

論文

[2055] RC はりの曲げ破壊における変形の局所化と寸法効果

水町 実*1・岩瀬裕之*2・六郷恵哲*3・小柳 洽*4

1. はじめに

近年コンクリート工学の分野では、大型の構造物が建設されるとともに新しい材料が積極的に使用されるようになったことも背景となって、コンクリート部材の強度ならびに変形性状の寸法依存性や、破壊の安定性、変形の局所化（変形が局部的に集中する現象）等の破壊現象に関する関心が高まっている[1]。構造物や部材の寸法が大きくなっても耐力や変形性状は必ずしも寸法に比例せず、耐力を寸法で規準化した値（例えば単位面積当たりの力で表される強度）や変形性状を寸法で規準化した値が低下する場合があるが、ここではこれを寸法効果とよぶ。

本研究においては、曲げを受けるRCはりを対象とし、降伏後の変形性状に及ぼす供試体寸法、圧縮鉄筋量、モーメントスパン内のスターラップの存在等の影響について実験的に検討した。たわみ分布の計測結果をもとに、モーメントスパン内における変形の局所化についても検討した。

2. 実験概要

(1) 供試体

実験は、主に寸法の影響に着目したAシリーズと、主に変形の局所化に注目したBシリーズからなる。両シリーズの供試体の配筋等の特徴を図-1に示し、寸法や鉄筋量等の試験条件を表-1に示す。Aシリーズでは、はりの有効高さを15.4、30.8、46.2cmの3種類とし、単鉄筋断面($p=0.82\%$)または複鉄筋断面($p=0.82\%$, $p'=0.46\%$)とした。Bシリーズでは、有効高さは一定(30.8cm)とし、圧縮鉄筋量を変化させた($p'=0, 0.10, 0.23, 0.41\%$)。両シリーズとも引張鉄筋比は一定とした($p=0.82\%$)。せん断スパンならびにモーメントスパンをいずれも有効高さのほぼ3倍とし、3等分点載荷とした。せん断スパンには、せん断破壊を生じないようにはり高さの1/2間隔でスター

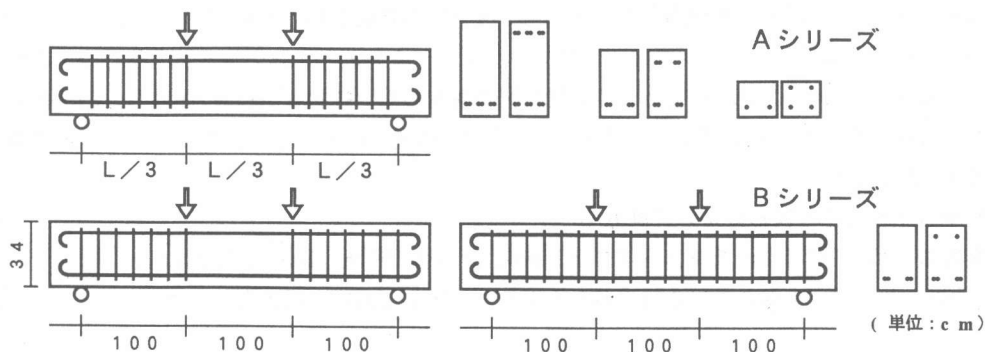


図-1 供試体

- * 1 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- * 2 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
- * 3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)
- * 4 岐阜大学教授 工学部土木工学科、工博 (正会員)

表-1 試験条件

シリーズ と 供試体名	供試体寸法 幅×高さ×長さ (cm)	載荷 スパン L (cm)	有効 高さ d (cm)	引張鉄筋量		圧縮鉄筋量		モーメント スパンの スターラップ の有無	
				量	比 (%)	量	比 (%)		
A シ リ ー ズ	A-S18	20×18×180	150	15.4	2D13	0.82	—	—	無
	A-S34	20×34×330	300	30.8	4D13	0.82	—	—	無
	A-S49	20×49×480	450	46.2	6D13	0.82	—	—	無
	A-D18	20×18×180	150	15.4	2D13	0.82	2D10	0.46	無
	A-D34	20×34×330	300	30.8	4D13	0.82	4D10	0.46	無
	A-D49	20×49×480	450	46.2	6D13	0.82	6D10	0.46	無
B シ リ ー ズ	B-S0	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	—	—	無
	B-S0S	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	—	—	有
	B-D6	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	2D6	0.10	無
	B-D6S	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	2D6	0.10	有
	B-D10	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	2D10	0.23	無
	B-D10S	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	2D10	0.23	有
	B-D13	20×34×360	300	30.8	4D13	0.82	2D13	0.41	無

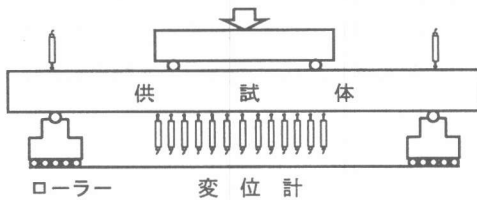


図-2 載荷試験

表-2 コンクリート強度

シ リ ー ズ	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂引張強度 (kgf/cm ²)	曲げ強度 (kgf/cm ²)
A	326	25.8	38.7
B	275	26.0	42.9

ラップを配置した。Bシリーズでは、圧縮域のコンクリートを拘束することを目的として、モーメントスパンにもスターラップを配置したはりと そうでないはりとを作製した。Aシリーズの有効高さが最も小さいはり(A-S18, A-D18)は各2体とし、その他の条件のはりは1体ずつとした。

(2) 使用材料

引張鉄筋には、D13の異形鉄筋($f_y=3440\text{kgf/cm}^2$, $f_u=4810\text{kgf/cm}^2$)を使用した。圧縮鉄筋には、D13に加え、D10($f_y=3980\text{kgf/cm}^2$, $f_u=5560\text{kgf/cm}^2$)、D6($f_y=4290\text{kgf/cm}^2$, $f_u=5700\text{kgf/cm}^2$)の異形鉄筋(いずれもSD295)を使用した。スターラップは閉合型とし、D13、D10、D6の異形鉄筋を供試体寸法に応じて用いた。コンクリートには、レディーミクストコンクリート(呼び強度255、粗骨材の最大寸法15mm、スランプ8cm、空気量4%)を使用した。打設後2日目に脱型し、載荷試験前日まで湿布養生した。載荷試験は、材令27日から33日の間に行った。コンクリートの強度試験結果を表-2に示す。

(3) 載荷試験方法と変形分布の計測方法

載荷方法を図-2に示す。Aシリーズでは、載荷スパンを50cm、100cm、150cmとし、Bシリーズでは100cmとした。支点における軸方向の拘束を取り除くために、両支点ともローラー支持とした。

モーメントスパン内の供試体上面中央にはり軸に沿ってひずみゲージ(30mm)を貼付し圧縮縁のひずみの分布を測定した。Bシリーズでは、モーメントスパン内における変形分布を計測するために、図-2に示すようにモーメントスパンの10等分点およびモーメントスパン外の2点でたわみを計測した。実験より求めたたわみ分布を6次曲線で多項式近似し、その曲線の曲率としてモーメントスパン内のはり下面位置での曲率分布を求めた。

表-3 試験結果

シリーズと供試体名	ひびわれ荷重 P_c (tonf)	降伏荷重 P_y (tonf)	最大荷重 P_u (tonf)	最大変位 δ_{max} (mm)	荷重比 P_u/P_y	部材変形能 δ_{max}/L	
Aシリーズ	A-S18	1.37	5.00	5.68	55.9	1.14	0.0372
	A-S34	2.95	10.3	10.8	58.1	1.05	0.0194
	A-S49	4.07	14.8	15.4	68.1	1.04	0.0151
	A-D18	1.58	5.04	5.57	87.7	1.11	0.0584
	A-D34	3.03	10.0	11.3	142	1.13	0.0472
	A-D49	4.32	15.4	17.7	217	1.15	0.0482
Bシリーズ	B-S0	3.45	10.0	10.2	61.1	1.02	0.0204
	B-S0S	3.61	10.3	10.4	121	1.01	0.0403
	B-D6	3.68	10.3	10.6	57.3	1.03	0.0191
	B-D6S	3.06	10.6	10.8	132	1.02	0.0440
	B-D10	3.92	10.3	10.6	62.6	1.03	0.0209
	B-D10S	3.10	10.0	10.8	136	1.08	0.0453
	B-D13	3.65	10.5	10.9	118	1.04	0.0393

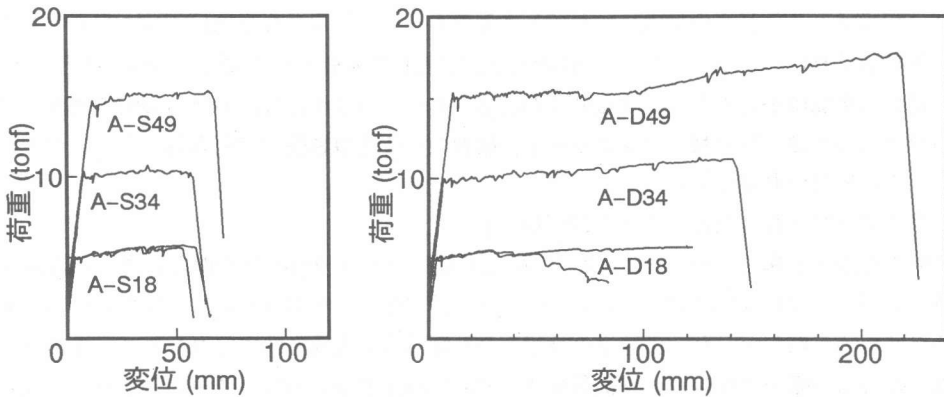


図-3 Aシリーズのはりの荷重-変位曲線

3. Aシリーズの結果と考察

(1) 各種荷重

各はりのひびわれ荷重（荷重-変位曲線の勾配が急変する時の荷重）、降伏荷重、最大荷重（いずれも自重の影響を補正）を表-3に示す。はり幅と鉄筋比を一定として、有効高さ、載荷スパン、鉄筋量を2、3倍としたAシリーズのはりでは、降伏荷重や最大荷重もほぼ2、3倍となり、

寸法効果は認められなかった。なお、寸法の小さい単鉄筋はり(A-S18)の最大荷重と降伏荷重の比(P_u/P_y)は、寸法の大きい単鉄筋はりに比べ1割程度大きくなった。

(2) 荷重-変位曲線と部材変形能

Aシリーズのはりの荷重-変位曲線を図-3に示す。最大荷重以降に圧縮域コンクリートの剥落

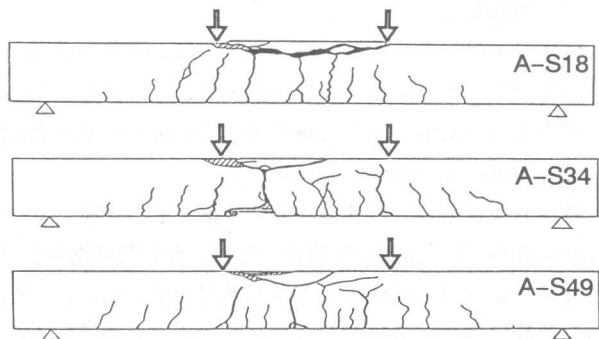


図-4 Aシリーズのはりのひび割れ図の例

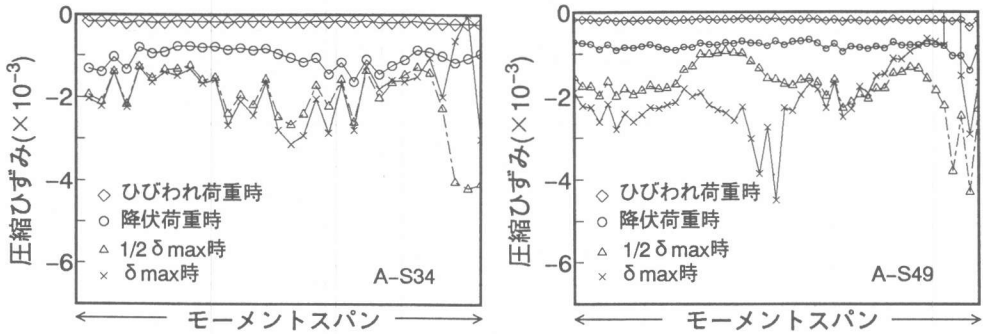


図-5 Aシリーズのはりの圧縮縁のひずみ分布の例

等により荷重の急激な低下が認められる時の変位を最大変位 δ_{max} とし、また最大変位 δ_{max} を載荷スパン L で除した値を部材変形能として、それぞれ表-3 に示す。複鉄筋はり (A-Dシリーズ、 $p'/p=0.56$) では、有効高さの増大につれて最大変位も増大し、部材変形能はほぼ一定となった。一方、単鉄筋はり (A-Sシリーズ) では、有効高さが増大しても最大変位は $55\sim 70\text{mm}$ とほとんど増大せず、部材変形能は小さくなり、寸法効果が認められた。単鉄筋はりにおける部材変形能の寸法効果の原因としては、圧縮域のコンクリートの破壊の局所化の影響が考えられるが、この点についてはさらに検討が必要である。

(3) はりのひびわれ性状と圧縮縁のひずみ分布

最終的なひびわれ図と モーメントスパンの圧縮縁のひずみ分布の計測例として、単鉄筋はり (A-S18、A-S34、A-S49) のものを図-4、5 に示す。供試体の寸法が増大してもひびわれ図に顕著な差異は認められなかった。圧縮縁のひずみの計測値は、大変形時にはコンクリートの浮き上がり等のために信頼できないが、降伏荷重時までの圧縮縁のひずみは比較的均一な分布となった。

4. Bシリーズの結果と考察

(1) 各種荷重

各はりのひびわれ荷重、降伏荷重、最大荷重を表-3 に示す。モーメントスパンにもスターラップを配置してコンクリートを拘束することにより、また圧縮鉄筋量を増加させることにより、降伏荷重も最大荷重もともに極く僅かではあるが増加する傾向にあった。

(2) 荷重-変位曲線と部材変形能

Bシリーズのはりの荷重-変位曲線を太い実線で図-6 に示す。最大変位 δ_{max} と部材変形能 δ_{max}/L を表-3 に示す。圧縮鉄筋量が少ない複鉄筋はり (この実験では $p'=0.23\%$ 以下) では、最大変位は単鉄筋はりに比べほとんど増加していないが、圧縮鉄筋量が多いはり (B-D13) では最大変位は単鉄筋はりの約2倍となった。モーメントスパンにスターラップを配置しコンクリートを拘束することによって、最大変位はスターラップの無い単鉄筋はり (B-S0) の2倍あるいはそれ以上に増加した。

(3) モーメントスパンの曲率分布

モーメントスパンの曲率分布の計測例として、供試体 B-S0、B-D10、B-D10S、B-D13の結果を図-7 に示す。モーメントスパンのたわみ分布から曲率を求める方法により、大変形領域にいたるまで、破壊の局所化の様子を簡便に検出することができた。圧縮鉄筋を多く配置したり (B-D13)、モ

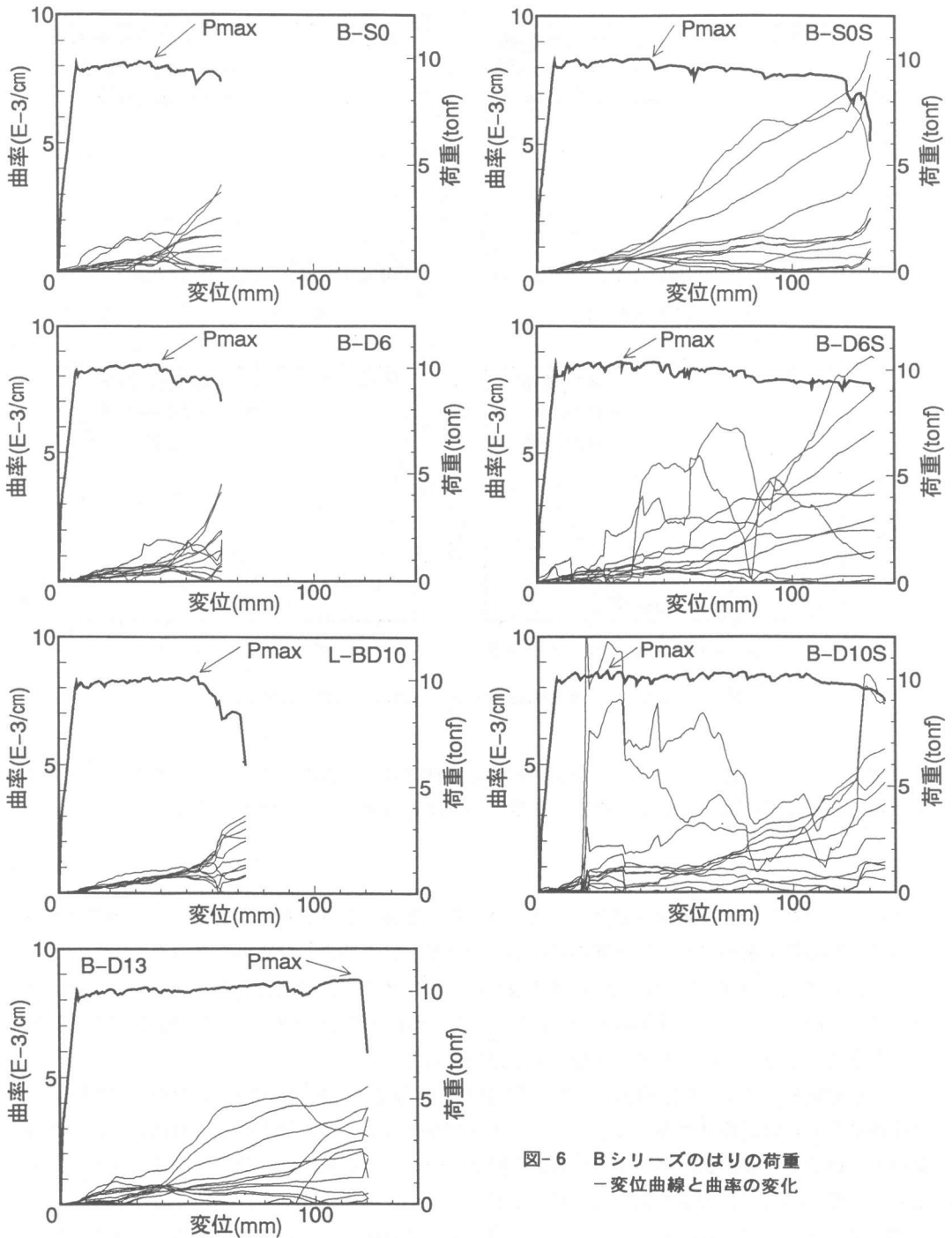


図-6 Bシリーズのはりの荷重
-変位曲線と曲率の変化

一メントスパンにスターラップを配置することによって、最大変位時の曲率が大きくなった。この実験で用いた曲率分布は、はり下面のたわみ分布から求めたものであり、曲率が大きいことは主にその部分での曲げひびわれが大きく成長したことに対応していると考えられる。

はりの変位の増大にともなう各変位計測点の曲率の変化の様子(細い実線)を、図-6に荷重-

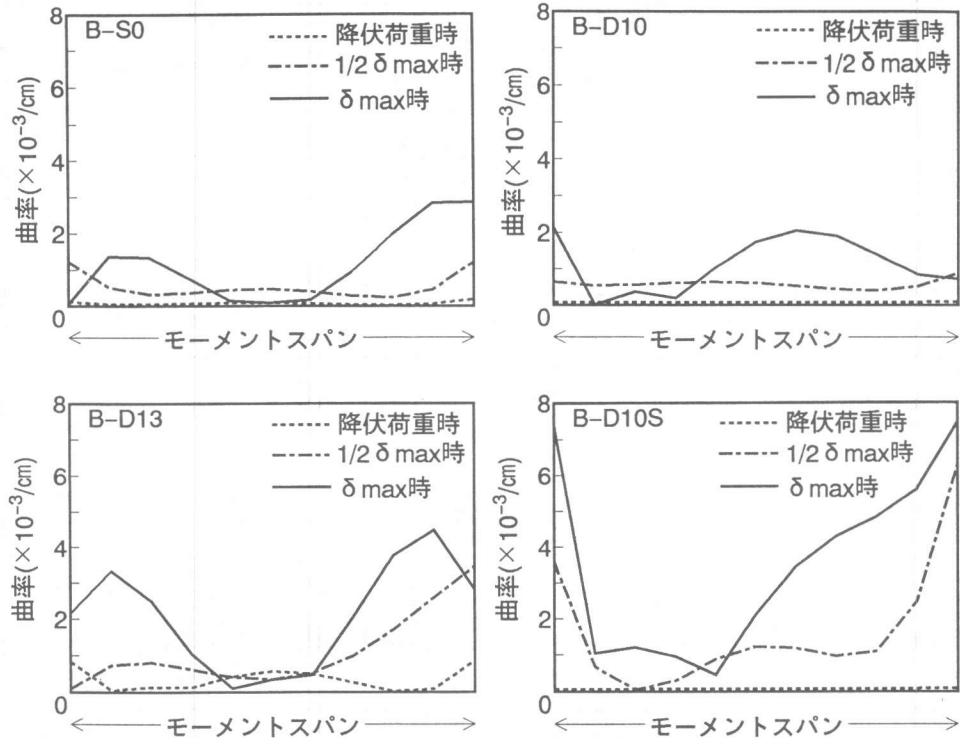


図-7 Bシリーズのはりのモーメントスパン内の曲率分布の例

変位曲線とともに併記する。各変位計測点における曲率は、最大荷重点以降、急激に増大するものがみられ、変形の局所化が最大荷重点以降に顕著になっていることがわかる。

5. まとめ

RCはり降伏後の変形状態に及ぼす供試体寸法、圧縮鉄筋量、モーメントスパン内のスターラップの存在等の影響について実験的に検討した結果、以下のことが明かとなった。

(1) Aシリーズのはりでは、降伏荷重や最大荷重には寸法効果は認められなかった。一方、部材変形能(δ_{max}/L)は、複鉄筋はり($p'/p=0.56$)ではほぼ一定となったが、単鉄筋はりではより高さが大きくなるほど小さくなり、寸法効果が認められた。

(2) 圧縮鉄筋比が0.23%以下のBシリーズの複鉄筋はりでは、降伏後の最大変位量は増大せず、単鉄筋はりと同程度であった。モーメントスパンにスターラップを配置した場合には、複鉄筋はりだけでなく単鉄筋はりの場合でも、圧縮域コンクリートをスターラップが拘束する効果により、この実験では最大変位量は約2倍に増加した。

(3) モーメントスパンのたわみ分布から曲率を求める方法により、変形の局所化の様子を検出した結果、局所化は、最大荷重点以降に顕著になる傾向が認められた。

参考文献

- 1) 三橋博三・白井伸明・六郷恵哲：コンクリート構造への破壊力学の応用、コンクリート工学、Vol. 30、No. 6、pp. 5-17、1993. 6