

論文

[2055] 鉄筋の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

正会員 ○ 古内 仁 (北海道大学工学部)

児玉 豊治 (北海道大学工学部)

正会員 角田与史雄 (北海道大学工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリートディープビームのせん断力に対する設計方法は、普通のはりとは異なるのが通例であり、各国の示方書にその方法が与えられているが、せん断補強鉄筋の効果に関しては相互に異なる内容となっている。土木学会コンクリート標準示方書¹⁾によれば、ディープビームのせん断補強鉄筋の効果は考えないこととしているが、これは従来十分な研究がなされていないための安全側の近似と考えられている。本研究では、ディープビームのせん断補強鉄筋としてスタールップと腹部水平鉄筋の影響を検討する。

2. 実験方法

供試体は図-1に示すように幅 15 cm、有効高さ 26.5cm の長方形断面を有する鉄筋コンクリート部材で、その配筋状況を図-1および表-1に示す。主鉄筋（ここでは最下段の水平鉄筋を主鉄筋と呼ぶ）はすべて 2D25 からなり鉄筋比は 2.55 % である。せん断補強筋は、垂直スタールップ、水平鉄筋（最下段および最下段を除く）、およびそれらの組合せとした。せん断補強鉄筋量およびせん断スパン比 a/d を変化させた。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は 50 ~ 55 %、目標強度

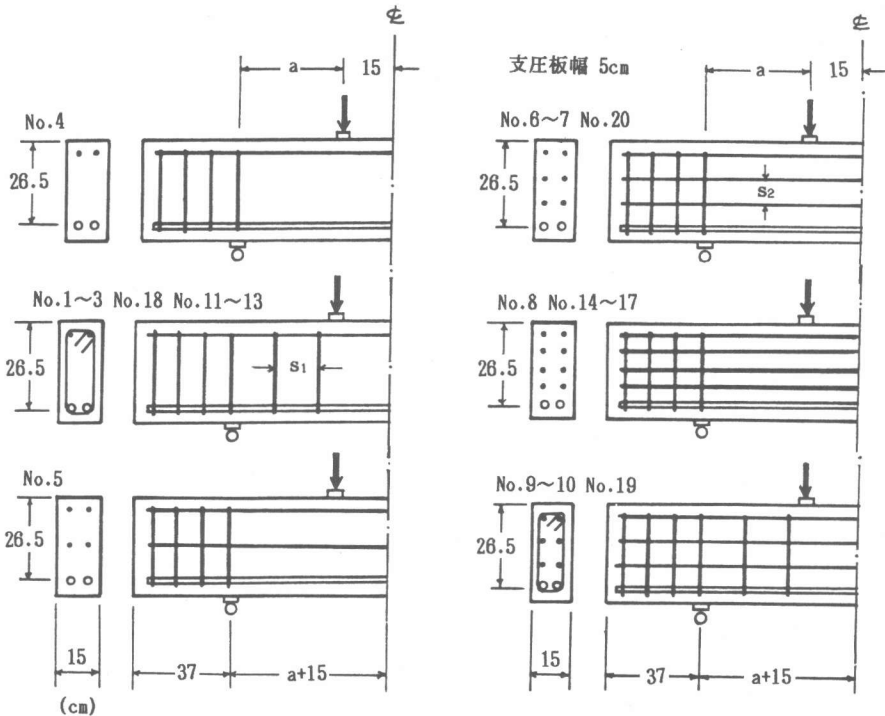


図-1 供試体の形状寸法

は 200kgf/cm² および 300kgf/cm² であり、材令7日で実験を行った。載荷は対称の二点集中荷重で行った。なお、せん断スパン内のスターラップのひずみの測定を行っている。

表-1 供試体諸元

No	a (cm)	スターラップ			水平鉄筋			強度 f_c' (kgf/cm ²)	V_{test} (tonf)
		種類	本数	間隔 s_1 (cm)	種類	本数	間隔 s_2 (cm)		
1	38	2D10	3	10	—	—	—	299	14.75
2	38	2D10	2	15	—	—	—	151	11.65
3	38	2D10	1	23	—	—	—	169	13.50
4	38	—	—	—	—	—	—	180	9.50
5	38	—	—	—	2D10	1	12	160	11.50
7	38	—	—	—	2D10	2	8	178	13.00
8	38	—	—	—	2D10	3	6	198	11.40
9	38	2D10	2	15	2D10	2	8	239	17.00
10	38	2D10	1	23	2D10	2	8	213	14.50
11	38	2D10	5	9.5	—	—	—	184	17.50
12	48	2D10	5	9.5	—	—	—	196	15.95
13	48	2D10	3	16	—	—	—	195	13.40
14	48	—	—	—	2D19	3	6	152	9.00
15	38	—	—	—	2D19	3	6	188	12.75
16	28	—	—	—	2D19	3	6	201	17.75
17	18	—	—	—	2D19	3	6	186	25.15
18	38	2D6	4	8	—	—	—	378	19.70
19	38	2D6	4	8	2D6	2	8	308	22.50
20	38	—	—	—	2D6	2	8	325	19.90

注1) スターラップ本数は、せん断スパン内の本数。
注2) 水平鉄筋本数は、最上段および最下段を除く。

3. 実験結果および考察

供試体は、すべてせん断圧縮破壊をした。供試体のコンクリート強度 f_c' およびせん断耐力 V_{test} を表-1に示す。せん断補強鉄筋コンクリートはりおよびディープビームのせん断耐力を算定する方法として、二羽らは次式を提案している。²⁾³⁾

はりとしてのせん断耐力

$$V_c = 0.94(p_w \cdot f_c')^{1/3} (100/d)^{1/4} \{0.75 + 1.4/(a/d)\} b_w \cdot d \quad (1)$$

ディープビームとしてのせん断耐力

$$V_{w1} = 0.53(f_c')^{2/3} (1 + \sqrt{p_w}) (1 + 3.33 \cdot r/d) b_w \cdot d / \{1 + (a/d)^2\} \quad (2)$$

スターラップまたは折曲げ鉄筋によるせん断耐力の増加量としては、一般にトラス理論が用いられている。

$$V_{s1} = A_w \cdot f_{wy} (\sin \alpha + \cos \alpha) z / s_1 \quad (3)$$

以上において f_c' :コンクリート強度(kgf/cm²) d :有効高さ(cm) a :せん断スパン(cm)
 b_w :断面幅(cm) A_s :主鉄筋量(cm²) p_w :鉄筋比(=100 $A_s/b_w d$)
 r :載荷板幅(cm) $Z=d/1.15$
 A_w :せん断補強鉄筋量(cm²) s_1 :せん断補強鉄筋水平間隔(cm)

α :せん断補強鉄筋と部材軸のなす角 f_{wy} :せん断補強鉄筋降伏強度(kgf/cm²)

以上の式による各供試体のせん断耐力の計算値を表-2に示す。なお、 V_{w1} が V_c より大きい場合がディープビームに相当するが、すべての供試体がこれに該当したので、 V_c の値は省略した。また、ACI基準⁴⁾ではディープビームのせん断耐力の算定法として次式を与えている。そこでは、せん断補強鉄筋として垂直スターラップおよび水平鉄筋の効果を考慮している。コンクリートの受け持つせん断耐力

$$V_{w2} = (3.5 - 2.5 \cdot M_u / (V_u \cdot d)) \cdot (1.9 \sqrt{f_c'} + 2500 \cdot p_w \cdot V_u \cdot d / M_u) b_w \cdot d \quad (4)$$

せん断補強鉄筋の受け持つせん断耐力

$$V_{s2} = (A_w / s_1 \cdot (1 + \ell_n / d) / 12 + A_h / s_2 \cdot (11 - \ell_n / d) / 12) f_y \cdot d \quad (5)$$

ここに

V_u :検断断面(本実験の場合は支点から0.5aの位置)のせん断力

M_u :検断断面の曲げモーメント p_w :鉄筋比 d :有効高さ b_w :断面幅

f_c' :コンクリート強度 ℓ_n :純スパン f_y :せん断補強鉄筋降伏強度

A_w :垂直スターラップの断面積(s_1 はその間隔) A_h :水平鉄筋の断面積(s_2 はその間隔)

上式による各供試体のせん断耐力の計算値は表-2に示す。ただし、せん断強度鉄筋による耐力は、垂直スターラップによる成分 V_{sv} と水平鉄筋による成分 V_{sh} とに分けて表してある。なお、ACI基準では A_w 、 A_h の最小値および s_1 、 s_2 の最大値の規定が設けられているが、ここでは考慮していない。

石橋らは⁵⁾、ディープビームにおけるせん断補強鉄筋としての水平鉄筋の効果について研究し、

表-2 せん断耐力計算結果

No	V_{w1} (tonf)	V_{s1} (tonf)	V_{w2} (tonf)	V_{sv} (tonf)	V_{sh} (tonf)	V_{w3} (tonf)	V'_{w3} (tonf)	ΔV_1 (tonf)	ΔV_2 (tonf)	ΔV_3 (tonf)
1	13.03	11.75	10.17	4.38	—	11.42	11.42	1.72	4.58	—
2	8.27	7.83	8.45	2.92	—	9.09	9.02	3.38	3.20	—
3	8.91	5.11	8.70	1.90	—	9.44	9.44	4.59	4.80	—
4	9.29	—	8.84	—	—	9.64	9.64	0.21	0.66	—
5	8.59	—	8.58	—	7.64	9.48	9.27	2.91	2.92	0.21
7	9.22	—	8.82	—	11.50	9.88	9.61	3.78	4.18	0.27
8	9.90	—	9.07	—	15.33	10.48	9.95	1.50	2.33	0.53
9	11.23	7.83	9.54	2.92	11.50	10.90	10.60	5.77	7.48	0.30
10	10.40	5.11	9.24	1.90	11.50	10.49	10.20	4.10	5.26	0.29
11	9.43	12.37	8.89	4.61	—	9.71	9.71	8.07	8.61	—
12	7.02	12.37	5.90	5.51	—	7.55	7.55	8.93	10.05	—
13	7.00	7.34	5.89	3.27	—	7.54	7.54	6.40	7.51	—
14	5.93	—	5.49	—	60.97	8.33	6.94	3.07	3.51	1.39
15	9.57	—	8.94	—	67.21	11.74	9.78	3.18	3.81	1.95
16	14.44	—	13.55	—	73.45	17.14	14.28	3.31	4.20	2.85
17	19.86	—	21.16	—	79.69	24.09	20.08	5.29	3.99	4.01
18	15.24	4.96	10.91	1.85	—	12.35	12.35	4.46	8.79	—
19	13.29	4.96	10.26	1.85	3.89	11.68	11.53	9.21	12.24	0.15
20	13.78	—	10.42	—	3.89	11.89	11.74	6.12	9.48	0.15

水平鉄筋の影響を含む耐力の算定式として次式を提案している。

$$V_{w3} = \alpha \cdot (f_c')^{1/3} \cdot \beta_p \cdot \beta_d \cdot b_w \cdot d \quad (6)$$

ここに $\alpha = 3.58(a/d)^{-1.166}$ ($2.5 \geq a/d \geq 1.0$)
 $= 12 / \{1 + 2.35(a/d)^{1.2}\}$ ($1.0 > a/d \geq 0$)
 $\beta_p = (100 \cdot \rho_w)^{1/3}$ h: 桁高 a: セン断スパン
 $\beta_d = (100/d)^{1/4}$ d: 有効高さ b_w: 断面幅
 $\rho_w = A_s / (b_w \cdot d)$ $A_s = A_{s1} \cdot d_1 / h + A_{s2} \cdot d_2 / h + \dots + A_{si} \cdot d_i / h$
 A_{si} : i段目の水平鉄筋の断面積
 d_i : i段目の水平鉄筋から上面までの距離
 ただし、水平鉄筋が圧縮鉄筋となる場合には考慮しない

上式による各供試体に対する計算値を表-2に示す。まず、せん断補強鉄筋を持たない供試体 No.4では、実験値 V_{test} は二羽式およびACI基準式とほぼ一致しているとみなすことができる。次に垂直スターラップのみでせん断補強した供試体について見れば、実験値 V_{test} はすべて二羽式 V_{w1} よりも大きな値をとっており、スターラップの効果があることがわかる。

しかし、 V_{test} は V_{w1} とトラス理論式 V_{s1} の和 ($V_{w1} + V_{s1}$) を下回っており、ディープビームの場合にはトラス理論によるよりもせん断補強効果が低いことがわかる。いま、垂直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、 $k_1 = \Delta V_1 / V_{s1} = (V_{test} - V_{w1}) / V_{s1}$ を求め、 a/d との関係を描けば図-2に示すようである。これによれば a/d の減少に伴って k_1 は低下する傾向が見られる。なお、図中の ρ_w はせん断補強鉄筋比 ($A_w / (b_w \cdot s_1)$) を表すが、 ρ_w が大きいほど k_1 の低下が著しい傾向がみられる。

また、スターラップのひずみの測定値から得られた平均応力を(3)式の計算値 f_{wy} に代入したときの V_{s1} の計算値を V_{st} とおけば、 V_{st} / V_{s1} と ρ_w の関係は図-3に示すようである。これより V_{st} / V_{s1} は1を下回っており、 ρ_w の増加に伴い V_{st} / V_{s1} は減少するようである。これが上述のようにスターラップの効果がトラス理論を下回った主たる要因と考

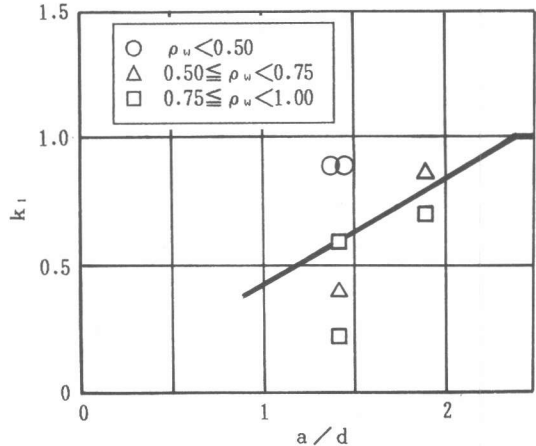


図-2 スターラップの効果と a/d の関係

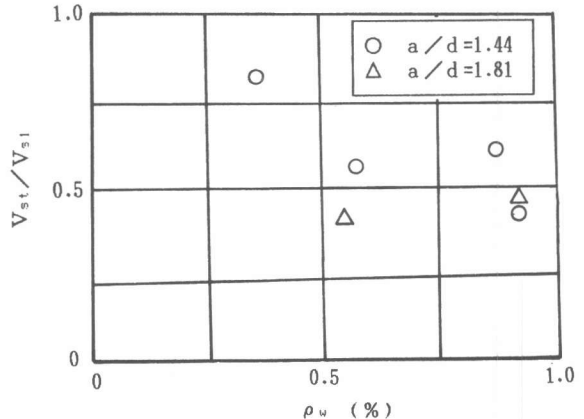


図-3 スターラップの測定値から求めたせん断力とトラス理論の比

えられる。ACI 基準式では、ディーブ
 ビームの場合のせん断補強鉄筋の効果に
 ついては前述のような実験式を与えてお
 り、スターラップに対してもトラス理論
 は用いていない。いま、実験値における
 スターラップの効果を $\Delta V_1 = (V_{test} - V_{w1})$ または $\Delta V_2 = (V_{test} - V_{w2})$ と
 みなしてACIによる計算値 V_{sv} と比較
 すれば、例えば、図-4に示されるよう
 に両者の間に良い相関性は見られない。

次に、水平鉄筋の効果について検討す
 る。まず、せん断補強鉄筋として水平鉄
 筋のみを有する供試体について、せん断
 耐力の実験値 V_{test} と、せん断補強鉄筋
 がないと仮定するときのせん断耐力の計
 算値 V_{w1} とを比較すれば、 V_{test} は V_{w1}
 を上回っており、水平鉄筋もスターラ
 ップと同様にせん断補強効果を有して
 いることがわかる。いま、水平鉄筋によ
 るせん断耐力の増加量として ΔV_1 を
 とり、水平鉄筋比 $\rho_h = A_h / (b_w \cdot s_2) = \text{一定}(0.062)$
 の場合について a/d との関係を求めれば、
 図-5に示すようであり、 a/d が大き
 くなるほど水平鉄筋による補強効果が
 小さくなる傾向がみられる。

次に、ACI 基準式による水平鉄筋の
 効果についての計算値 V_{sh} を実験値 ΔV_2
 と比較すれば、水平鉄筋のみで補強し
 た供試体のうち No.20 を除いて V_{sh} は
 ΔV_2 を大幅に上回っている。例として、
 供試体の No.14~17 の ΔV_2 と V_{sh} の
 比較を図-6に示す。以上のようにACI
 基準式では、水平鉄筋のせん断補強効
 果を過大に見積っていることがわかる。

石橋らの式は、水平鉄筋の効果を主鉄
 筋の項の割増しにより考慮することにし
 ている。表-2に示す計算値 V_{w3} を実験
 値 V_{test} と比較すれば、 V_{w3} が V_{test} を
 下回っている。また表-2にはせん断補
 強鉄筋を無視するときの(6)式による計

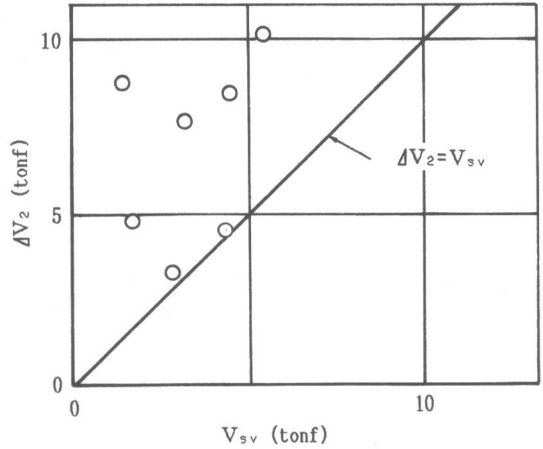


図-4 スターラップの効果に関するACI式と
 実験値の比較

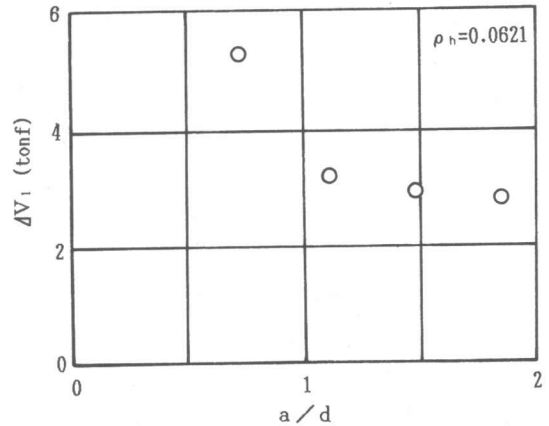


図-5 水平鉄筋の効果と a/d の関係

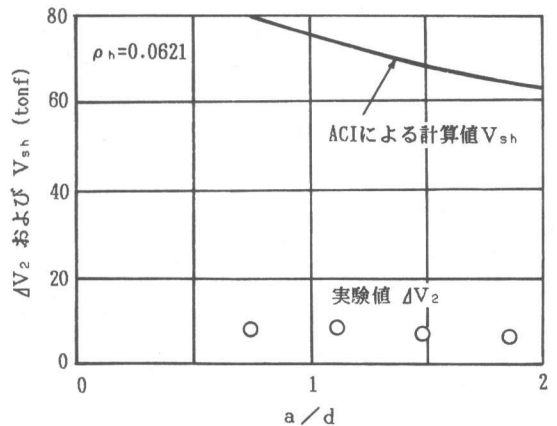


図-6 水平鉄筋の効果に関するACI式と実験値の比較

算値 V'_{w3} も併せて示した。この場合、 $\Delta V_3 = (V_{w3} - V'_{w3})$ が計算上の水平鉄筋の効果に相当するが、 ΔV_1 に比べて非常に小さい値となっている。一般的に言って、石橋らの式は水平鉄筋量がかなり大きい場合に効果が表れる傾向にあり、本研究のように比較的的水平鉄筋量が少ない場合の実験結果による評価は困難のように思われる。

次に、垂直スターラップと水平鉄筋の両者を用いた供試体 No.9、10 および 19 について見れば、せん断耐力の実験値 V_{test} はせん断補強鉄筋がないと仮定するときの計算値 V_{w1} を上回っており、やはりせん断補強鉄筋の効果がみられる。いま、スターラップのみの場合のスターラップの効果と水平鉄筋のみの場合の水平鉄筋の効果の和と、これらの供試体の実験値とを比較することにする。まず、スターラップの配置は、No.9 は No.2 と、No.10 は No.3 と、No.19 は No.18 と同じであるが、個々の実験値はばらつきがあるので、ここでは前に得られた $a/d=1.44$ の場合の k_1 の平均値 0.605 を用いて、 $k_1 V_{s1}$ よりスターラップの効果とみなせば、No.9 で 4.74 tonf、No.10 では 3.09 tonf、No.19 では 3.00 tonf となる。次に水平鉄筋の効果については、No.9 および 10 では、それらと同じ配置の No.7 の ΔV_1 をとり、No.19 では同じ配置の No.20 の ΔV_1 をとることにすれば、No.9,10 は 1.81 tonf、No.19 は 6.12 tonf となる。従って、スターラップの効果と水平鉄筋の効果の和をとれば、No.9 に対して 6.55 tonf、No.10 に対して 4.90 tonf、No.19 に対しては 9.12 tonf となる。実際の ΔV_1 の値はそれぞれ 5.77 tonf、4.10 tonf、および 9.21 tonf であり、上記の推定値と似た値となっている。このことは、スターラップの効果と水平鉄筋の効果は加算することができることを示唆するものである。

4. まとめ

本研究で得られた主な結果を挙げれば、次の通りである。

- (1) ディープ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働きをする。しかし、その効果はトラス理論による計算値に比べて小さく、 a/d の減少とともに効果が低くなる傾向にある。また、その傾向はスターラップ量が大きいほど著しい。
- (2) 水平鉄筋もディープビームのせん断補強鉄筋としての働きをする。その効果は a/d が小さくなるほど大きい。ACI基準では水平鉄筋の効果を取り入れているが、一般にかなりの過大評価をするようである。
- (3) スターラップおよび水平鉄筋を併用するときは、個々の効果を加算することができるようである。

本研究は、北海道大学の木村勉技官の多大な助力を得た。ここに深く謝意を表す。なお、本研究は文部省科学研究費（一般研究C No.63550345）の補助を受けて行ったことを付記する。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書 昭和61年制定
- 2) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村 甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度の再評価、土木学会論文集、1986、第372号/V-5、pp.167-176
- 3) 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回せん断コロキウム論文集、1983、pp.119-126
- 4) Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83)
- 5) 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、1987、第9巻2号、pp.311-316