

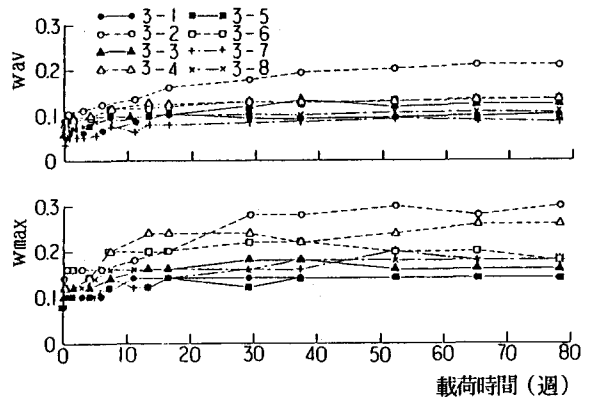


図-7 ひび割れ幅と載荷時間の関係

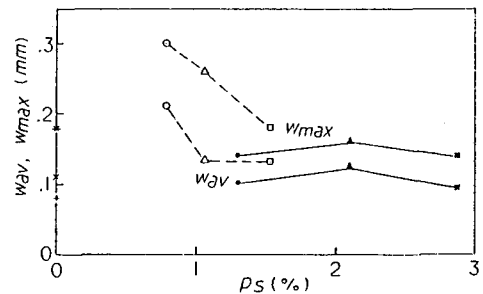


図-8 クリープ実験終了時のひび割れ幅と鉄骨比の関係

5.3 長期間持続荷重のもとでのたわみ性状（実験2）

定荷重を持続載荷すると、はりのたわみは、次に述べるように、いずれも初期は急速に、その後次第に緩やかに増大した。スパン中央のたわみの経時変化曲線を図-9に、このたわみから求めたクリープ係数の経時変化曲線を図-10にそれぞれ示す。これらの図からわかるように、はりのクリープたわみとその経時変化曲線の形状は鉄骨比、鋼種に関わらずほぼ同じになった。この結果、荷重導入時のたわみが大きいSRCはりでは、クリープ係数が相対的に小さくなる。

実験終了時のたわみクリープ係数と鉄骨比の関係を図-11に示す。SRCはりのクリープ係数は、鉄骨比が大きいほど、また、載荷応力レベルが高いほどいくらか小さくなっているが、それらの影響は小さい。荷重導入1年半後のSRCはりのクリープ係数は、普通鋼使用はりでは0.62～0.77、高張力鋼使用はりでは0.64～0.74で、鋼種による差はなく、鉄筋量の少ない（ $p_t = p_o = 0.66\%$ ）RCはりのクリープ係数（1.23～1.26）の約1/2となった。

表-5にスパン中央たわみの実験値と計算値を示す。計算値の曲げ変形成分は、コンクリートの有効弾性係数 $E_{c,eff} = E_c / (1 + \eta \phi)$ を用い、引張側コンクリートを無視して文献[5]より求めた。 ϕ はコンクリートの寸法効果修正後のクリープ係数（2.85）、 η はリラクゼーション特性値（0.85）である。このうち、計算値(1)では平面則を仮定した曲げ剛性を使い、計算値(2)ではクリープを考慮したRC部の曲げ剛性にクリープのない裸鉄骨の曲げ剛性を加算した「累加曲げ剛性」を使った。

また、計算値のせん断変形成分は、RCはりについては無びび割れとし、コンクリートの有効弾性係数を用いて求め、SRCはりについてはRC部の分担せん断力が経時変化するのでこの方法によらず鉄骨のせ

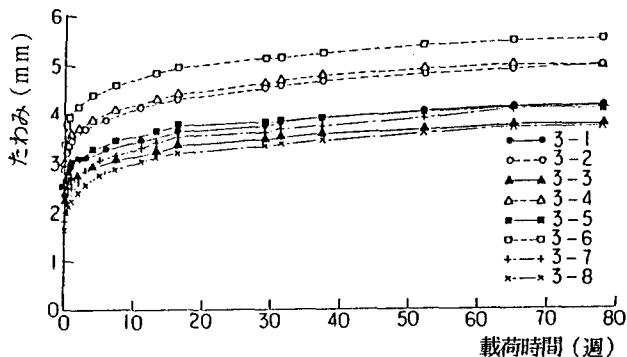


図-9 スパン中央たわみと載荷時間の関係

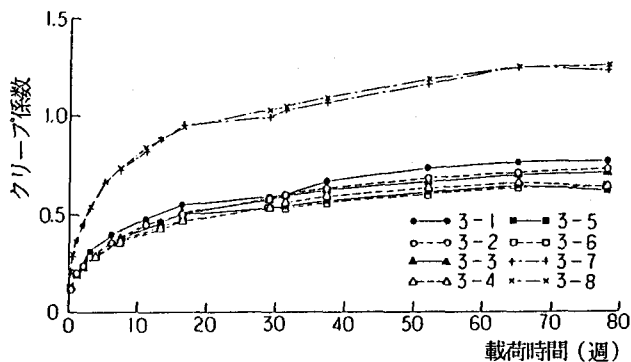


図-10 たわみクリープ係数と載荷時間の関係

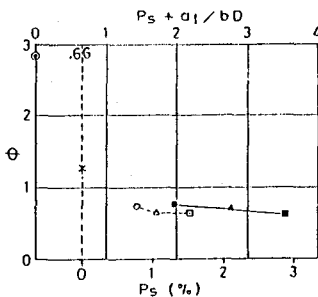


図-11 たわみクリープ係数と鉄骨比の関係（実験終了時）

表-5 スパン中央のたわみ（クリープ後）

試験体 番号	実験値		計算値(1)				計算値(2)			
	実	実/実0	曲げ	せん断	合計	計/実	曲げ	せん断	合計	計/実
3-1	4.14	1.77	3.62	.27	3.89	.94	3.83	.28	4.11	.99
3-2	4.98	1.74	4.27	.22	4.49	.90	4.57	.23	4.80	.96
3-3	3.77	1.71	3.28	.24	3.52	.93	3.41	.25	3.66	.97
3-4	4.95	1.64	4.44	.31	4.75	.96	4.68	.32	5.00	1.01
3-5	4.06	1.62	3.36	.31	3.67	.90	3.52	.32	3.84	.95
3-6	5.50	1.64	4.53	.40	4.93	.90	4.79	.42	5.21	.95
3-7	4.06	2.23	3.40	.13	3.53	.87	—	—	—	—
3-8	3.73	2.26	3.40	.13	3.53	.95	—	—	—	—

（注）実0…載荷開始時の実験値、実…クリープ後の実験値
計(1)…平面則を適用した曲げ剛性使用、計(2)…累加曲げ剛性使用

ん断力分担率が曲げモーメント分担率に等しいと仮定して、ウェブのせん断ひずみから算出した。表-5から次のことがいえる。

(1) SRCはりのクリープ後のたわみの実験値は鋼種、鉄骨比に関わらず計算値(1)を4~11%上回り、その超過の程度はRCはりの場合とほぼ等しく、SRCはりのクリープ後のたわみは引張側のコンクリートを無視し、コンクリートの有効弾性係数を用いる文献[5]による計算値で概ね予測できる。

(2) SRCはりのクリープ後のたわみの計算値(2)は計算値(1)をやや上回り、その差は5%程度で、SRCはりのクリープたわみの曲げ成分の予測に「累加曲げ剛性」を用いることができる。

6 結論

高張力鋼および普通鋼の鉄骨を用いたSRCはりに、単調漸増荷重を加える曲げ実験と、長期許容曲げモーメント相当の荷重を1年半与えるクリープ実験をおこなって、次の結論を得た。

- (1) 高張力鋼を用いたSRCはりの短期許容荷重時ひび割れ幅は、鋼材種、鉄骨断面、鉄骨フランジの断面積、引張鉄筋比に関わらず0.3mm以下であり、特に過大な値になることはない。
- (2-1) SRCはりの平均ひび割れ幅はクリープによって1年半で載荷開始時の1.5~2.3倍に、最大ひび割れ幅は同じく1.6~2.6倍に増え、この増大倍率への鋼種、鉄骨比の影響は小さい。
- (2-2) SRCはりのクリープ後の最大ひび割れ幅は、1年半で、普通鋼使用はりではすべて0.2mm未満で鉄骨比の影響は小さいのに対し、高張力鋼使用はり、特に鉄骨比の小さいはりでは最大0.3mmとなった。
- (3-1) 高張力鋼使用SRCはりのクリープ係数は1年半で0.64~0.74で、普通鋼使用SRCはりのクリープ係数0.62~0.77とほぼ等しく、鉄骨比の影響は小さい。
- (3-2) SRCはりのクリープ後のたわみは、引張側のコンクリートを無視し、コンクリートの有効弾性係数を用いた文献[5]による計算値で概ね予測できる。
- (3-3) SRCはりのクリープ後のたわみの曲げ成分の予測に、クリープを考慮したRC部の曲げ剛性にクリープのない裸鉄骨の曲げ剛性を加えた「累加曲げ剛性」を用いることができる。

謝辞 本研究は、(社)鋼材倶楽部「SRC造への高張力鋼適用に関する調査研究委員会」(委員長・若林実)の研究の一部として行われたもので、鹿児島大学助教授・内田保博博士、日本建築総合試験所研究員・井上隆二、土井清、下平祐司の各氏のご協力を頂いた。ここに記して感謝します

参考文献

- [1] SRC造への高張力鋼適用に関する調査研究委員会：高張力鋼を用いたSRC構造の開発研究，鋼材倶楽部，1989，pp.20-85
- [2] 森野捷輔・内田保博・興津豊：高張力鋼を用いたSRC構造の開発研究(No.20) SRCはり実験(その2) 最大耐力とひび割れ性状，日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿)，1987.10，pp.1241-1242
- [3] 俣野善治：高張力鋼を用いたSRC構造の開発研究(No.31) SRCはりのクリープ実験(その2)，日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)，1988.10，pp.1411-1412
- [4] R.Park and T.Paulay: Reinforced Concrete Structures, JOHN WILEY & SONS, New York, 1975, pp. 476-495
- [5] 俣野善治：鉄筋コンクリート梁のクリープ特性(その2)，長崎造船大学研究報告，第11巻，第2号，1970.10