

[126] 鉄筋コンクリートディープビームのせん断強度に関する 実験検討

正会員 ○原 忠 勝 (日本大学 工学部)
正会員 北 田 勇 輔 (日本大学理工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材のうち、ディープビームの領域に対する設計は、従来、二次元問題として応力分布の非線形性を考慮する方法¹⁾が用いられてきている。しかし、コンクリート構造物の耐力問題を扱うには載荷重下でのひびわれの発生及び性状は無視できない要因である。このため近年は、ディープビームに対しても、ひびわれ発生による内部のつり合い機構の変化に着目した研究が行われるようになった。この結果、i) 斜め引張破壊を考えるもの²⁾、ii) 割裂破壊を考えるもの^{3)~4)}、iii) アーチはトラスのストラット破壊を考えるもの^{5)~7)}など、種々の耐力機構モデルによる算定式が提案されている。しかし、これらは或る領域については破壊現象の説明及び耐力算定については精度良く推定できるが、他の領域まで拡張する事ができないのが現状である。このため二羽は⁶⁾実験方法までも含めた詳細な実験を行っており、鉄筋コンクリートディープビームの研究に対する有益な資料を提供している。二羽の場合⁶⁾耐力機構にタイドアーチを想定し、ストラットの破壊を考えた耐力式である。ストラット機構はFEM解析の結果より、載荷板の幅よりも拡大する事を示し、他のパラメーターとの関係を明らかにした精度の良い算定式となっている。

一方、ディープビームの耐力機構については、ストラットの破壊ばかりでなく、鉄筋量によっては、曲げ破壊に似た、タイ材としての鉄筋の破壊の生ずる事がPaivaら⁸⁾及びKumer⁷⁾によって報告されており、これら破壊の遷移領域に対する検討が必要と思われる。よって、鉄筋コンクリートディープビームのせん断強度に対する統一的概念を確立するためには、i) スパンと梁高の比、 l/h 、及びせん断スパンと梁高の比、 a/h 、で示されるディープビームの構造上の領域、ii) 主鉄筋量、及び載荷条件、などを考慮した実験が有用と考えられる。これより、ACI 318-77¹⁰⁾及びCP-110¹¹⁾に示されるディープビームの領域、 $l/h < 2.0$ 、 a/h (又は a/d) < 1.0 の条件で、主鉄筋量及び載荷板の幅を変え実験し、検討した。

2. 実験方法

試験体は、図-1に示すように、スパン $l = 100$ cm、高さ $h = 55$ cm (有効高さ $d = 50$ cm)、部材幅 $b = 10$ cmの単鉄筋長方形のディープビームである。主鉄筋の定着には、ACI及びCP-110におけるコーベルの定着方法^{10), 11)}に従って、主鉄筋と同径の横方向筋を溶接する方法とした。実験条件は、 a/d 、主鉄筋量、及び載荷板の幅で、それぞれ次のようである。

1) せん断スパンと有効高さの比：(5種)

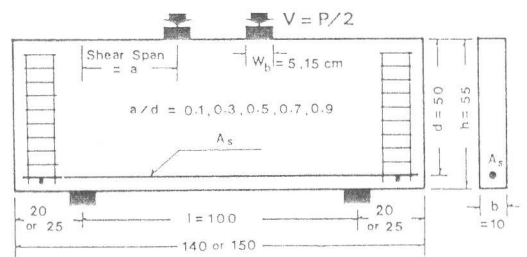
$$a/d = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$$

2) 主鉄筋量：(3種)

$$P_w = A_s / b_d = 0.5, 1.0, 1.5 \%$$

3) 載荷板の幅：(2種) $W_b = 5, 15$ cm

試験体は上記の諸条件を組合わせた計30体で、材令約100日付近で載荷試験を行った。載荷方法は対称二点集中荷重で、図-2に示すように、支点拘束が生じないように載荷板の間



RD80: $W_b = 5$ cm, $f_c' = 27.45$ kg/cm², $f_t = 2.18$ kg/cm²
RD83: $W_b = 15$ cm, $f_c' = 30.20$ kg/cm², $f_t = 2.92$ kg/cm²

図-1 試験体の寸法 (単位 cm)

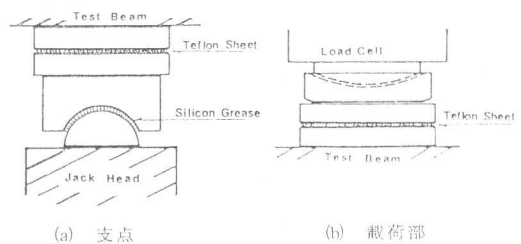


図-2 支点及び載荷点の詳細

にはテフロンシートを用いた。載荷には容量100トンのジャッキを2台使い、ロードセルにより左右の荷重にバラツキが生じないように確認しながら載荷した。

3. 実験結果及び考察

試験体の寸法及び使用材料の性質を、載荷板の幅 $W_b = 5\text{ cm}$ (RD80) のシリーズを表-1(a)に、また、 $W_b = 15\text{ cm}$ (RD83) のシリーズを表-1(b)に示した。

破壊後のひびわれ様相の概略を鉄筋比 $P_w = 1.0\%$ の場合について図-3に示す。図に示すように、本実験で見られた破壊形式は i) 支圧破壊, ii) セン断破壊, iii) 曲げ-せん断の三種に大別できると思われる。

支圧破壊は $a/d = 0.1$ の場合に見られ、図-3(a)に示すように、ウェブに支圧応力によると思われるひびわれが発生し、上下方向に進展している。この後は載荷板の幅の大小によって破壊は異なり、 $W_b = 5\text{ cm}$ の場合、くさびが打込まれたようにV字のひびわれが発生して破壊した。また、 $W_b = 15\text{ cm}$ の場合、ストラットが圧縮されるようにして破壊した。

せん断破壊は $a/d = 0.3 \sim 0.7$ の試験体で見られ、鉄筋量により若干異なるが、載荷板の幅の違いは比較的明確であった。載荷板幅の小さい $W_b = 5\text{ cm}$ のシリーズの場合、斜めひびわれは支点と載荷点を結ぶ線上に発生し、これが進展し破壊に至った。一方、載荷板の幅が15cmの場合、斜めひびわれは支点内側で、ストラットが形成するように発生し、終局荷重時には支点内側と載荷点内側を結ぶ線にひびわれが発生すると同時に急激に破壊に至った。

また、曲げ-せん断破壊は $a/d = 0.9$ の場合に見られ、図-3(c)に示すように、斜直なひびわれが試験体上部まで進展する。しかし、載荷板の幅が大きいシリーズではコンクリートの剥離が見られるが、 $W_b = 5\text{ cm}$ のシリーズでは斜めひびわれが発生し、急激に耐力を失った。

表-1(a) 試験体の寸法諸元

(RD80 シリーズ, 載荷板の幅 $W_b = 5\text{ cm}$)

Test Beam	a/d	h (cm)	d (cm)	b (cm)	P_w (%)	f_y (kg/cm ²)	
RD80-5-0.5-0.1	0.10	55.7	50.7	10.1	0.599	3898	
	-0.3	0.30	55.1	50.1	10.0	0.572	"
	-0.5	0.50	55.3	50.2	10.1	0.566	"
	-0.7	0.69	55.5	50.6	10.0	0.566	"
	-0.9	0.90	55.3	50.3	10.1	0.564	"
RD80-5-1.0-0.1	0.10	55.2	50.2	10.1	0.990	3579	
	-0.3	0.30	55.6	50.8	10.1	0.988	"
	-0.5	0.49	55.5	50.6	10.1	0.991	"
	-0.7	0.70	55.0	50.2	10.1	0.999	"
	-0.9	0.89	55.5	50.4	10.1	0.995	"
RD80-5-1.3-0.1	0.10	55.8	50.8	10.2	1.240	3549	
	-0.2	0.20	55.2	50.2	10.1	1.267	"
	-0.3	0.30	55.3	50.2	10.1	1.255	"
	-0.5	0.50	55.5	50.3	10.1	1.264	"
	-0.7	0.69	55.2	50.4	10.3	1.237	"
-0.9	0.90	55.3	49.8	10.1	1.277	"	

notes: $f_c' = 274.5(\text{kg/cm}^2)$, $f_t = 21.8(\text{kg/cm}^2)$, $W_b = 5(\text{cm})$

表-1(b) 試験体の寸法諸元

(RD83 シリーズ, 載荷板の幅 $W_b = 15\text{ cm}$)

Test Beam	a/d	h (cm)	d (cm)	b (cm)	P_w (%)	f_y (kg/cm ²)	
RD83-15-0.5-0.1	0.10	55.0	50.1	10.1	0.566	3979	
	-0.3	0.30	55.0	50.5	10.1	0.562	"
	-0.5	0.49	55.3	51.1	10.0	0.561	"
	-0.7	0.69	55.1	50.6	10.1	0.561	"
	-0.9	0.88	55.2	50.9	10.1	0.572	"
RD83-15-1.0-0.1	0.10	55.2	50.3	10.0	1.007	3671	
	-0.3	0.30	55.0	50.1	10.1	1.001	"
	-0.5	0.50	54.8	50.3	10.0	1.007	"
	-0.7	0.70	54.9	50.1	10.1	1.001	"
	-0.9	0.91	55.1	50.6	10.1	0.991	"
RD83-15-1.5-0.1	0.10	55.0	50.1	10.2	1.554	3400	
	-0.3	0.30	55.0	50.3	10.0	1.579	"
	-0.5	0.50	55.2	50.3	10.0	1.579	"
	-0.7	0.70	55.0	50.1	10.1	1.570	"
	-0.9	0.91	55.0	50.0	10.0	1.598	"
RD83-15-Ø25-0.3	0.30	55.1	49.8	10.3	0.936	2956	

notes: $f_c' = 302.0(\text{kg/cm}^2)$, $f_t = 29.2(\text{kg/cm}^2)$, $W_b = 15(\text{cm})$

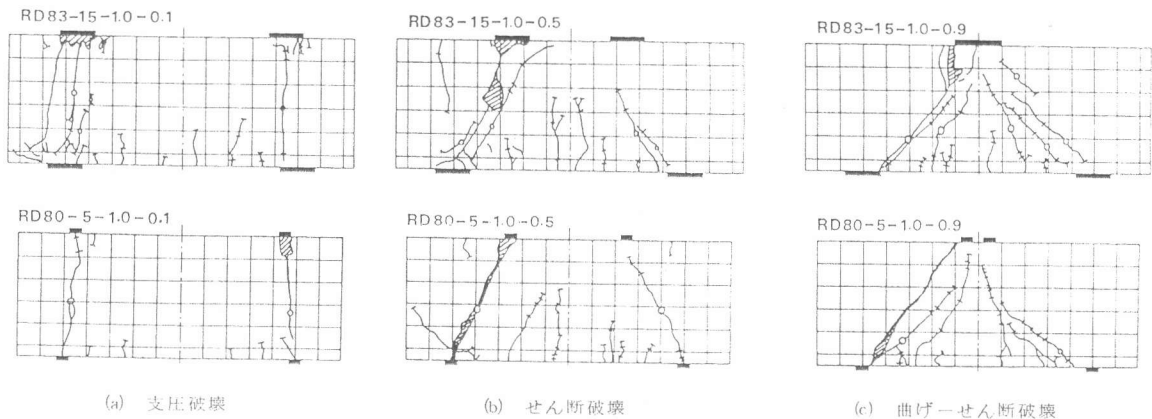


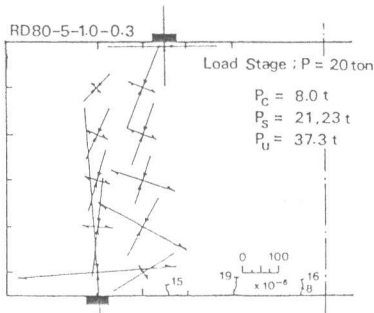
図-3 ひびわれ様相 ($P_w = 1.0\%$ シリーズ)

主ひずみの様相 — ひびわれ発生によるつり合い機構の変化についての資料を得るために、各シリーズの試験体のうち a/d が 0.3 と 0.7 については、側面に 10 cm 間隔のゲージ点を設け、主ひずみの測定を行った。このうち鉄筋比 1.0 % の結果を図-4 に示した。荷重レベルは斜めひびわれ発生直前のものである。 $a/d = 0.3$ の場合、 $W_b = 5 cm$ では載荷板付近に支圧力が生じている様子が見られ、 $W_b = 15 cm$ では載荷板に似たストラットが形成されている様子が見られる。また、 $a/d = 0.7$ の場合、ストラットの様相が余り明確ではないが、 $W_b = 5 cm$ では直線的な、 $W_b = 15 cm$ では曲線的な力の流れを示している。

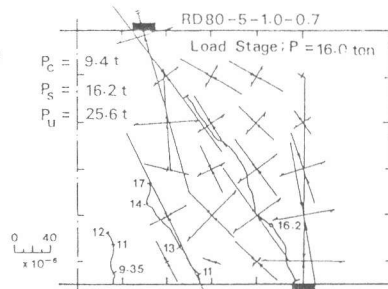
主鉄筋のひずみ性状 — 図-5 には作用せん断力 V と主鉄筋のスパン中央 (S_0)、載荷点 (S_1, S_1')、及び支点 (S_2, S_2') でのひずみの変化を示した。主鉄筋ひずみの顕著な変化は斜めひびわれの発生によって生じている。 a/d が 0.3 以上の場合、図-5 (c), (d) に示すように、ほぼ 2 ヒンジのタイドアーチのタイ材の挙動を示し、次式で近似できる。

$$T_s = A_s f_s = \frac{\int_0^{l_0} \frac{M_0}{I_c \cos \varphi} y dx}{\int_0^{l_0} \frac{y^2}{I_c \cos \varphi} dx + \int_0^{l_0} \frac{\cos \varphi}{\Lambda_s} dx + \frac{l_0}{n \Lambda_s}} \approx 1.1 \frac{a}{d} V \quad \dots \dots \dots (1)$$

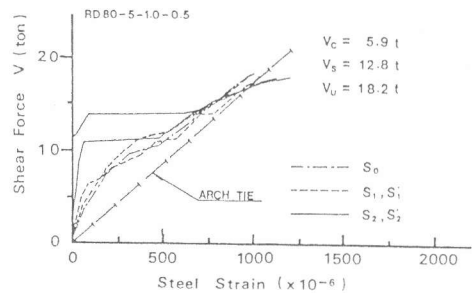
しかし、鉄筋量が少なく ($P_w = 0.5 \%$)、 a/d が大きい ($a/d > 0.7$) 場合、終局荷重時付近においては式 (1) における計算値よりも、若干大きいひずみ値となっている。これは、 a/d が大きくなると曲げモーメントの影響が多くなり、鉄筋量が少ないと主鉄筋は降伏応力度以上の応力を受け、塑性域に達するためと思われる。



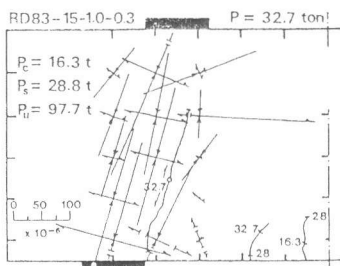
(a) $a/d = 0.3, W_b = 5 cm$



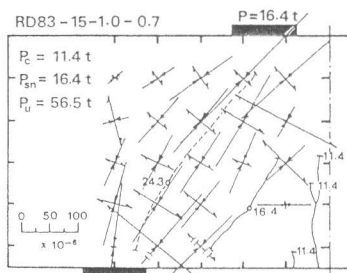
(c) $a/d = 0.7, W_b = 5 cm$



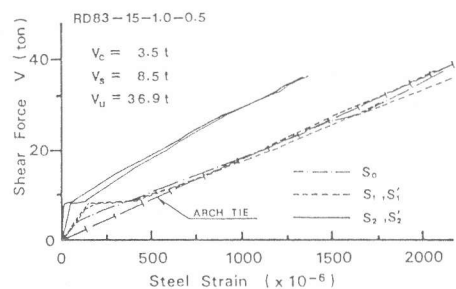
(c) $a/d = 0.5, W_b = 5 cm$



(b) $a/d = 0.3, W_b = 15 cm$



(d) $a/d = 0.7, W_b = 15 cm$



(d) $a/d = 0.5, W_b = 15 cm$

図-4 主ひずみの測定結果 ($P_w = 1.0 \%$)

図-5 主鉄筋のひずみ ($P_w = 1.0 \%$)

終局せん断耐力 — ディープビームの耐力性状について検討するため、i) 割裂破壊に基づくもの^{3),4)}及びii) ストラットの破壊を考えるもの^{5),7)}について本実験結果と比較を行った。図-6は割裂破壊によるもの、図-7はストラット破壊に基づく耐力算定式によるものである。載荷板の幅が小さい $W_b=5\text{ cm}$ のシリーズでは、 a/d 及び鉄筋量にかかわらず、ほぼ一定の耐力を示し、表-2(a)に示すように、割裂理論と良い一致を示した。しかし、載荷板の幅が大きい $W_b=25\text{ cm}$ のシリーズでは、ストラットの破壊をタイドアーチモデルとして二羽の算定式⁶⁾及びトラスのストラット破壊を考えた Kumer の算定式が $P_u=0.5\%$ のシリーズを除いて、良い結果を示した。表-2(b)に示すように、ストラットの破壊はタイ材としての鉄筋が十分抵抗できる程であれば、耐力算定式として有用であると思われる。

4. ま と め

鉄筋コンクリートディープビームのせん断強度に対する統一的な概念を確立する資料を得るために、比較的詳細な実験を行い検討した。これらの結果より次の事が要約される。

- 1) 載荷板の幅の小さいディープビームのせん断強度は、鉄筋量及び a/d に余り影響を受けず、ほぼ一定であり、割裂破壊による耐力算定式と良く一致する結果が得られた。
- 2) ディープビームのつり合い機構は、斜めひびわれの発生によって変化し、鉄筋は $a/d=0.1$ の場合を除き、ほぼ2ヒンジのタイドアーチのタイ材の挙動を示す。これより、主鉄筋量の算定にはアーチのタイ材として、式(1)による必要量を用いても良いように思われる。
- 3) ストラットの破壊は割裂理論で算定される割裂破壊を防ぐ載荷板幅以上であれば、二羽の算定式⁶⁾が比較的良く実験結果を満足する。しかし、ストラット破壊が生ずるような鉄筋量の範囲については、今後、検討する必要がある。このため、表-2(b)に示すように、塑性理論^{8),9)}による境界条件を考慮するのも一考である。おわりに、本実験の実施に際し、貴重な御助言を頂いた東京大学教授岡村 甫 博士に深謝致します。

参考文献 1) 日本道路協会, 2) Paiva et al., ASCE, 1965, 3) Ramakrishnan, ACI, 1966, 4) F.K.Kong, Concrete, 1972, 5) Manuel, SP-42, 1974
6) 二羽, 東大学位論文, 1983, 7) P.Kumer, Mag. of Con. Res., 1976, 8) Nielsen et al., Mag. of Con. Res., 1978
9) 原, 第2回せん断コロキウム, 1983, 10) ACI 318-77, ACI, 1977, 11) BSI, CP-110, 1972

表-2(a) 実験結果と計算結果の比較 ($W_b=5\text{ cm}$)

Test Beam (RD80Series)	P_u (ton)	Splitting exp./cal.	J.Niwa exp./cal.	Nielsen exp./cal.	Hara exp./cal.
5-0.5-0.1	39.2	1.105	0.743	0.647	0.374
-0.3	41.3	1.092	0.856	0.906	0.688
-0.5	38.8	1.012	0.913	1.092	0.961
-0.7	38.3	1.006	1.073	1.355	1.271
-0.9	30.6	0.799	1.039	1.332	1.290
5-1.0-0.1	36.4	0.943	0.640	0.493	0.258
-0.3	37.3	0.969	0.667	0.634	0.416
-0.5	36.4	0.947	0.746	0.768	0.584
-0.7	25.6	0.672	0.629	0.664	0.548
-0.9	32.5	0.846	0.964	0.998	0.869
5-1.3-0.1	35.2	0.902	0.546	0.436	0.216
-0.2	36.4	0.952	0.589	0.508	0.282
-0.3	41.9	1.082	0.704	0.643	0.395
-0.5	41.7	1.084	0.808	0.783	0.553
-0.7	38.2	0.979	0.866	0.860	0.662
-0.9	35.2	0.919	0.999	0.947	0.773

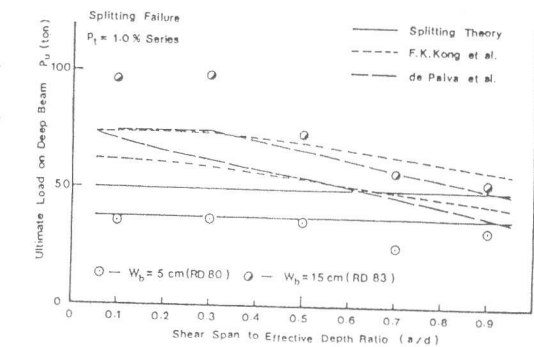


図-6 斜め引張³⁾と割裂破壊^{3),4)}に基づく耐力算定式との比較

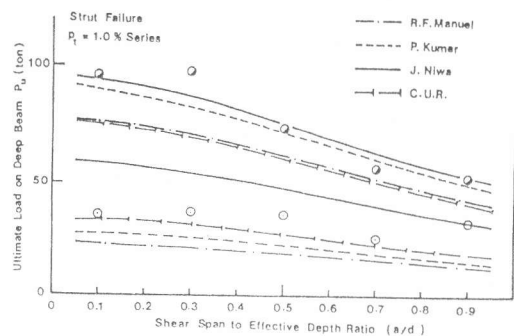


図-7 ストラット破壊に基づく耐力算定式^{6),7)}との比較

表-2(b) 実験結果と計算結果の比較 ($W_b=15\text{ cm}$)

Test Beam (RD83Series)	P_u (ton)	Splitting exp./cal.	J.Niwa exp./cal.	Nielsen exp./cal.	Hara exp./cal.
15-0.5-0.1	70.3	1.382	0.840	1.128	0.645
-0.3	81.3	1.599	1.045	1.305	1.300
-0.5	52.0	1.027	0.764	1.103	1.234
-0.7	46.6	0.915	0.813	1.278	1.507
-0.9	30.6	0.600	0.642	1.054	1.245
15-1.0-0.1	95.7	1.897	1.008	1.263	0.647
-0.3	97.7	1.921	1.104	1.283	1.058
-0.5	73.7	1.469	0.959	1.226	1.149
-0.7	56.5	1.113	0.872	1.161	1.173
-0.9	52.4	1.029	0.970	1.310	1.353
15-1.5-0.1	67.9	1.332	0.627	0.778	0.366
-0.3	97.3	1.933	0.982	1.131	0.763
-0.5	79.0	1.563	0.913	1.118	0.899
-0.7	74.0	1.455	1.104	1.267	1.103
-0.9	46.0	0.914	0.778	0.949	0.862
15-Ø25-0.3	94.0	1.809	1.063	1.357	1.264