

論文 端部拘束された RC ディープビームの終局耐力に及ぼす せん断補強鉄筋の効果

殿内秀希*¹・元 大淵*²・日野伸一*³・太田俊昭*⁴

要旨：せん断補強鉄筋を有する端部拘束されたRCディープビームに対して載荷実験を行い、(1)せん断耐力は a/d およびせん断補強鉄筋比が大きくなるほど現行の示方書による算定値を上回ること、(2)水平鉄筋のせん断耐力の増加に及ぼす影響は、特に a/d が小さい場合に顕著で、かつ鉛直鉄筋との併用が有効であること、(3)鉛直鉄筋は a/d が大きいほどせん断耐力を増加させ、その効果は鉄筋比に依存すること、(4)鉛直・水平鉄筋の併用は、 a/d が0.85以上において、ひび割れの分散性を大きく向上させることなどを明らかにした。

キーワード：RCディープビーム、せん断耐力、せん断補強鉄筋、端部拘束

1. はじめに

現行の土木学会コンクリート標準示方書[1]では、ディープビームの設計にあたって、腹部鉄筋の効果を定量的に十分解明できていないことから、せん断補強鉄筋を考慮しない耐力算定式が提案されており、安全側の配慮から鉛直および水平方向それぞれに、片面あたりコンクリート断面積の0.08%以上の用心鉄筋を配置するように規定されている。しかし、単純支持または2スパン連続のディープビームに対して、鉛直鉄筋の配置がはりのせん断耐力を増加させ、その効果は、スパンと高さの比(L/h)が大きくなるほど顕著であるとの報告もある[2, 3]。また、著者らは、端部拘束された鉛直鉄筋を用いないRCディープビームに対し、腹部に等間隔に配置された水平鉄筋のせん断耐力および破壊性状に及ぼす影響について検討し、せん断スパンと有効高さの比(a/d)が小さい場合にはせん断耐力の増加に効果があることを先に報告している[4]。

そこで本研究では前報に引き続き、端部拘束されたディープビームの終局耐力と破壊挙動に及ぼす鉛直・水平鉄筋の効果を明らかにすることを目的として、実験的研究を行ったものである。

2. 実験概要

供試体の諸元、材料特性、ひずみゲージ貼付位置などを表-1、図-1 ($a/d=0.85$ の場合)に示す。実験では、幅 $b=100\text{mm}$ 、有効高さ $d=560\text{mm}$ (全高 $h=600\text{mm}$)で、 $a/d=0.31$ 、 0.85 、 1.38 の3種類のはりに対して、水平方向と鉛直方向に 100mm 間隔で腹部鉄筋を配置し、それぞれの鉄筋比を変化させることによって、計12体を製作した。載荷実験は、両端部の拘束ブロックに初期鉛直荷重を加えて端部の変位を拘束した状態で、供試体部分のスパン中央点に破壊に至るまで静的に単調漸増載荷した[4]。

-
- * 1 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)
 - * 2 九州大学大学院 工学研究科土木工学専攻、工修 (正会員)
 - * 3 九州大学助教授 工学部建設都市工学科、工博 (正会員)
 - * 4 九州大学教授 工学部建設都市工学科、工博 (正会員)

表-1 供試体の諸元および材料特性

番号	L (mm)	a (mm)	a/d	コンクリート特性		鉄筋の種類			鉄筋の強度	
				f'_{ck}	f_t	上, 下部	水平 (ρ_s)	鉛直 (ρ_v)	種類	f_{sy}
ES16	600	175	0.31	35.2	2.83	2D13	8D6 (1.3%)	12D6 (1.3%)	D6	279
ES17				30.5	2.46	2D13	8D10 (2.9%)	12D6 (1.3%)	D10	330
ES18				31.2	2.38	2D16	8D6 (1.3%)	12D10 (2.9%)	D13	350
ES19				30.9	2.40	2D16	8D10 (2.9%)	12D10 (2.9%)	D16	345
ES26	1200	475	0.85	35.2	2.83	2D13	8D6 (1.3%)	24D6 (1.3%)	L: はりの長さ a: 純せん断スパン f'_{ck} : コンクリート圧縮強度 (N/mm^2) f_t : コンクリート引張強度 (N/mm^2) f_{sy} : 鉄筋降伏点応力度 (N/mm^2)	
ES27				30.5	2.46	2D13	8D10 (2.9%)	24D6 (1.3%)		
ES28				31.2	2.38	2D16	8D6 (1.3%)	24D10 (2.9%)		
ES29				30.9	2.40	2D16	8D10 (2.9%)	24D10 (2.9%)		
ES36	1800	775	1.38	35.2	2.83	2D13	8D6 (1.3%)	36D6 (1.3%)		
ES37				30.5	2.46	2D13	8D10 (2.9%)	36D6 (1.3%)		
ES38				31.2	2.38	2D16	8D6 (1.3%)	36D10 (2.9%)		
ES39				30.9	2.40	2D16	8D10 (2.9%)	36D10 (2.9%)		

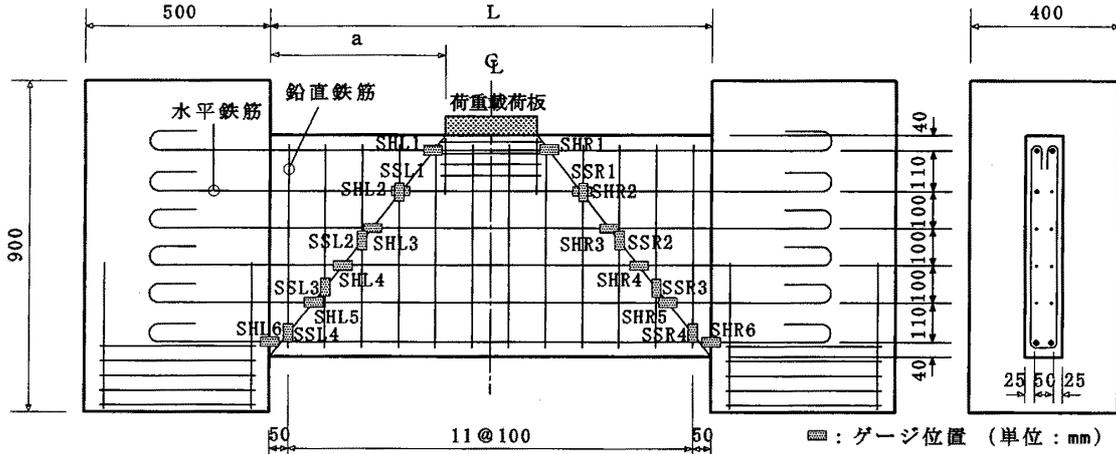


図-1 供試体の形状・寸法 (a/d=0.85の場合)

3. 実験結果および考察

3.1 破壊性状

図-2にスパン中央部における荷重-たわみ曲線を、図-3に終局時のひび割れ分布を、表-2に実験結果の一覧をそれぞれ示す。供試体の破壊形式は、a/dによって若干異なる傾向を示すが、いずれもせん断破壊であった。以下に、a/d別に実験で観測された挙動について概説する。

(1) a/d=0.31の供試体

最初にせん断スパン内の腹部の上面に斜引張りひび割れが発生し、徐々に剛性低下を示した。その後、荷重の増加に伴い、スパン中央付近の曲げひび割れの発生と同時に腹部の下面から2次斜引張りひび割れが発生し、さらに剛性が低下した。最終的には、ES16とES19は載荷板位置でのコンクリートの圧壊によって、また、ES17とES18は、先に発生した斜引張りひび割れが繋がり、載荷板の先端と供試体の下面を直結する線に沿って、滑りせん断破壊した。さらに、腹部内の部分的なコンクリートの圧壊がみられた。

(2) a/d=0.85の供試体

初期ひび割れは、すべての供試体において、端部上面での曲げひび割れであった。その後、負曲げ領域での曲げ-せん

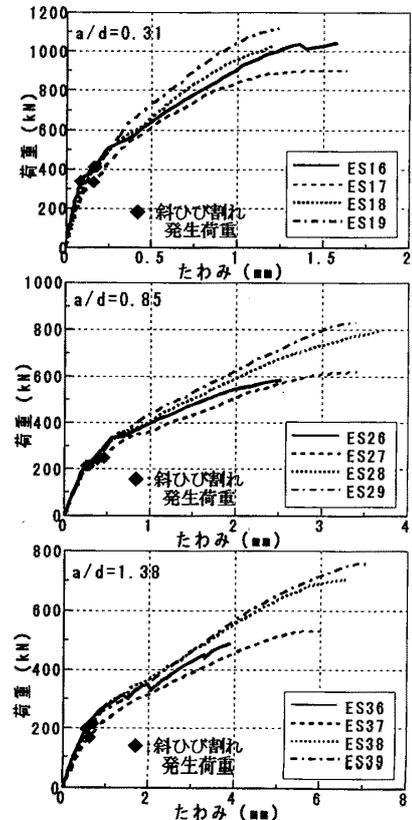


図-2 荷重-たわみ曲線

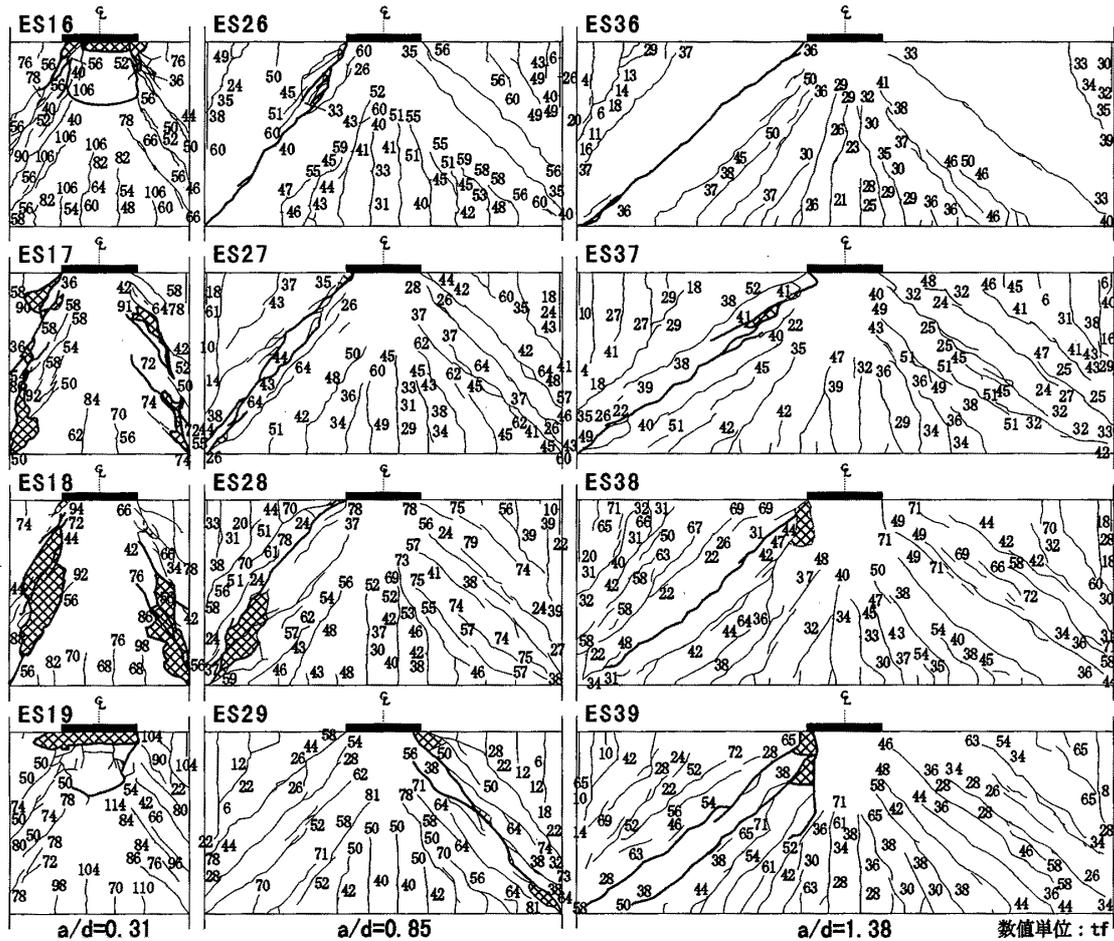


図-3 終局時のひび割れ分布

断ひび割れとほぼ同時に腹部の斜引張ひび割れが観測され、これらのひび割れの発生により、徐々にはりの剛性低下を示した。破壊は、先に発生した斜引張ひび割れに加えて、さらに生じた斜引張ひび割れが載荷板の先端と

表-2 実験値とコンクリート標準示方書による耐力の比較

番号	実験値				コンクリート標準示方書算定値				Pu Psb	Pu Pss
	斜引張鉄筋 Pd (kN)	破壊荷重 Pu (kN)	Pu Pd	破壊 モード	破壊荷重 (kN)			破壊 モード		
					斜(-)Psbm	斜(+) Psbp	せん断 Pss			
ES16	352.80	1044.97	2.96	せん断-圧縮	692.45	1017.43	411.70	せん断	1.51	2.54
ES17	352.80	911.69	2.58	せん断	689.59	1013.22	383.23	せん断	1.32	2.38
ES18	411.60	1019.20	2.48	せん断	1051.42	1544.86	450.25	せん断	0.97	2.26
ES19	411.60	1118.57	2.72	せん断-圧縮	1050.93	1544.14	448.08	せん断	1.06	2.50
ES26	215.60	588.10	2.73	せん断	330.98	404.63	252.83	せん断	1.78	2.33
ES27	254.80	627.69	2.46	せん断	329.61	402.96	235.34	せん断	1.90	2.67
ES28	235.20	793.90	3.38	せん断	502.56	614.40	276.50	せん断	1.58	2.87
ES29	215.60	833.39	3.87	せん断	502.32	614.11	275.17	せん断	1.66	3.03
ES36	205.80	488.24	2.37	せん断	218.87	250.66	150.08	せん断	2.23	3.25
ES37	176.40	538.51	3.05	せん断	217.96	249.62	139.70	せん断	2.47	3.85
ES38	215.60	705.80	3.27	せん断	332.33	380.60	164.13	せん断	2.12	4.30
ES39	215.60	763.81	3.54	せん断	332.17	380.43	163.34	せん断	2.30	4.68

供試体の下面を結ぶ時点に起こり、鉛直鉄筋比が大きいES28とES29の場合には部分的なコンクリートの圧壊も観測された。また、水平鉄筋のみを配置した前報[4]と比較すると、鉛直鉄筋を加えることによって、供試体の耐力とともに靱性もかなり向上する結果となった。

(3) a/d=1.38の供試体

a/d=1.38の供試体においてもa/d=0.85の供試体と同様に、すべてが載荷板の先端と供試体の下面を結ぶ斜引張ひび割れによるせん断破壊であった。また、破壊に至るまでの経緯もほぼ一致している。一方、主鉄筋のみ又は水平鉄筋のみで補強された先の実験でみられた脆性的な破壊は、

本実験においてはみられず、せん断耐力においては、先の実験に比べて大きく増加する結果となった。

3. 2 コンクリート標準示方書によるせん断耐力の算定結果

現行の示方書によるせん断耐力の算定結果と実験結果の比較を表-2に示す。ただし、ここでは部材係数(安全係数) $\gamma_s=1.0$ として比較した。また、実験値 P_u /示方書算定値 P_{ss} と a/d の関係を図-4に示す。これらより、すべての供試体において、実験値 P_u は示方書の算定値 P_{ss} をかなり上回っており、示方書式を用いて端部拘束されたディープビームを設計する場合、かなり安全側の設計になることがわかる。また、その程度は、 a/d が大きくなるほど、また、鉛直鉄筋比が大きくなるほど顕著であることがわかる。

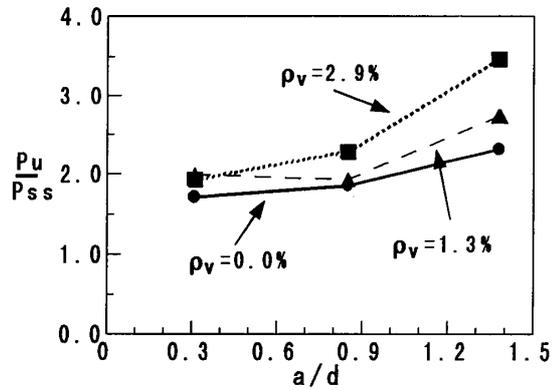


図-4 示方書式に対する実験値との比較

3. 3 せん断耐力に及ぼす水平鉄筋の影響

図-5に水平鉄筋比によるせん断耐力の変化を鉛直鉄筋を有しない場合の結果[4]も加えて示す。ここで、 ρ_h は水平鉄筋比で A_{sh}/bs (A_{sh} :水平鉄筋の断面積、 b :腹部の幅、 s :水平鉄筋の間隔)で表された値である。また、図中縦軸は各供試体のコンクリート圧縮強度が異なることを考慮し、せん断耐力 $V_u (=P_u/2)$ を $bd\sqrt{f'_{ck}}$ で除した値を使用した。図より、鉛直鉄筋を有しない場合、 $\rho_h=0.0$

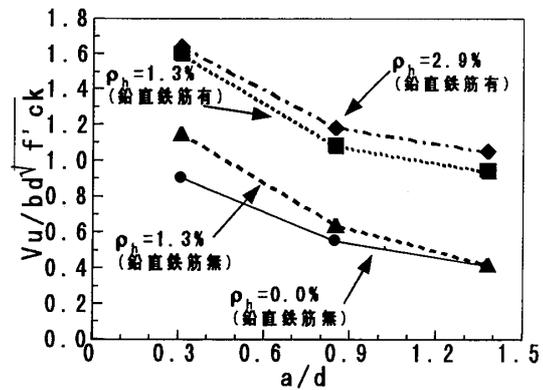


図-5 水平鉄筋比によるせん断耐力の変化

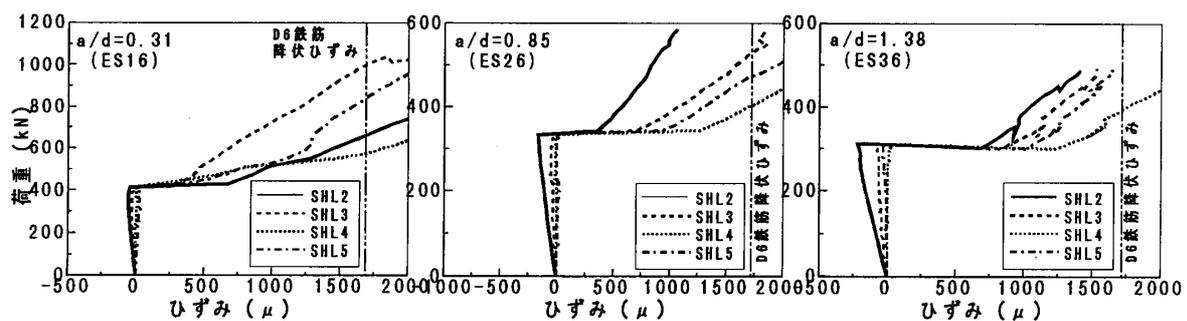


図-6 荷重-水平鉄筋ひずみ曲線

%に対して $\rho_h=1.3\%$ のはりのせん断耐力は増加し、特に、 $a/d=0.31$ においてその差は顕著にみられた。また、鉛直鉄筋を併用した場合には、さらに、せん断耐力の増加が認められたが、水平鉄筋比 ρ_h を1.3%から2.9

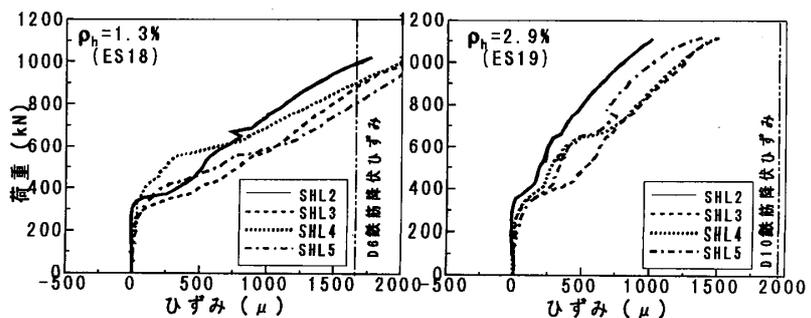


図-7 水平鉄筋ひずみの鉄筋比による比較

%に増加させることによるせん断耐力の増加は顕著ではなかった。

図-6にa/d別の水平鉄筋ひずみの変化を示す。a/d=0.31、0.85の場合は、ひび割れが発生するごとに水平鉄筋ひずみが大きくなっている。このことは、荷重の一部を水平鉄筋が負担することを示すものである。また、最大耐力時における水平鉄筋ひずみが、a/d=1.38に比べ大きく卓越し、a/d=0.31、0.85、1.38の順に小さくなっていることからわかる。さらに図-7より、 $\rho_h=1.3\%$ から $\rho_h=2.9\%$ に増やした場合、ES19の最大耐力時における水平鉄筋は降伏していないことがわかる。これは、図-5で水平鉄筋を $\rho_h=1.3\%$ から $\rho_h=2.9\%$ に増やしてもせん断耐力の増加に対する効果が顕著ではなかったことを裏付けるものである。

3. 4 せん断耐力に及ぼすa/dと鉛直鉄筋の効果

図-8に鉛直鉄筋比によるせん断耐力の変化を示す。ここで ρ_v は鉛直鉄筋比で A_{sv}/bs (A_{sv} :鉛直鉄筋の断面積)で表される値である。図より、鉛直鉄筋比が $\rho_v=0.0\%$ 、 1.3% 、 2.9% と増大するにつれて、せん断耐力が増加していることがわかる。また、a/d=0.31の場合は、a/d=0.85、1.38の場合に比べて鉛直鉄筋比が増すことによるせん断耐力増加の影響が小さくなっている。これは、

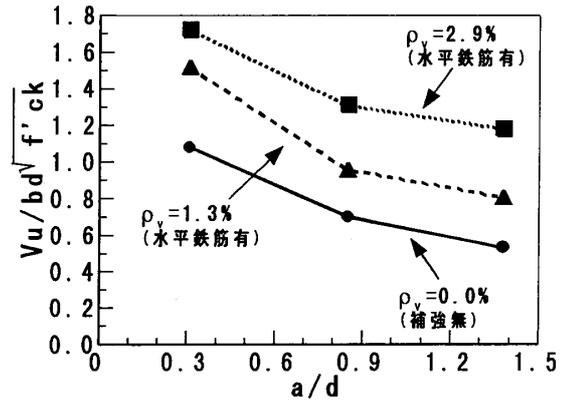


図-8 鉛直鉄筋比によるせん断耐力の変化

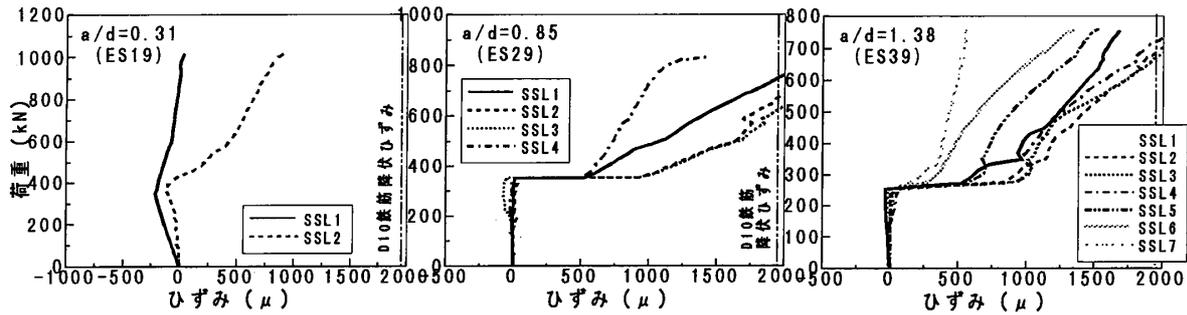


図-9 荷重-鉛直鉄筋ひずみ曲線

a/d= 0.31の場合、水平鉄筋のせん断耐力増加に及ぼす影響が大きいためであると考えられる。

図-9にa/d別の鉛直鉄筋ひずみの変化を示す。最大耐力時における鉛直鉄筋ひずみの値は、a/d=1.38、0.85、0.31の順に小さくなっており、

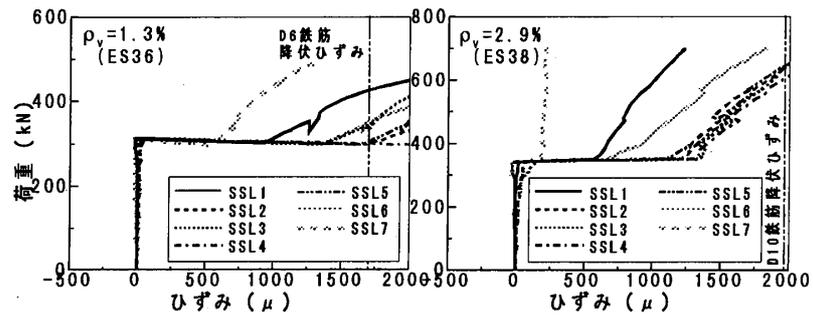


図-10 鉛直鉄筋ひずみの鉄筋比による比較

a/d=0.85、1.38の場合にはほとんどが降伏ひずみを越えている。これは、a/dが大きくなるほど、鉛直鉄筋がせん断耐力を増加させることを示すものである。また、鉛直鉄筋ひずみを鉛直鉄筋比 ρ_v 別に示した図-10より、 $\rho_v=1.3\%$ から 2.9% に増加させた場合、初期ひび割れによる鉛直鉄筋ひずみは小さくなっているが、その後の荷重増加により最大耐力時には降伏していることがわかる。このことは、斜めひび割れ発生後の鉛直鉄筋の荷重分担割合が鉄筋比の増加とともに次第に増大

することを示すものであると考えられる。

3. 5 ひび割れ分散性

図-11に、既報[4]の主鉄筋のみ、水平鉄筋を有する場合と本実験による水平・鉛直鉄筋を有する場合の終局時ひび割れ分布の比較を示す。図より、主鉄筋のみより水平鉄筋を有する場合の方が、ひび割れの分散性が向上していることは明らかである。 $a/d=0.31$ で、水平鉄筋のみの場合と水平・鉛直鉄筋の両方を有する場合では、ひび割れ分散性において顕著な差異は認めら

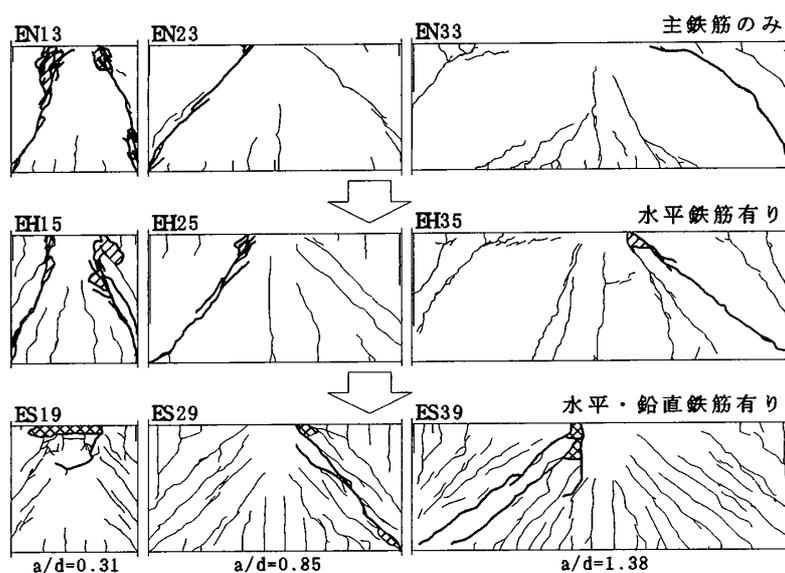


図-11 終局時の補強鉄筋ごとのひび割れ比較

れない。しかし、 $a/d=0.85$ 、 1.38 の場合はひび割れの分散性が大きく向上している。また、前報の結果[4]によれば、水平鉄筋のみを有するディープビームは a/d の値が大きくなるにつれ、脆性的な破壊を示すことが報告されている。しかし、本実験では鉛直鉄筋で補強されたものは脆性的な破壊が抑制されており、鉛直鉄筋によるひび割れの分散性の向上が認められた。

4. まとめ

本研究により得られた結果をまとめると、次のとおりである。

- (1) 端部拘束されたRCディープビームのせん断耐力の実験値は、現行のコンクリート標準示方書による算定値を上回り、特に a/d およびせん断補強鉄筋比が大きくなるほど、その差は顕著である。
- (2) 水平鉄筋によるせん断耐力の増加は、特に a/d が小さい($a/d=0.31$)場合に認められ、かつ鉛直鉄筋との併用が有効であるが、水平鉄筋比 $\rho_w=1.3\%$ 以上の効果は顕著ではない。
- (3) 鉛直鉄筋によるせん断耐力の増加は、 a/d が大きいほど顕著で、その効果は鉄筋比に依存する。
- (4) $a/d=0.85$ 以上では、鉛直および水平鉄筋の併用は、ひび割れの分散性を大きく向上させる。

参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編、 pp. 163~165, 1996
- [2] 林川俊郎ほか：せん断補強鉄筋を有するRCディープビームの強度について、コンクリート工学年次報告集, Vol. 12, No. 2, pp. 319~324, 1990
- [3] Rogowsky, David M., MacGeor, James G., and Ong, See Y. : Tests of Reinforced Concrete Deep Beams, ACI Journal, Proceedings. Vol. 83, No. 4, pp. 614~623, July/Aug. 1986
- [4] 元大淵ほか：端部拘束されたRCディープビームの破壊挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次報告集, Vol. 18, No. 2, pp. 671~676, 1996