

炭素繊維シートで補強した RC 部材の一軸引張試験

北海道大学 ○学生員 山口 隆一
 北海道大学大学院 学生員 庄司 和晃
 北海道大学大学院 正会員 佐藤 靖彦
 北海道大学大学院 正会員 上田 多門

1. はじめに

兵庫県南部地震により多数の鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物が甚大な被害を受け、それ以降既存の RC 構造物の耐震補強が必要となっている。近年補強材として注目されている素材に炭素繊維シート(以下 CFS)がある。CFS は高い強度と弾性率をもち、軽量でかつしなやかであるため施工性に優れた材料であり、今後のさらなる普及が期待されている。

現在、RC ではひび割れ性状が解明され、ひび割れ間隔、ひび割れ幅をもとめる手法が提案されている。しかし、CFS で補強した RC 部材のひび割れ性状に関してはその検討が十分になされているとは言えない。そこで本研究は CFS で補強した RC 部材のひび割れ性状を把握し、ひび割れ間隔とひび割れ幅それぞれに対する鉄筋比と CFS の補強量の影響を明らかにし、ひび割れ間隔とひび割れ幅の計算手法を構築するための知見を得ることを目的に行なった。

2. 実験概要

2.1 実験条件

CFS で補強した RC 部材のひび割れ性状に影響を及ぼすと考えられる鉄筋量と CFS 量を実験条件として選んだ、8 体の CFS 補強 RC 部材の一軸引張試験を行った。実験供試体の諸元を表-1 に示す。

Table-1 Specimen

Specimens	fc (MPa)	ps (%)	pCFS (%)
specimen1	27.2	0.89	0.00
specimen2	30.7	0.89	0.12
specimen3	30.7	0.89	0.23
specimen4	32.8	0.89	0.35
specimen5	29.0	1.26	0.00
specimen6	30.6	1.26	0.12
specimen7	32.2	1.26	0.23
specimen8	30.9	0.50	0.07

2.2 使用材料

補強材として使用した CFS は、高強度カーボン(FORCA トゥシート FTS-C1-20)である。CFS の力学的特性を表-2 に示す。

fc: Compressive Strength $p_{CFS} = A_{CFS}/A_c$

ps: Reinforcement Ratio

Table-2 Mechanical properties of CFS

Type of CFS	
Nominal strength (MPa)	3840
Young's modulus (GPa)	230
Thickness (mm)	0.11
Breaking strain (%)	1.5

実験供試体を使用したコンクリートは、設計基準強度 29.4MPa、単位水量 160kgf/m³、水セメント比 51.5%、粗骨材の最大寸法 20mm、セメントには早強ポルラントセメントを使用した。テストピースには、直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体を使用し、養生条件は実験供試体と同様湿布養生である。コンクリートの圧縮強度を表-1 に示す。

鉄筋は、供試体 1 から 4 および 8 には D16(SD345)を、供試体 5 から 7 には D19(SD345)を使用した。鉄筋の力学的特性を表-3 に示す。

Table-3 Mechanical properties of steel bar

Type of steel	SD345.D16	SD345.D19
Gross sectional area (mm ²)	198.6	286.5
Diameter (mm)	15.9	19.1
Young's modulus (GPa)	170	172
Yield strength (MPa)	390	395
Yield strain (%)	0.23	0.24
Strain when strain hardening starts (%)	2.37	1.4
Stiffness after strain hardening starts (GPa)	2.4	4

Uniaxial Tension Test of RC Members Retrofitted with Carbon Fiber Sheet
 by Ryuichi Yamaguchi, Kazuteru Shouji, Tamon Ueda, Yosio Kakuta

2.3 実験供試体

実験供試体には、コンクリート角柱の中央に鉄筋を一本埋め込んだものである。供試体 2 から 4, 6 から 8 は、コンクリート角柱の両側面に CFS を貼り付けた。本研究ではひび割れ間でのひずみを測定するため検長 5mm のワイヤーストレインゲージを鉄筋に 62 点、CFS に 57 点貼付した。また、初期ひび割れの位置を明確にし、また、できるだけ多くのひび割れが入るようにノッチを供試体中央部に付けた。供試体両端での鉄筋の降伏を防ぐため、コンクリートからの突出部に D 25 の鉄筋を使用した。D 25 と D 16 もしくは D19 の接合部には、それぞれをねじ切りした上で溶接を施し、引張補強筋とスターラップを配置した。また、供試体端部での CFS の剥離を防ぐため鋼板とボルトにより機械的に定着した。断面の大きさは、供試体 1 から 7 は 150mm × 150mm とし、供試体 8 は 200mm × 200mm とした。また、ひび割れ幅を測定するために供試体上面にコンタクトチップを供試体 1 は 100mm 間隔、供試体 2, 3 は計測区間 400mm と 800mm の所のみ、また、供試体 4 から 8 は 60mm 間隔で接着し、ひび割れを挟むチップ間の変位をコンタクトゲージにより測定した。例として図-1 に供試体 7 の実験供試体図を示す。

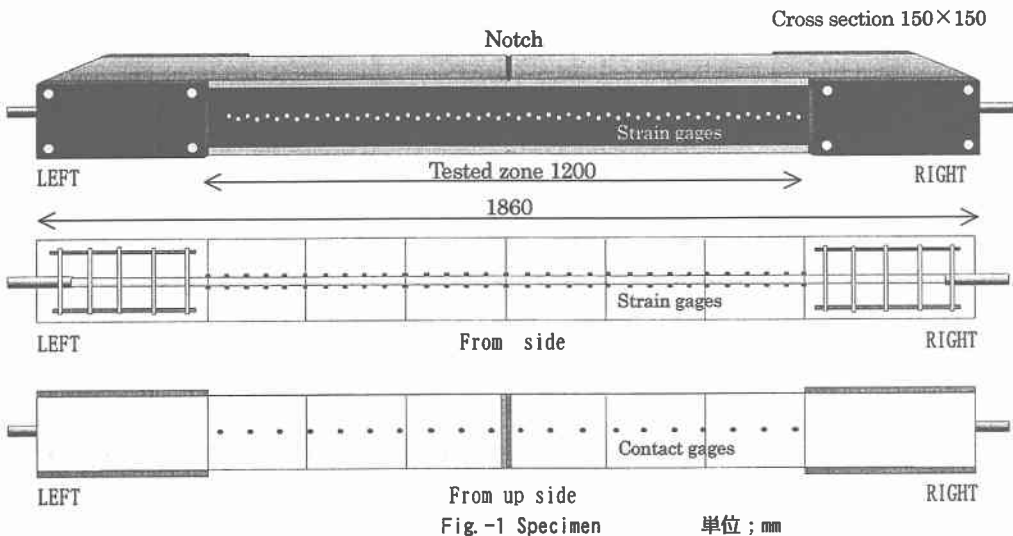


Fig. -1 Specimen

単位 ; mm

2.4 実験方法

載荷方法は、載荷フレームの中に実験供試体を水平に設置し引張力を加えるものである。供試体から突出両端の鉄筋にヒンジを介し、一端を固定、他端をセンターホールジャッキによって引張力を加える。ヒンジは実験時の偏心を防ぐために、横方向のヒンジとして用いた。供試体底面には、摩擦を防ぐためのローラーを介した。載荷中には、鉄筋と CFS のひずみ、引張荷重、さらに供試体上面にあるコンタクトゲージでひび割れ幅を測定した。また、実験終了後、ひび割れ間隔を測定した。ひび割れ間隔については、供試体上面と両側面から複数測定し、それらを平均する方法を用いた。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ性状

供試体 1 から 4 までの供試体上面から見たひび割れ性状を図-2 に、供試体 5 から 7 までのひび割れ性状を図-3 に、供試体 8 のひび割れ性状を図 4 に示す。CFS で補強した供試体 2, 3, 4, 6 および 7 については供試体が測定区間以外の部分で破壊した。供試体 8 は、計測区間の鉄筋が降伏し、その後ひずみ硬化を開始する直前で計測区間 300mm 付近のシートが破断したため実験を終了した。図-2 から補強量が増えると、ひび割れの

分散性が良くなってくことが明らかである。供試体 3 については、端部の鉄筋が破断したため図の様にひび割れの分散性がよくない。供試体 7 についても同様である。供試体 8 については、補強量が少ないためかひび割れの分散性はそれほど良いとは言えない。

また、CFS で補強した供試体では、側面から貫通ひび割れに向けて斜めにひび割れが入っている。これは無補強の供試体には見られない。これは、CFS の付着力により発生するせん断ひび割れである。

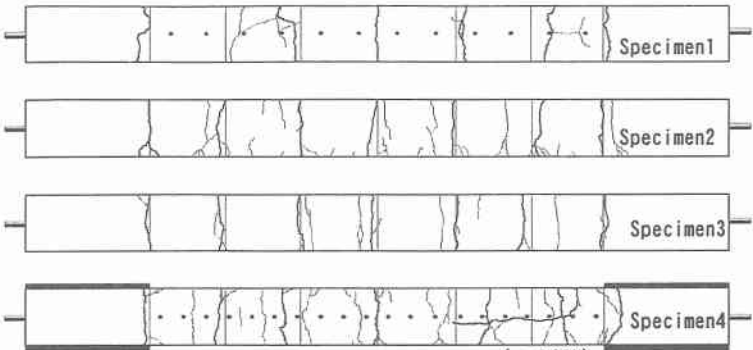


Fig-2 Crack pattern in specimen ($p_s=0.89\%$)

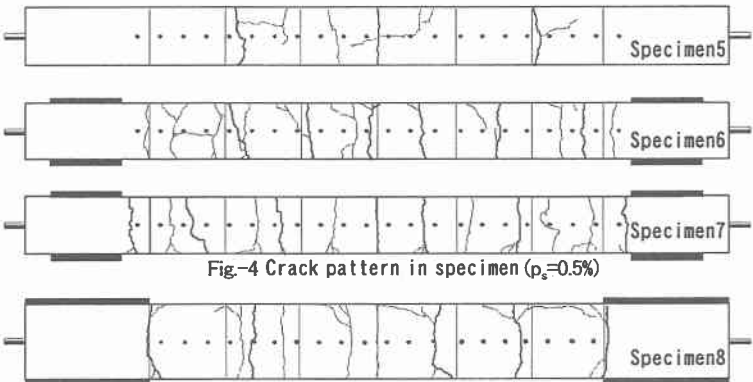


Fig-3 Crack pattern in specimen ($p_s=1.27\%$)

3.3 ひび割れ間隔

図-5 に鉄筋比が 0.89 % である供試体 1 から 4 の平均ひずみと最大ひび割れ間隔との関係を、図-6 に鉄筋比が 1.27 % である供試体 5 から 7 の平均ひずみと最大ひび割れ間隔関係との関係を、図-7 に鉄筋比が 0.5 % である供試体 8 の平均ひずみと最大ひび割れ間隔との関係を示す。

供試体 1 と 5 は、CFS により補強されていないものである。その最大ひび割れ間隔は、それぞれ 430mm、413mm であり、既往の推定式(角田式¹⁾)による値($L_{max}=5.4t=405\text{mm}$ 、 t はかぶり)とほぼ一致している。

図-5, 6 から無補強の供試体と補強した供試体とでは明らかに定常ひび割れ間隔(もうそれ以上ひび割れ間

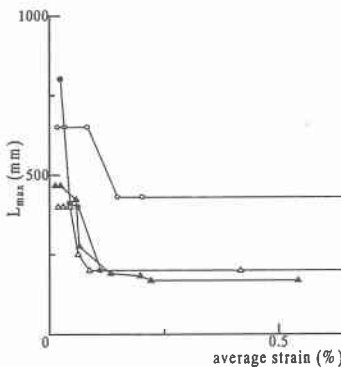


Fig. -5 Maximum crack spacing in Specimens with $p_s=0.89\%$

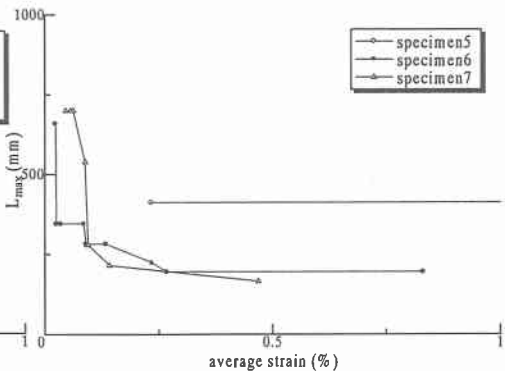


Fig. -6 Maximum crack spacing in Specimens with $p_s=1.27\%$

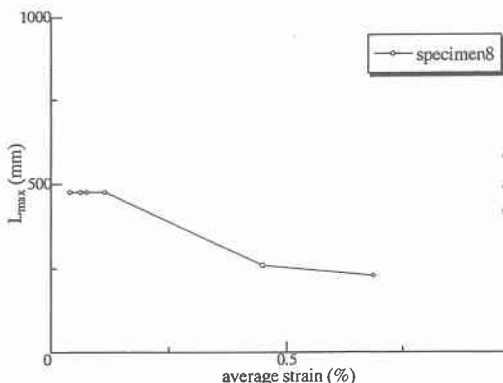


Fig. -7 Maximum crack spacing in Specimens with $p_s=0.5\%$

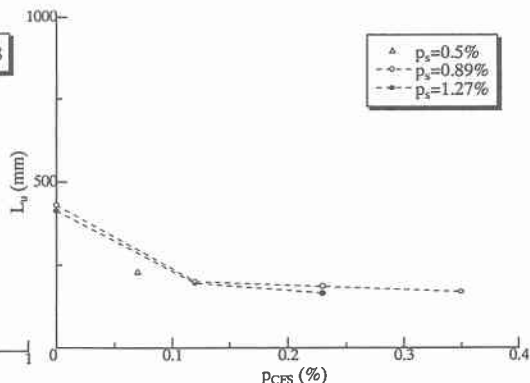


Fig. -8 p_{CFS} - L_u relationship

隔が減少しない状態になった時のひび割れ間隔の最大値を「定常ひび割れ間隔 ; L_u 」とここでは呼ぶことにする。)が異なっていることが見て取れる。これは、CFS を補強することで CFS の付着力によりコンクリートに生ずる引張力が増加したことによる。また、図-8 に CFS の補強量 p_{CFS} と定常ひび割れ間隔との関係を示す。図-8 を見る限り補強量が増すごとに定常ひび割れ間隔 ; L_u は減少している。また鉄筋比が L_u に与える影響は本研究ではあまり見られない。

実験終了時の平均ひび割れ間隔 L_{ave} と p_{CFS} との関係を図-9 に示す。この図より補強量が多いほど L_{ave} は小さくなることが分かる。これは、補強量が多いほど付着力が増加しコンクリートに導入される引張応力が増すことによるものと思われる。

また、実験終了時の平均ひび割れ間隔 L_{ave} は、鉄筋比が大きいほど小さくなるという傾向を示した。

鉄筋比 0.5% には原因は分からないがひび割れがうまく入らなかった。そのため鉄筋比が本研究では最も小さいが L_{ave} は大きくなっていない。また、鉄筋比 0.89% と鉄筋比 1.27% の供試体については

断面が 150mm×150mm で共通であるのに対し、鉄筋比 0.5% の供試体については断面が 200mm×200mm でありかぶりの違いがある。ここでは鉄筋比 0.5% の供試体は 1 体しかしていないため検討の対象からはずして話を進めた。また、前述の通り供試体 7 (鉄筋比 1.27%, p_{CFS} 0.23%) は供試体両端のねじ切り溶接した部分での鉄筋が実験中に壊れてしまったため図-9 のように L_{ave} が鉄筋比から推測されるのよりも小さくなっている。

以上の結果から補強量が定常ひび割れ間隔と実験終了時の平均ひび割れ間隔に与える影響として補強量が多ければ多いほど減少するという結果が得られた。しかし、本研究では鉄筋比の定常ひび割れ間隔 (最大ひび割れ間隔) に与える影響はさほどなく、実験終了時の平均ひび割れ間隔には影響があるという結果になっており、これらの結果を解明するために、今後さらに検討を行う必要がある。

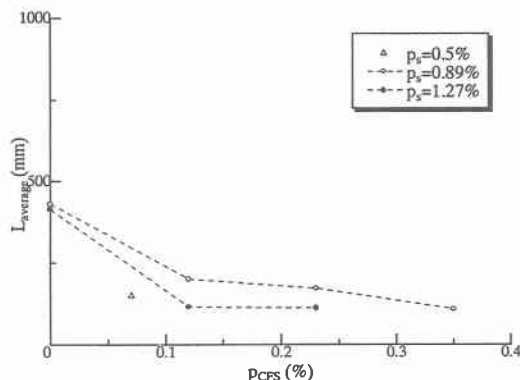


Fig. -9 p_{CFS} - L_{ave} relationship at end of test

3.4 ひび割れ幅

図-10 に鉄筋比 0.89% の供試体の平均ひずみと最大ひび割れ幅との関係を、図-11 に鉄筋比 1.27% の供試体の平均ひずみと最大ひび割れ幅との関係を、図-12 に鉄筋比 0.5% の供試体の平均ひずみと最大ひび割れ

幅との関係を示す。

グラフ中の破線は角田式¹⁾による値（計算値）を示している。供試体1については実験中に偏心があったと思われる、コンタクトチップを貼り付けている供試体上側でひび割れが先行してしまった。しかし最後のひび割れ幅計測の時に下側にひび割れが入ったため貫通し、計算値に近い値になったものと思われる。供試体8は原因不明であるがひび割れがうまく入らず、実験途中まで貫通ひび割れは一本も入らなかった。しかし、平均ひずみが0.1%を超えたところに入ったひび割れの内一本だけひび割れが貫通した。そのひび割れ幅を図-12に示している。

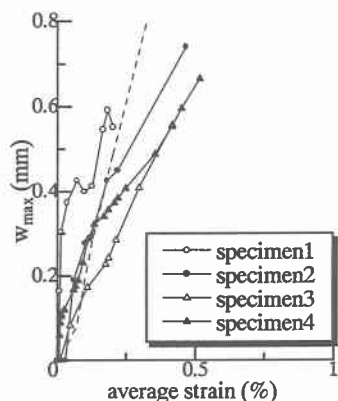


Fig. -10 Average strain-maximum crack width relationship in specimen with $p_s=0.89\%$

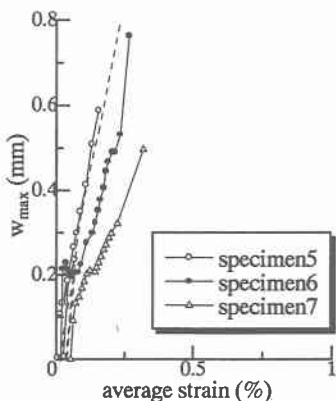


Fig. -11 Average strain-maximum crack width relationship in specimen with $p_s=1.27\%$

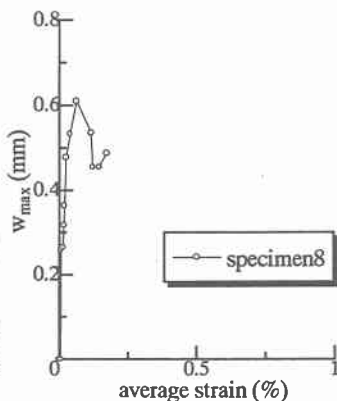


Fig. -12 Average strain-maximum crack width relationship in specimen with $p_s=0.5\%$

図-11をみると w_{max} は補強量が多いほど明らかに小さい。しかし、図-11の供試体3と供試体4では途中でその関係が逆転し、その後両者のひび割れは一致した。

また、著者はひび割れ幅の平均値 w_{ave} と平均ひずみの関係を調べたが、 w_{max} と平均ひずみ関係とほとんど同様の関係が見られたが w_{ave} と平均ひずみ関係での供試体3と供試体4の w_{ave} は、途中で w_{max} と平均ひずみ関係と同様に逆転していたが、平均ひずみが0.3%付近で供試体4の w_{ave} が供試体3の w_{ave} より小さくなった。

しかし、角田式ではひび割れ幅の最大値 w_{max} は定常ひび割れ間隔の最大値 L_{max} の影響があるため、図-10, 11, 12のように平均ひずみと最大ひび割れ幅の関係ではひび割れの分散性による影響を考慮できていない。つまり、分散性が良いためにひび割れ幅が小さくなっているのかの判断ができない。そこで、ひび割れ幅の最大値 w_{max} をその平均ひずみでのひび割れ間隔の最大値 L_{max} で除した値 w_{max}/L_{max} と平均ひずみとの関係を図-13, 14, 15に示す。これらの図から鉄筋比とCFSの補強量が w_{max}/L_{max} に及ぼす影響は読み取れないという結果が得られた。

また、本研究の目的は平均ひずみと w_{max}/L_u との関係を実験的に考察することである。しかし、CFSで補強された供試体の定常ひび割れ間隔に至ってからのひび割れ幅の最大値を本研究では得ることがほとんどできなかった。これは、コンタクトゲージによるひび割れ幅の計測は、危険防止のため平均ひずみが0.3%を超えたあたりで中止するためである。よって、今後、ひび割れ幅の計測手法を変える等の検討が必要である。

しかし、非常に数は少ないが、定常ひび割れ間隔に至ってからのひび割れ幅の最大値のデータをとることができた。供試体6と供試体7では大きな差がでてきている。これは鉄筋比が一定でCFSの補強量が多いと単位ひび割れ間隔あたりのひび割れ幅が抑えられると考えることもできる。しかし鉄筋比0.89%のグラフではそのような結果はでていない。次にCFSの補強量が一定のときの鉄筋比が及ぼす影響であるが、供試体2と供試体6では平均ひずみが0.2%付近では近いものの徐々に差がでていった。また、供試体3と供試体7は同

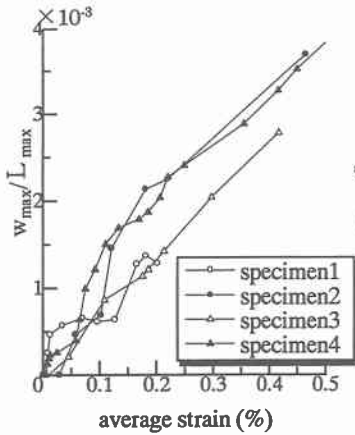


Fig. -13 average strain $-w_{\max}/L_{\max}$ relationship ($p_i=0.89\%$)

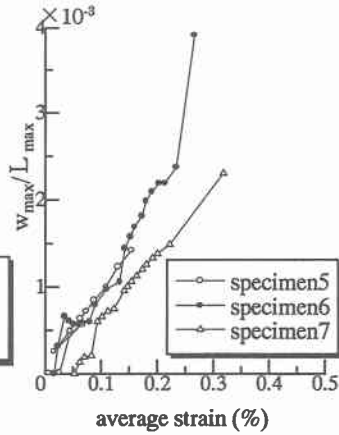


Fig. -14 average strain $-w_{\max}/L_{\max}$ relationship ($p_i=1.27\%$)

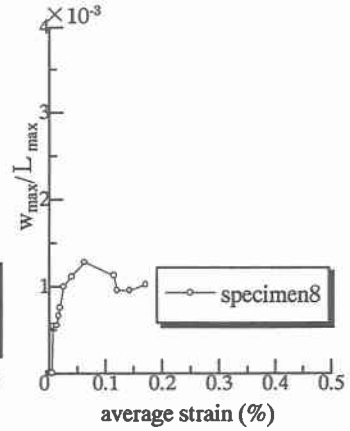


Fig. -15 average strain $-w_{\max}/L_{\max}$ relationship ($p_i=0.5\%$)

様な値を示した。

本研究ではデータ数が少ないためこれらの結果から平均ひずみ $-w_{\max}/L_i$ 関係を考察するには難しく、今後さらに検討を進める必要がある。

4. 結論

本研究でえられた結論を次に述べる。

- (1) CFS で補強した供試体には無補強の供試体にはみられないシートの付着力によるせん断ひび割れが発生する。
- (2) CFS 補強量が補強量が多いほど定常ひび割れ間隔と実験終了時の平均ひび割れ間隔は減少する。
- (3) 鉄筋比が実験終了時の平均ひび割れ間隔に与える影響は鉄筋比が大きいほどひび割れ間隔は小さくなる。
- (4) CFS 補強量が多いほど最大ひび割れ幅は小さくなる。
- (5) 鉄筋比が大きいほど最大ひび割れ幅は小さくなる。
- (6) CFS の補強量と鉄筋比がひびわれ幅の最大値 $w_{\max}$ をその平均ひずみでのひびわれ間隔の最大値 $L_{\max}$ で除した値 $w_{\max}/L_{\max}$ に与える影響はさほどない。

参考文献

- 1) 角田典史雄：鉄筋コンクリート最大ひびわれ幅, コンクリート・ジャーナル, Vol. 8, NO. 9, Sept. 1970