論文 ディープビーム部材の寸法効果に関する実験的検討

梅本 洋平*1・幸左 賢二*2・小林 寛*3・西岡 勉*4

要旨: せん断スパン比(a/d)1.5 の RC ディープビーム部材におけるせん断耐力の寸法効果を評価するために,有効高さとせん断補強鉄筋比をパラメータとした実験を行った。その結果, a/d=1.5 のディープビームにおいては,せん断補強鉄筋の有無に関わらず大型供試体ほど見かけ上のせん断耐力が低下する寸法効果が確認された。ついで,ひび割れ状況および荷重-変位関係を用いてエネルギー吸収量を求め,小型供試体が相対的に吸収量が大きいことを明らかにした。

キーワード:ディープビーム,寸法効果,せん断補強鉄筋

1. はじめに

既往の研究において,Walravenら 1 はディープビーム(a/d=1.0)を対象に,有効高さd(以下,dと記す)を $160\sim930$ mm,せん断補強鉄筋比Pwを $0.00\sim0.30$ %と変化させた実験を行い,せん断補強鉄筋の有無に拘らず,大型供試体ほど相対的なせん断耐力が低下する寸法効果,およびひび割れの進展速度が早くなることを確認している。

一方,本研究では実構造物での照査例が多い a/d=1.5 程度における梁・柱部材を対象として,有 効高さを300mmから実大寸法である1400mmまで をパラメータとすることにより,ディープビーム 部材のせん断耐力に及ぼす寸法効果,およびせん 断補強鉄筋の効果を明らかにするための実験的な検討を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

表 - 1 に実験供試体の諸元を示す。表 - 1 に示すように本研究では,実構造物での照査例が多いa/d=1.5 に着目し,有効高さd(300~1400mm),せん断補強鉄筋比 Pw(0.0, 0.4, 0.8%)をパラメータとした計 19 体の供試体を作成した。

図 - 1 には配筋例および断面形状を示す。図

中の左側に Pw=0.0%, 右側に Pw=0.4, 0.8%の配筋状況を示している。配筋に用いた鋼材は全てSD345であり,主鉄筋に D19, D22, D25の異形鉄筋を, 圧縮鉄筋に D10, D16の異形鉄筋を, せん断補強鉄筋には閉合型の異形鉄筋を用いている。せん断補強鉄筋を配置しない Pw=0.0%のシリーズについては,鉛直方向のひずみ計測のため,せん断スパン内にダミー鉄筋(Pw=0.05%以下)を

表 - 1 供試体諸元

供試体No.	a/d	d (mm)	b (mm)	Pw (%)	Pt (%)	f'c (MPa)	r/d	Dmax (mm)
B-10.1	1.5	300	180	0.0	2.02	37.3	0.25	20
B-10.1R			180		2.02	42.3		
B-10		400	240		2.02	29.2		
B-10R			240		2.02	23.0		
B-10R2			240		2.02	37.3		
B-10.2		500	300		2.02	37.3		
B-10.2R			300		2.02	42.3		
B-10.3		600	360		2.11	37.8		
B-10.3R			360		2.11	31.2		
B-10.3R2			360		2.11	37.3		
B-13		800	480		2.07	31.6		
B-13R			480		2.07	24.0		
B-14	•	1000	600		1.99	31.0		
B-15		1200	720		1.99	27.0		
B-16		1400	840		2.05	27.3		
B-11		400	240	0.4	2.02	23.0		
B-17		1000	600		1.99	28.7		
B-18		1400	840		2.05	23.5		
B-12		400	240		2.02	31.3		

: 土木研究所における実験供試体

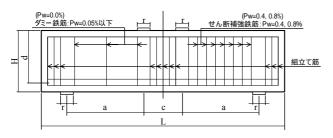
a/d:せん断スパン比, d:有効高さ, b:部材幅, Pw:せん断補強鉄筋比, Pt:主鉄筋比, fc:コンクリート圧縮強度, r/d:載荷板有効高さ比, Dmax: 最大骨材寸法

^{*1} 九州工業大学大学院 工学研究科建設社会工学専攻 (正会員)

^{*2} 九州工業大学 工学部建設社会工学科 Ph.D (正会員)

^{*3} 独立行政法人土木研究所 耐震研究グループ耐震チーム

^{*4} 阪神高速道路公団 工務部設計課 (正会員)



a) 配筋例

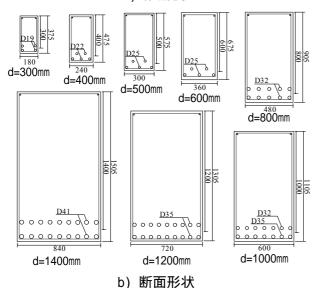


図 - 1 供試体

配置している。せん断補強鉄筋を配置した供試体は,B-11でD6鉄筋を65mm間隔,B-12でD10鉄筋を75mm間隔,B-17でD13鉄筋を100mm間隔,B-18でD19鉄筋を170mm間隔に配置している。また,載荷板間および支承板の外側での損傷および曲げ破壊を生じないように,供試体中央および端部に組立て筋を配置している。本実験では全ケースの断面形状は相似であり,主鉄筋比(約2.0%)と最大骨材寸法Dmax(20mm)は一定としている。また,載荷板幅および支承板幅rの影響がないように,r/dは0.25と一定としている。

2.2 載荷方法および計測項目

載荷は土木研究所の 30000kN 載荷試験機および, 九州工大の 2000kN 載荷試験機を用いて,2 点対称 載荷による静的な単調載荷とした。今回の実験では, 寸法効果による破壊性状の詳細な検討を行うため に,供試体変位(下面鉛直方向,水平,載荷板位置), 鉄筋ひずみ(主鉄筋,せん断補強鉄筋,ダミー鉄筋), アクリルひずみ,せん断変位,画像解析によるひ び割れ幅測定の5項目の計測を行った。

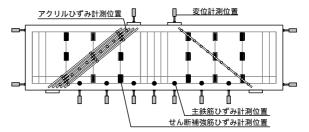


図 - 2 ひずみゲージ・変位計の配置例

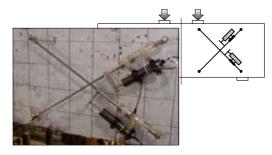


図 - 3 せん断変位計設置位置

図 - 2 にひずみゲージおよび変位計の設置例,図 - 3 にせん断変位計の設置状況,また図 - 4 に画像解析によるひび割れ幅の測定方法を示す。ひび割れ幅の計測にあたってはデジタルカメラ(600 万画素)を用いて,せん断スパン内の斜めひび割れを対象に載荷板,ストラット中央,支承板の3箇所で計測を行い,計測精度は0.02mmとした。計測した画像は,画像解析ソフトを用いて,予め供試体に記した50mm間隔のメッシュを基準に,ひび割れ幅の実寸法を算出した。なお,ひび割れ幅は,ひび割れが噛み合う2点の座標を画像解析ソフトにより求め,斜めひび割れと直交方向の2点間の距離をひび割れ幅とした。

3. 実験結果

3.1 耐力評価

表 - 2 には斜めひび割れ発生時および最大耐力の実験値,計算値の一覧を示す。ここで,計算値は著者らが提案している式(1)を用いて算出している²⁾。

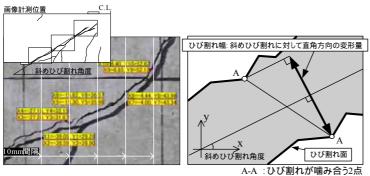


図 - 4 ひび割れ幅の計測方法

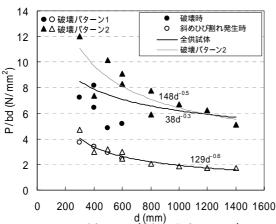


図 - 5 斜めひび割れ発生および 最大荷重の比較(Pw=0.0%)

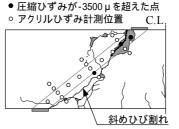
ここでは, t:主鉄筋比(%),d:有効高さ(mm), ck:コンクリートの圧縮強度(N/mm²),b:部材幅 (mm), Aw:せん断補強筋の断面積(mm²), sy: 鉄筋の降伏強度(N/mm²),z:d/1.15,s:せん断補強筋の配置間隔(mm)である。

図 - 5 には斜めひび割れ発生荷重および最大 荷重Pをbdで除した値(平均せん断応力: (N/mm²)) を示す。表より,計算値が実験値を精 度良く評価できているものと,過小評価してい るものが見られる。また,図より斜めひび割れ 発生荷重および最大荷重時において、大型供試 体ほど相対的なせん断耐力が低下する寸法効果 が認められるものの, 有効高さが 300~600mm の供試体において最終破壊耐力に差異が認めら れる。これは,図-6に示すように,最大荷重 時に2パターンの破壊が見られたことが原因と 考えられる3)。図に示すように,破壊パターン1 では、ストラット下面に沿って進展した斜めひ び割れが載荷板端部に貫通し,局所的に圧縮ひ ずみの進展が見られた。一方,破壊パターン2 では,進展した斜めひび割れとは異なるもう一

表 - 2 実験結果

	供試体No.	斜めひび割れ 発生(kN)	破壊時 (kN)	計算値 (kN)	実験値/ 計算値	破壊 パターン			
1.	B-10.1	200	390	381	1.02	1			
١.	B-10.1R	255	650	399	1.63	2			
	B-10	325	616	560	1.10	1			
٦.	B-10R	287	706	518	1.36	2			
١.	B-10R2	325	781	606	1.29	11			
١.	B-10.2	440	760	885	0.86	1			
	B-10.2R	480	1519	926	1.64	2			
_	B-10.3	650	1960	1218	1.61	2			
_	B-10.3R	528	1787	1142	1.57	2			
_	B-10.3R2	525	1125	1209	0.93	1			
_	B-13	-	2985	1842	1.62	-			
_	B-13R	800	2257	1680	1.34	2			
_	B-14	1100	4028	2618	1.54	2			
_	B-15	1500	5390	3390	1.59	2			
	B-16	2000	6019	4443	1.35	2			
	B-11	325	1025	802	1.28	1			
_	B-17	1600	5244	4261	1.23	2			
_	B-18	2400	8396	7001	1.20	11			
_	B-12	300	1550	952	1.63	1			

:土木研究所における実験供試体

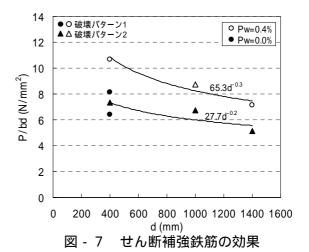


破壊時に入ったひび割れ C.L. 斜めひび割れ

a) 破壊パターン1

b) 破壊パターン2

図 - 6 破壊パターンの比較



本のひび割れがストラットに入り,このときアクリルによる圧縮ひずみの局所的な進展は見られなかった。全供試体を対象としても寸法効果が認められたが,特に,破壊パターン2に着目すると,より顕著に寸法効果が認められる。次に,図-7にはPw=0.0%と0.4%の最大耐力の

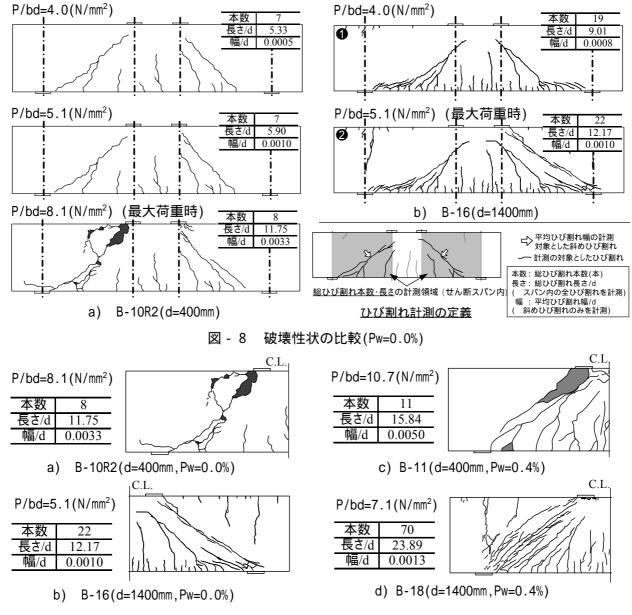


図 - 9 破壊性状の比較 (最大荷重時)

比較を平均せん断応力で示す。図より,Pw=0.4%においても近似曲線が d の-1/3 乗となることから,本実験ではせん断補強鉄筋の有無に拘らず,せん断耐力に同様の寸法効果が確認できる。

3.2 破壊性状

(1) Pw=0.0%の検討

図 - 8には, a) B-10R2, b) B-16のひび割れ状況を示す。図中にグレーで示すせん断スパン内の領域を対象として,ひび割れ本数,ひび割れ長さはせん断力により生じた全てのひび割れを計測しており,ひび割れ本数は下面から入った全てのひび割れを計測している。また,ひび割れ幅は矢印で示す斜めひび割れを対象に計測を

行った。なお,ひび割れ幅と長さについては,それぞれ寸法による影響を消去するためdで除して相対的な比較を行っている。例えば,同一荷重時(P/bd=5.1N/mm²)において,B-16とB-10R2の比較を行うと,ひび割れ形状は近似しているものの,平均ひび割れ幅/dはいずれも約0.001と同程度であるが,ひび割れ長さ/dは12.17,5.90,ひび割れ本数は22,7本とB-16の進展が早いことが分かる。その後,最大荷重時にはB-10R2は総ひび割れ長さ/dが11.75と大型供試体であるB-16の最大荷重時と同程度まで進展し,平均ひび割れ幅/dは約3倍程度の0.0033となった。以上より,ひび割れ長さは大型供試体が相対的に進展

が早く、ひび割れ幅に対しては小型供試体がよ り大きく開口することからも寸法効果を確認す ることができる。

(2) Pw=0.4%の検討

図 - 9には,最大荷重時における Pw=0.0%の a) B-10R2, b) B-16, および Pw=0.4%の c) B-11, d) B-18 のひび割れ状況を示す。図より , いずれに おいてもせん断補強鉄筋を配置することにより、 総ひび割れ本数 ,総ひび割れ長さ/d ,平均ひび割 れ幅/d の進展が見られたが,特に,大型供試体 においては本数と長さの進展が顕著に認められ た。

また,図-10 には最大荷重時における Pw に よる総ひび割れ長さ/d の比較を示すが, せん断 補強鉄筋を配置することにより、ひび割れ長さ の進展が認められ,これが図 - 7で示す耐力の 何里 増加に導くと考えられる。

4. 寸法効果に関する検討

4.1 荷重変位によるエネルギー吸収量

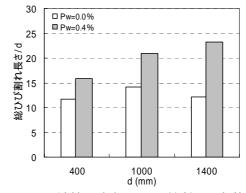
供試体のエネルギー吸収量を算出し, 寸法効 果の影響を検討する。なお、エネルギー吸収量 としては,最大荷重到達後,急激に荷重低下が 認められたことから最大荷重時までの荷重 - 変 位曲線下で囲まれる面積とした(図 - 11 参照)。 また,本実験では,全ての供試体がせん断破壊 により終局に至っていることから、せん断変形 量による寸法効果への影響も検討するため、全 体変形とせん断変形によるエネルギー吸収量の 比較を行った。せん断変位は, せん断変形により 生じる 2 本のせん断変位計の変位の差分を図 - 12 に示す式により、鉛直方向に角度補正することで 求めた。

図 - 13 には ,曲げスパン中央で計測した荷重 -変位関係,図-14には荷重-せん断変位関係を示 す。また,図-15には,図-13,14の荷重-変位 関係から求めたエネルギー吸収量の比較を示す。 図 - 15 に示すように, せん断変形によるエネルギ -吸収量は全体変形による吸収量の 1/2 程度であ ることが分かる。また,全体変形と同様にせん

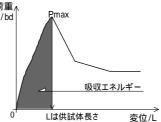
断変形においても-0.4 乗から-0.6 乗程度の寸法 効果が認められる。

4.2 ひび割れによる考察

ひび割れ発生量について , 以下に 2 種類の検 討を行う。ひとつ目は,ひび割れ発生に伴い, ひび割れ先端でエネルギーが局所的に消費され



鉄筋の有無による比較(最大荷重時) 図 - 10



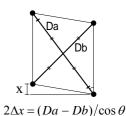
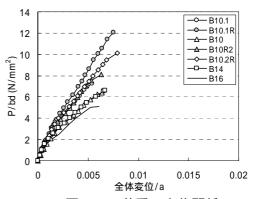


図 - 12 せん断変位算出法

 $\Delta x = (Da - Db)/\cos\theta/2$ 図 - 11 エネルギー 吸収量の定義



荷重 - 変位関係 図 - 13

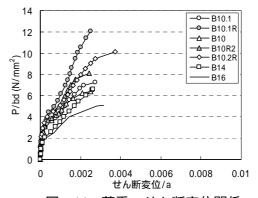


図 - 14 荷重 - せん断変位関係

ることに基づき⁴⁾, せん断スパン内における総ひび 割れ長さの進展状況の比較を図 - 16 に行った。図 より,同一荷重時において,供試体寸法が大きくな るほどひび割れ長さが長いことから,ひび割れの進 展が早く,また破壊に達するのも早いことが分かる。

二つ目は,斜めひび割れが開きながら耐力が 増加する現象が見られたことから,斜めひび割 れ幅 に斜めひび割れ長さ 1 を乗じたひび割れ 面積(・1)に着目して評価した。図 - 17 にその 検討結果を示す。図より、供試体寸法が小さく なるほど,供試体面積に対してひび割れ面積が 大きくなることが分かる。以上のように,ひび 割れ長さ、ひび割れ面積が増加することから、 a/d=1.5 程度のディープビーム部材には寸法効果 が存在すると考えられる。

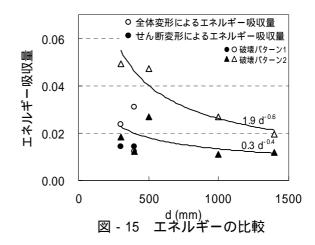
5. まとめ

本実験で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 有効高さ,せん断補強鉄筋比をパラメータ とした a/d=1.5 のディープビーム部材の実験 の結果, せん断耐力には寸法効果の影響が認 められた。
- (2) 寸法効果の原因を検討するために,ひび割 れ長さ、ひび割れ幅に着目した分析の結果、 ひび割れ長さは大型供試体が相対的に進展 が早く,ひび割れ幅に対しては小型供試体が より大きく開口することから,寸法効果を裏 付ける結果が得られた。
- (3) 同様に,エネルギー吸収量に着目した実験 を実施した結果,小型供試体ほどエネルギー 吸収量が増加することが明らかとなった。こ れは,小型供試体ほどひび割れ面積が相対的 に大きかったためと考えられる。

参考文献

- 1) J.Walraven 5, Size Effects in Short Beams Loaded in Shear, ACI Structural Journal, pp.585-593, Sept.-Oct. 1994
- 2) 里道喜義,幸左賢二,足立幸郎,鈴木直人, RC 梁部材のせん断耐力に及ぼすせん断スパ



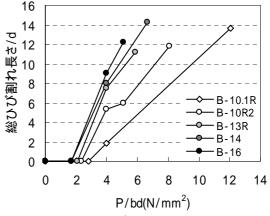
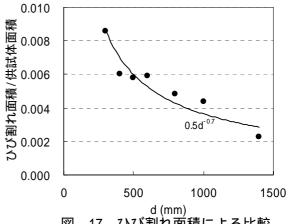


図 - 16 ひび割れ長さの進展状況



ひび割れ面積による比較 図 - 17

ン比 a/d の効果、コンクリート工学年次論文 集, Vol.24, No.2, pp.931~936, 2003

- 3) 脇山知美、幸左賢二、西岡勉、小林寛、ディ ープビームにおける破壊メカニズムを考慮 したせん断耐力式の提案、第8回地震時保有 耐力法に基づく橋梁構造の耐震設計に関す るシンポジウム, 2005
- 4) 中村成春、橘高義典ら、コンクリートの混合 モード破壊に関する破壊力学的検討、日本 建築学会構造系論文報告集, pp.1~9, 1996.2