

論文

[2052] セン断補強鉄筋を有するRCディープビームの強度について

正会員○林川 俊郎（北海道大学工学部）

斉藤 文彦（北海道大学大学院）

正会員 角田与史雄（北海道大学工学部）

1. はじめに

せん断スパンと有効高さの比 a/d が小さい、いわゆるディープビームにおけるせん断耐力は、せん断補強鉄筋を用いない場合では既に二羽の研究で精度よい算定式が与えられており、また土木学会コンクリート標準示方書にも実用的な算定式が与えられている¹⁾²⁾。ディープビームは斜めひびわれ発生後もある程度せん断抵抗力があり、通常のはりよりもせん断強度が大きい、設計条件によってはさらに補強鉄筋を配筋してせん断強度を高めたい場合が少なくない。しかし、ディープビームにおけるせん断補強鉄筋の効果は、未だよく解明されていないように思われる。

そこで本研究では、せん断補強鉄筋として鉛直スターラップと水平補強鉄筋を有するディープビームの供試体を作成して実験を行ない、その効果とせん断耐力に及ぼす影響を検討した。さらに、既往の実験データを含めてせん断補強鉄筋の効果を検討し、鉛直スターラップを有する場合のせん断耐力の簡略な推定方法を見出した。

2. 実験概要

16個の供試体はすべて有効高さ26.5cm、幅15cmの長方形断面であり、せん断スパン比 a/d は0.5から2.0までの間である（図-1、ならびに表-1）。主鉄筋はすべて2D25（平均断面積 $A_s=9.766\text{ cm}^2$ 、平均降伏強度 $f_y=3815\text{ kgf/cm}^2$ ）を用いた。鉛直スターラップを有する供試体には、圧縮鉄筋として2D13（ $A_s'=1.366\text{ cm}^2$ 、 $f_y'=4076\text{ kgf/cm}^2$ ）を配筋した。せん断補強鉄筋には、2D6（ $A_v=0.573\text{ cm}^2$ 、 $f_y=3437\text{ kgf/cm}^2$ ）、2D10（ $A_v=1.366\text{ cm}^2$ 、 $f_y=4076\text{ kgf/cm}^2$ ）、2D13（ A_v または $A_h=2.398\text{ cm}^2$ 、 $f_y=3801\text{ kgf/cm}^2$ ）、2D25（ $A_h=9.766\text{ cm}^2$ 、 $f_y=3815\text{ kgf/cm}^2$ ）を使用した。コンクリートは普通ポルトランドセメントを用い、目標強度を7日間の湿潤養生で $f_c'=200\text{ kgf/cm}^2$ とした。水セメント比は55%とし、A E剤をセメント比で0.044%混和させた。各供試体のコンクリート強度 f_c' を表-1に示す。

載荷は2点集中荷重とし、載荷点と支点はローラーで間に幅5cmの鋼板プレートを介している。またスターラップにひずみゲージを貼り、ひずみを測定した。ひずみゲージの位置は、支点と載荷点を結んだ直線と

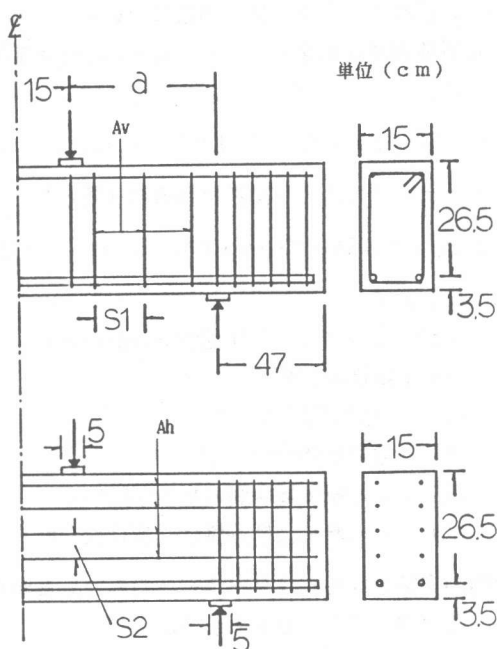


図-1 供試体形状・寸法

表-1 供試体諸元

供試体	a (cm)	a/d	f _c ' (kgf/cm ²)	鉛直スターラップ		水平補強鉄筋		せん断耐力 V _t (tonf)
				種類	間隔S1(cm)	種類	間隔S2(cm)	
SV53-1	53.0	2.00	212	2D6	8.8	—	—	12.30
SV53-2	53.0	2.00	256	2D10	13.3	—	—	17.60
SV44-1	44.0	1.67	194	2D6	8.8	—	—	14.40
SV40-2	40.0	1.50	209	2D10	13.3	—	—	17.95
SV44-3	44.0	1.67	191	2D10	8.8	—	—	18.40
SV26.5-1	26.5	1.00	253	2D6	13.3	—	—	21.75
SV26.5-2	26.5	1.00	216	2D10	26.5	—	—	21.80
SV26.5-3	26.5	1.00	210	2D10	13.3	—	—	23.40
SV26.5-4	26.5	1.00	173	2D13	13.3	—	—	18.40
SV13.3-2	13.3	0.50	238	2D6	13.3	—	—	31.45
SH40-1	40.0	1.50	200	—	—	2D13	6.0	12.00
SH40-2	40.0	1.50	222	—	—	2D25	7.0	14.60
SH26.5-1	26.5	1.00	180	—	—	2D13	6.0	17.10
SH26.5-2	26.5	1.00	201	—	—	2D25	7.0	20.60
SH13.3-1	13.3	0.50	196	—	—	2D13	6.0	28.95
SH13.3-2	13.3	0.50	193	—	—	2D25	7.0	31.60

せん断補強鉄筋の交点附近とした。

3. 実験結果と考察

供試体はすべてせん断スパン内中央付近で斜めひびわれが発生し、その後載荷点と支点方向に発達してやがて破壊する、せん断圧縮破壊であった。そのせん断耐力V_tを表-1に示す。

3-1. 鉛直スターラップの効果について

せん断補強鉄筋のないディープビームのせん断耐力を算定する方法として、二羽は次式を提案している。

$$V_c = 0.53 (f_c')^{2/3} (1 + \sqrt{p_w}) (1 + 3.33 r/d) b_w \cdot d / \{1 + (a/d)^2\} \dots (1)$$

スターラップによるせん断耐力の増加量として、トラス理論による式は次のようである。

$$V_s = A_v \cdot f_y (\sin \alpha + \cos \alpha) Z / S1 \dots (2)$$

以上において、

f _c ' : コンクリート圧縮強度(kgf/cm ²)	a : せん断スパン(cm)
b _w : 断面幅(cm)	d : 有効高さ(cm)
A _s : 主鉄筋量(cm ²)	p _w : 鉄筋比(=100A _s /(b _w ·d)) (%)
r : 載荷板幅(cm)	A _v : せん断補強鉄筋量(cm ²)
S1 : せん断補強鉄筋の水平間隔(cm)	α : せん断補強鉄筋と部材軸のなす角
f _y : せん断補強鉄筋降伏強度(kgf/cm ²)	Z : d/1.15

今回の実験では鉛直スターラップのみであるから、(2)式中で常にα=90°である。よって、次のように書き直すことができる。

$$V_s = A_v \cdot f_y \cdot Z / S1 \dots (3)$$

ここで $Z/S1$ は、斜めひびわれを跨ぐスターラップの本数を現わすことになる。

(1) 式と (3) 式の結果を表-2 に示す。すべての供試体において、実験値 V_t は二羽式の値 V_c を上回っておりスターラップの効果があることがわかる。

スターラップがトラス理論に比べてどの程度有効であるかを調べるために、 $\alpha_1 = (V_t - V_c) / V_s$ を求めてみるとトラス理論を下回るものが4個あった。図-2 はトラス理論よりもスターラップの効果が下回っている供試体SV26.5-4のスターラップのひずみの測定結果を示したものであるが、破壊時のひずみは降伏ひずみの半分程度以下であることがわかった。

前述のように、スターラップのひずみ測定位置は支点と載荷点を結ぶ直線上に選んでいるので、斜めひびわれ位置とほぼ一致するものが多かった。そこで、スターラップはすべてひびわれを跨いでいると仮定し、スターラップのひずみの測定値から応力を計算してスターラップが受け持つせん断力 V_{steel} を求め、これよりコンクリートが分担していると考えられるせん断力 V_{conc} を求め、これらと荷重との関係を図-3 に示す。実線および破線は各せん断スパンについての値を示す。また、(1) 式による

表-2 実験値と計算結果 (スターラップ)

供試体	V_t (tonf)	V_c (tonf)	V_s (tonf)	α_1	α_2
SV53-1	12.30	6.26	5.16	1.18	1.08
SV53-2	17.60	7.10	9.68	1.05	1.05
SV44-1	14.40	7.86	5.16	1.27	1.11
SV40-2	17.95	9.46	9.68	0.88	0.94
SV44-3	18.40	7.78	14.58	0.73	0.82
SV26.5-1	21.75	17.62	3.43	1.21	1.03
SV26.5-2	21.80	15.85	4.84	1.23	1.05
SV26.5-3	23.40	15.56	9.68	0.81	0.93
SV26.5-4	18.40	13.67	15.79	0.30	0.62
SV13.3-2	31.45	27.02	1.97	2.25	1.09

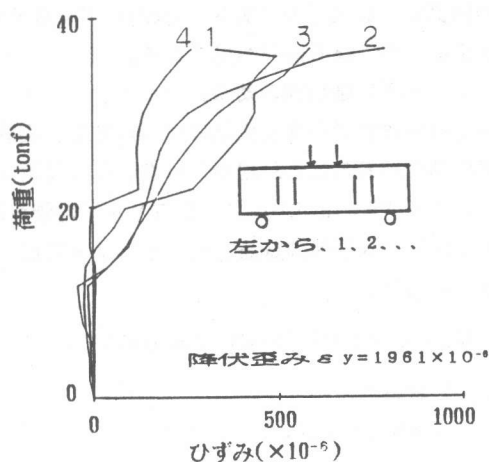


図-2 スターラップのひずみ

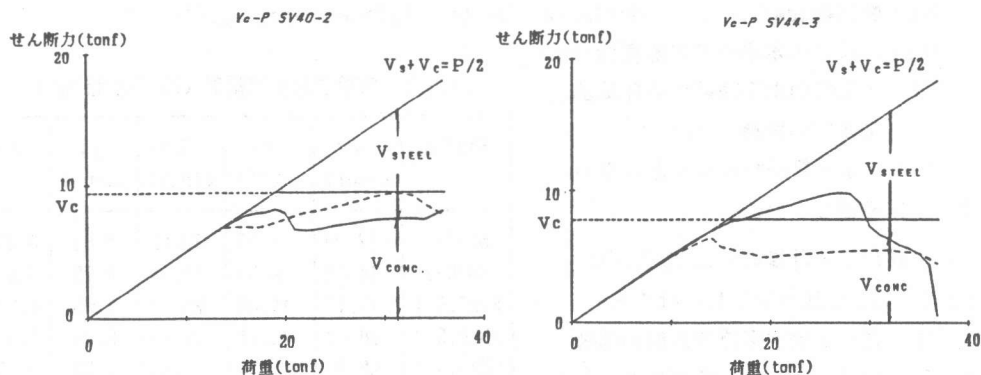


図-3 せん断力の分担過程

V_c の値を付記した。図-3によれば、徐々に载荷していくと最初スターラップの効果は現れないが、せん断力が V_c に達する前にスターラップのひずみが発生し V_{steel} が増加していくが、 $V_{conc.}$ はほぼ横ばいとなり、やがて破壊している。特にSV44-3は、破壊直前にスターラップの急激なひずみ増加が見られ、スターラップが降伏する前にコンクリートが破壊していると思われる。しかし図-3中の V_{steel} は破壊時のひびわれの観察結果に基づいて、斜めひびわれがすべてのスターラップを跨いでいると仮定して計算しているが、その仮定による誤差が含まれている可能性は考えられる。

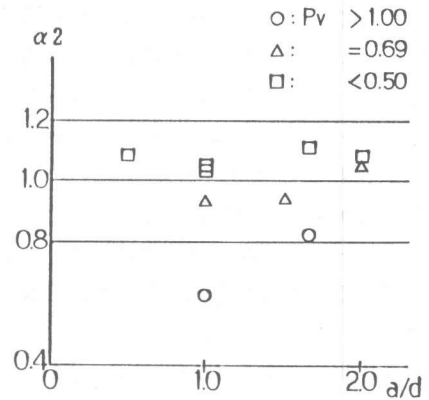


図-4 セン断耐力の計算結果

図-4は、(1)式と(3)式の和に対する実験値の比 $\alpha 2 = V_t / (V_c + V_s)$ を a/d およびスターラップによるせん断補強比 $p_v = 100A_v / (S_1 \cdot b_w)(\%)$ との関係で示したものであり、 a/d が小さくなるほど、また $p_v(\%)$ が大きくなるほどスターラップの効果が小さくなる傾向が見られる。

3-2. 水平補強鉄筋の効果について

水平補強鉄筋を有する供試体においても、実験値 V_t は二羽式の値 V_c を上回っており水平補強鉄筋の効果があることが認められた。その効果の大きさを比べるために、 $\Delta V = V_t - V_c$ を求めて図-5に示すと、 a/d が小さくなると水平補強鉄筋の効果は大きくなる傾向があるようである。

ところで、水平補強鉄筋を有するディープビームのせん断耐力は、石橋らによって次式が提案されている³⁾。

$$V_h = \alpha \cdot (f_c')^{1/3} \cdot \beta p \cdot \beta d \cdot b_w \cdot h \cdots (4)$$

以上において、

$$\alpha = 3.17(a_1/h)^{-1.166} \quad \text{ただし、} \quad 2.25 \geq a_1/h \geq 0.90$$

$$= 12 / \{1 + 2.67(a_1/h)^{1.2}\} \quad 0.90 > a_1/h \geq 0$$

$$\beta p = p_w^{1/3}, \quad \beta d = (100/h)^{1/4}, \quad p_w = 100A_s / (b_w \cdot h)$$

h : 桁高(cm)

a_1 : 載荷板前面から支承板前面までのせん断スパン(cm)

b_w : 断面幅(cm),

$A_s = A_{s1} \cdot a_1/h + A_{s2} \cdot d_2/h + \cdots + A_{si} \cdot d_i/h$

A_{si} : i 段目の水平鉄筋の断面積(cm^2)

d_i : i 段目の水平鉄筋から圧縮部端までの距離 (cm)

ただし、水平鉄筋が圧縮鉄筋となる場合には考慮しない。

(4)式による計算値 V_h 、ならびに V_h と実験値との比 $\alpha 3 = V_t / V_h$ を表-3に示す。図-6は水平補強鉄筋の補強比 $p_h = 100A_h / (S_2 \cdot b_w)$ と $\alpha 3$ の関係を示したものでありすべての供試体において石

表-3 実験値と計算結果(水平補強鉄筋)

供試体	V_t (tonf)	V_c (tonf)	V_h (tonf)	ΔV (tonf)	$\alpha 3$
SH40-1	12.00	9.19	12.85	2.81	0.93
SH40-2	14.60	9.85	15.77	4.75	0.93
SH26.5-1	17.10	14.04	20.14	3.06	0.85
SH26.5-2	20.60	15.11	24.78	5.49	0.83
SH13.3-1	28.95	23.74	36.80	5.21	0.79
SH13.3-2	31.60	23.50	43.41	8.10	0.73

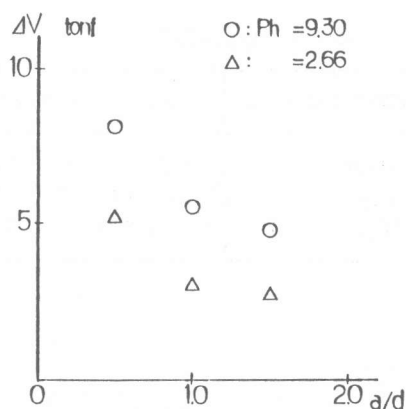


図-5 水平補強鉄筋の効果

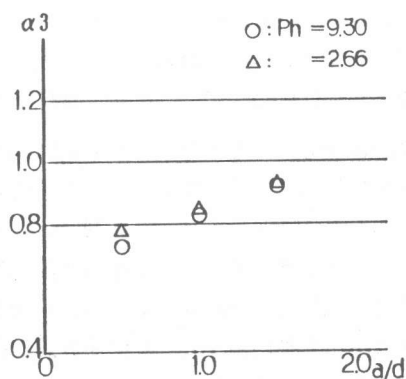


図-6 石橋らの式の精度

橋らの式は過大評価していることがわかった。

次に、 $a/d=0.5$ の供試体SH13.3-2における水平鉄筋のひずみを図-7に示す。図-7によれば、引張側の水平補強鉄筋には、載荷初期段階から破壊まで引張ひずみが見られる。しかし、圧縮側の水平補強鉄筋においては、載荷後まず圧縮ひずみが見られるが、その後徐々に圧縮ひずみが減少し、やがて引張ひずみとなって破壊に至っている。

図-8は、破壊時における水平補強鉄筋の実測ひずみと弾性理論に基づいて計算したひずみ分布を比較したものである。これより $a/d=1.5$ の供試体では、ほぼ計算値と同じく線形的にひずみが発生しているようであるが、 $a/d<1.0$ では計算値よりも大きいひずみが見られ、平面保持の原則が成り立っていないと思われる。

4. スターラップを有するディープビームのせん断耐力

前述したようにスターラップの効果は、 a/d が小さくなるほど又 $p_v(\%)$ が大きくなるほどトラス理論に比べて小さくなる傾向がみられたが、更に既往の実験データを集めて検討したところ、同じような傾向がみられた。使用したデータを表-4に示す⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。そこで、 a/d と $p_v(\%)$ の関数である低減係数 ϕ を導入してせん断耐力を推定することにした。すなわち、せん断耐力 V_{cal} は、

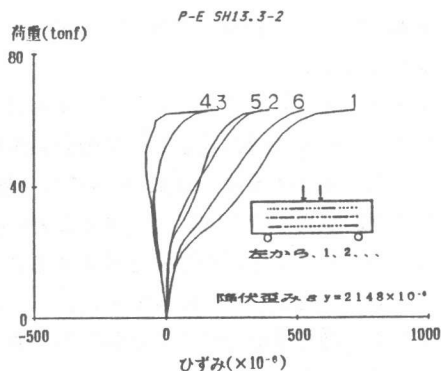


図-7 水平補強鉄筋のひずみ

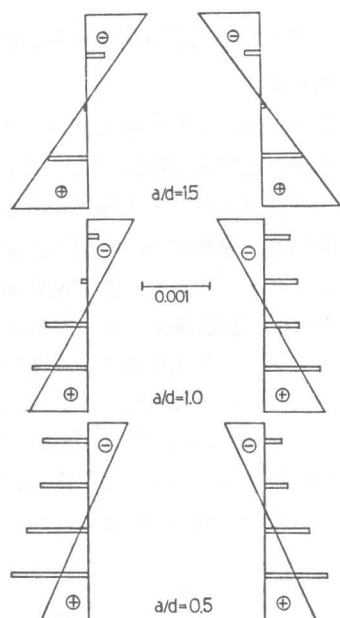


図-8 水平補強鉄筋のひずみ分布

$$V_{cal} = V_c + \phi V_s \quad \dots (5)$$

$$\phi = k + l \cdot (a/d) + m/pv$$

(ただし、 $0.0 \leq \phi \leq 1.0$ k, l, m は係数)

効果が減少していると思われた $pv \geq 0.6\%$ のデータに対して、最小2乗法によって係数を決定したところ $k = -0.17, l = 0.30, m = 0.33$ となった。実験値と(5)式を用いて得られた結果との比 V_t/V_{cal} を計算すると、30のデータにおいて平均値1.01、変動係数13.0(%)とほぼ精度良く推定できた。

5. まとめ

本研究における結果を簡略にまとめると次のようになる。

(1) ディープビームビームにおいてもスターラップはせん断補強鉄筋としての効果が認められた。その効果は、 a/d が小さくなるほど、また $pv(\%)$ が大きくなるほど小さくなる傾向があった。そこで低減係数 ϕ を導入することによってその効果をほぼ推定できた。

(2) 水平補強鉄筋もせん断補強効果があることが認められた。しかしそのせん断耐力は、石橋らの提案式によるよりも低かった。

なお、本研究は文部省平成元年度科学研究費補助金によって行なったことを付記する。

6. 参考文献

- (1) 二羽淳一郎；FEM解析に基づくディープビームのせん断耐荷力算定式、第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、1983.10.
- (2) 土木学会コンクリート標準示方書（設計編）昭和61年制定.
- (3) 石橋忠良、斎藤啓一、寺田年夫；せん断スパン比の小さいRCはりのせん断補強効果について、コンクリート工学年次論文報告集 9-2, 1987.
- (4) 古内 仁、児玉豊治、角田与史雄；鉄筋コンクリートディープビームのせん断補強に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集 11-2, 1989.
- (5) de Paiva H.A. Rawdon, and Siess Chester P., "Strength and Behavior of Deep Beams in Shear," Proceedings, ASCE, V.91, ST5, Oct., 1965, pp.19-41.
- (6) Kong Fung-Kew, Robins Peter J., and Coie David F., "Web Reinforcement Effects on Deep Beams," ACI Journal, Proceedings, V.67, No.12, Dec., 1970, pp.1010-1017.

表-4 既往の実験データ

研究者	データ数	a/d	pv(%)
Paiva	3	1.0	1.09~1.31
Kong	10	0.4~1.2	0.52~2.45
児玉	7	1.4~1.8	0.48~0.92

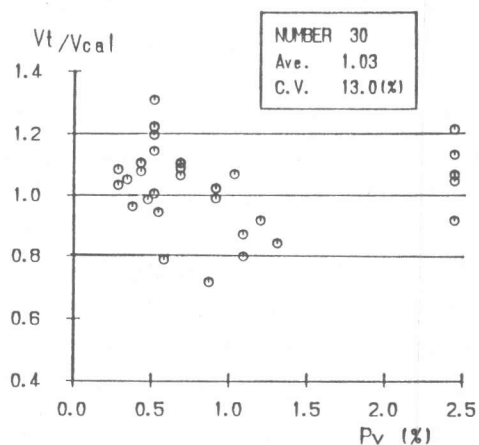


図-9 修正したトラス理論の精度