

[2118] 高強度せん断補強筋を用いたはりのせん断圧縮破壊型 せん断終局強度算定式

正会員 ○福原正志（読売東京理工専門学校）
杉浦光義（読売東京理工専門学校）
豊田正敏（読売東京理工専門学校）

§ 1. はじめに

実験結果（文献1）を検討し、筆者等は従来よりせん断終局強度算定式は破壊モード別にせん断引張破壊型とせん断圧縮破壊型算定式の二つを提案することを基本方針にしている。そこで文献4でせん断引張破壊型の算定式（注釈1参照）を提案した。本報では、FEMマクロモデルによる数値解析結果ならびに実験結果を資料とし、せん断圧縮破壊に及ぼす影響因子ならびにその影響量を検討し、それらの結果を踏まえせん断圧縮破壊型せん断終局強度算定式の提案を行う。

§ 2. 数値解析結果の検討

ここではFEMマクロモデルを用いて求めた数値解析結果（文献2, 3）を資料とし、せん断補強筋量、主筋比がせん断圧縮破壊におよぼす影響を検討する。

2. 1 せん断補強筋の影響

1. 斜めひび割れ部分のせん断伝達力

図1は、文献3で紹介したFEMマクロ弾性解析モデルを用いた数値解析結果で、単位せん断力 Q_{unit} ($= 1.0 \text{ tonf}$) 下における斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力 (wQ_{unit}) とせん断補強筋比 p_w (%) との関係を示した図である。この図で wQ_{unit} は、 p_w が 1.0 (%) を過ぎる頃よりせん断補強筋のせん断伝達力は頭打ちになる傾向を示す。この様に、 p_w がある程度大きくなると斜めひび割れ部分のせん断補強筋が伝達するせん断伝達力は、せん断補強筋量の影響は少なくなることがわかる。

2. 部材端部の圧縮応力

図2は上記と同様、FEM数値解析結果で、せん断圧縮破壊した斜めひび割れ先端付近の圧縮応力の集中した部材端部のコンクリート要素の材軸方向の応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ (kgf/cm^2) とせん断補強筋比 p_w (%) との関係を示した図である。なお、この $c\bar{\sigma}_{unit}$ は、解析モデルに単位のせん断力 Q_{unit} ($= 1.0 \text{ tonf}$) を作用させたときの、圧縮部コンクリート要素の材軸方向の圧縮応力である。この図で p_w が約 1.0 (%) を超えると $c\bar{\sigma}_{unit}$ はほぼ一定の値を示している。この様に p_w がある程度大きくなると圧縮応力の集中した部材端部のコンクリート要素の材軸方向の応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ (kgf/cm^2) に、せん断補強筋量は余り関与

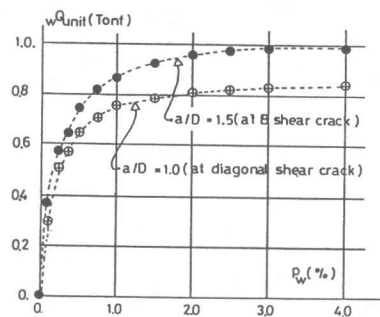


図1 斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力 wQ_{unit} とせん断補強筋比 p_w との関係

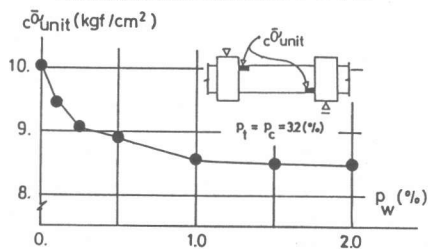


図2 圧縮部コンクリートの応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ とせん断補強筋比 p_w との関係

しなくなっている。それ故、せん断圧縮破壊モードのせん断終局強度にせん断補強筋量はあまり影響をおよぼさないことがこれら数値解析結果から推定できる。

3. $p_w \cdot w_{\sigma y}$ の影響量

図3は、文献1の高強度せん断補強筋を用いた実験結果(1)シリーズ)で、せん断スパン比 a/d が 1.1, コンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ が 281 kgf/cm^2 , 主筋比 $p_t (= p_c = 3.2\%)$ の一部である。つまり、せん断圧縮破壊したと考えられる $p_w \cdot w_{\sigma y}$ が 67 kgf/cm^2 以上の実験結果を選び、これら試験体のせん断終局強度と $p_w \cdot w_{\sigma y}$ との関係を示した図である。この図で、せん断圧縮破壊型はりのせん断終局強度におよぼすせん断補強筋量 $p_w \cdot w_{\sigma y}$ の影響量は、せん断引張破壊型せん断終局強度におよぼす影響量 ($\alpha \cdot p_w \cdot w_{\sigma y}$, 注釈1参照) と比べると少ない。また、そのせん断終局強度と $p_w \cdot w_{\sigma y}$ との関係の回帰直線を求めると下記(1)式で表わすことができる。

$$s\tau_u = 0.124 \cdot p_w \cdot w_{\sigma y} + 65.4 \quad \text{kgf/cm}^2 \quad \text{--- (1)}$$

2. 2 主筋比の影響

1. 主筋のせん断伝達力

図4は、 a/d が 1.5 の FEMマクロ解析モデル(文献3)に単位のせん断力 Q_{unit} を作用させ求めた数値解析結果で、斜めひび割れを横切る位置の主筋要素が伝達するいわゆるダボせん断伝達力 dQ_{unit} と、せん断補強筋比 p_w (%) との関係を示した図である。なお、主筋は引張側、圧縮側それぞれ2段配筋で主筋比は $p_t = p_c = 3.2$ (%)である。この図で、斜めひび割れを横切る主筋のせん断伝達力に関する解析結果について、圧縮側の主筋のせん断伝達力(●, ■)と引張側の主筋のせん断伝達力(○, □)とを比較すると、圧縮側の主筋のせん断伝達力の方が引張側の主筋のせん断伝達力よりかなり大きい。この様に、FEMマクロモデルを用い主筋量をパラメータにした数値解析結果では、主筋が対称に配筋された部材において斜めひび割れ部分のダボせん断伝達力は、引張側の主筋より、圧縮側の主筋の方が大きく、しかも、せん断補強筋比 p_w が 0 (%) の時(無補強試験体)最も大きく p_w の増加とともに減少する。しかし、せん断補強筋が約 1.0 %以上になると、その主筋のせん断伝達力は、概ねせん断補強筋比 p_w の影響をあまり受けない傾向を示した。

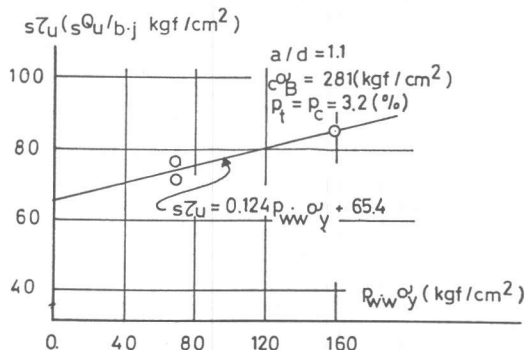


図3 せん断圧縮破壊型せん断終局強度と $p_w \cdot w_{\sigma y}$ との関係

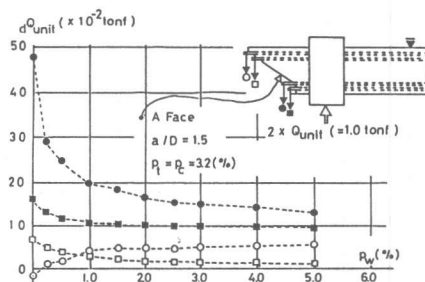


図4 斜めひび割れ面を横切る主筋のせん断伝達力と p_w との関係

2. $c\bar{\sigma}_{unit}$ におよぼす主筋比の影響

図5は、FEMモデルに単位のせん断力 $Q_{unit}(=1.0 \text{ tonf})$ を作用させ、その結果から求めた部材端部の斜めひび割れ先端付近の圧縮応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ と主筋比 ($pt = pc$) との関係を示した図である。この図で、この部材端部のコンクリート要素の圧縮応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ は、主筋比が大きくなるに従い減少する傾向を示す。これからコンクリート要素が先行して破壊するせん断圧縮破壊モードのせん断終局強度は、主筋比の影響が大きいことが推定できる。

3. せん断圧縮破壊推定強度

ここでは、前項の数値解析結果を受け、せん断圧縮破壊型はりのせん断終局強度を推定し、この推定強度におよぼす主筋比の影響量の検討を行う。

つまり部材端部のコンクリート要素の圧縮応力度 $c\bar{\sigma}_{unit}$ がコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ に達した時、せん断圧縮破壊が起こるものと仮定すれば、そのせん断圧縮破壊推定強度 $\tau\phi_c$ は、下記(2)式で求めることができる。

$$\tau\phi_c = (\phi_c \times Q_{unit}) / b_j \quad \text{kgf/cm}^2 \quad \text{--- (2)} \quad \phi_c = c\sigma_B / c\bar{\sigma}_{unit}$$

図6に、上記のせん断圧縮破壊推定強度 $\tau\phi_c$ と $p_w \cdot w\sigma_y$ との関係を示した。この図に解析した試験体と同じ条件の試験体、すなわち a/d 1.7, $c\sigma_B$ が 284 kgf/cm^2 , 主筋比 ($pt = pc$) が 3.2 %の実験結果をプロットしたものである。この図から、せん断圧縮破壊型せん断終局強度は $c\bar{\sigma}_{unit}$ がコンクリートの圧縮強度に達する推定強度を用いてある程度推定が可能であることがわかる。

4. せん断圧縮破壊推定強度におよぼす主筋比の影響

ここでは、先の推定強度 $\tau\phi_c$ におよぼす主筋比の影響量を調べるために、主筋比をパラメータにした数値解析を行った。図7に、このせん断圧縮破壊推定強度 $\tau\phi_c$ と主筋比 $pt(=pc)$ との関係を示した。図7の様に、推定強度 $\tau\phi_c$ におよぼす主筋比の影響量は大きく、その推定強度 $\tau\phi_c$ と $pt(=pc)$ との関係の回帰直線を求めると下記(3)式で表わせる。

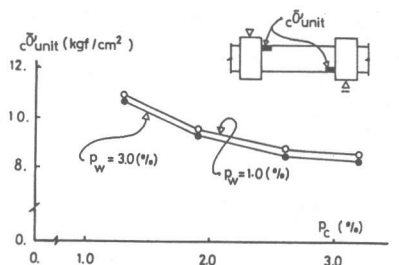


図5 圧縮部コンクリートの応力 $c\bar{\sigma}_{unit}$ と主筋比 $pt(=pc)$ との関係

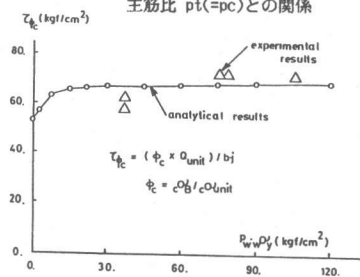


図6 せん断圧縮破壊推定強度と実験結果との関係

$$\tau\phi_c = 820 \cdot pc(=pt) + 42.8 \quad \text{--- (3)} \\ \text{ただし, } a/d = 1.7$$

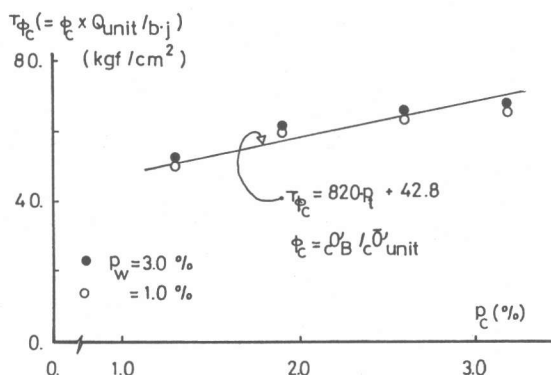


図7 せん断圧縮破壊推定強度と主筋比との関係

§3 実験結果の検討

ここでは表1に示す筆者が行った実験結果（文献1，資料数5）と既往の実験結果（文献9，資料数3）からせん断圧縮破壊と考えられる $p_w \cdot w_{\sigma y}$ が 66.8 ～ 159.3 kgf/cm² の範囲の実験結果を抽出しせん断圧縮破壊強度におよぼすコンクリート強度 $c\sigma_B$ と $\sqrt{d/a}$ の影響量を検討する。

3.1 $c\sigma_B$ の影響

まず，資料数が少ないがコンクリートの圧縮強度の影響量を，表1の中で a/d が 1.1 の5つのせん断圧縮破壊した資料を対象に検討を行う。これら5つの試験体は，せん断スパン比 a/d は全て 1.1と同じであるが，しかし， $p_w \cdot w_{\sigma y}$ ならびに主筋比が若干異なり，この条件のことなる実験結果からせん断圧縮破壊型終局強度におよぼすコンクリートの圧縮強度の影響を直接検討することはできない。そこでこれら実験結果からせん断終局強度におよぼす $p_w \cdot w_{\sigma y}$ ならびに主筋比の影響量を差し引き補正を行い，この値におよぼすコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ との関係を検討することにした。なお，この $p_w \cdot w_{\sigma y}$ ならびに主筋比の補正量は，前述した（1）式ならびに（3）式における $0.124 \cdot p_w \cdot w_{\sigma y}$ と $820 \cdot p_c$ から算出できるものとした。

図8は，この見掛けのせん断終局強度 ($s\tau_u - 0.124 \cdot p_w \cdot w_{\sigma y} - 820 \cdot p_c$) を縦軸に，横軸はコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ との関係を示した図である。この図で，見掛けのせん断終局強度はバラツクものの， $c\sigma_B$ が大きくなると幾分大きくなる傾向をがみられ，その回帰直線式を求めると下記（4）式が求まる。

$$\begin{aligned} (s\tau_u - 0.124 \cdot p_w \cdot w_{\sigma y} - 820 \cdot p_c) &= 0.154 \cdot c\sigma_B - 5.4 \quad \text{kgf/cm}^2 \quad - (4) \\ \text{ただし } a/d &= 1.1 \end{aligned}$$

3.2 $\sqrt{d/a}$ の影響

次に，表1の中で a/d が 0.72, 1.1, 1.7 の3種の形状の8個の実験結果からせん断終局強度におよぼす，せん断スパン比の逆数の平方根 $\sqrt{d/a}$ の影響量の検討を行う。

これら8個の試験体はコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ ，主筋比 $p_c (= p_t)$ ，ならびに $p_w \cdot w_{\sigma y}$ が若干異なり，この実験結果からせん断終局強度におよぼすせん断スパン比の逆数の平方根 $\sqrt{d/a}$ の影響量を直接に抽出できない。そこでまず，前項と同様に実験結果から $p_w \cdot w_{\sigma y}$ ならびに主筋比の影響量を差し引いた見掛けのせん断終局強度 ($s\tau_u - 0.124 \cdot p_w \cdot w_{\sigma y} - 820 \cdot p_c (= p_t)$) を算出し，先に求めたコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ の影響量 ($= 0.154 \cdot c\sigma_B$) で除し無次元化を行い，この見掛けのせん断終局強度影響係数とせん断スパン比の

表1 実験結果

specimens	a/d	$c\sigma_B$	$p_t = p_c$	p_w	$w_{\sigma y}$	$p_w \cdot w_{\sigma y}$	$s\tau_u$	remark
(1)-10	1.1	281	3.2	0.49	13880	68.0	76.6	Fukuhara's
(1)-11	1.1	281	3.2	0.47	14420	66.8	70.9	Data
(1)-12	1.1	281	3.2	1.12	14420	159.3	85.1	
(2)-9	1.7	324	3.2	0.56	13490	75.5	70.9	
(2)-10	1.7	324	3.2	0.56	13490	75.5	70.6	
SMB-III-2	0.72	251	2.4	2.25	3125	70.3	72.2	Arakawa's
SMD-III-1	1.1	267	2.4	2.25	3125	70.3	62.4	Data
SMD-III-2	1.1	258	2.3	2.25	3125	70.3	63.6	

a/d : shear span - to - depth ratio
 $c\sigma_B$: compressive strength of concrete (kgf/cm²)
 p_t and p_c : amount of tensile and compressive longitudinal reinforcement (%)
 p_w : amount of shear reinforcement (%)
 $w_{\sigma y}$: yield stress of shear reinforcement (kgf/cm²)
 $s\tau_u$: ultimate shear stress (kgf/cm²)

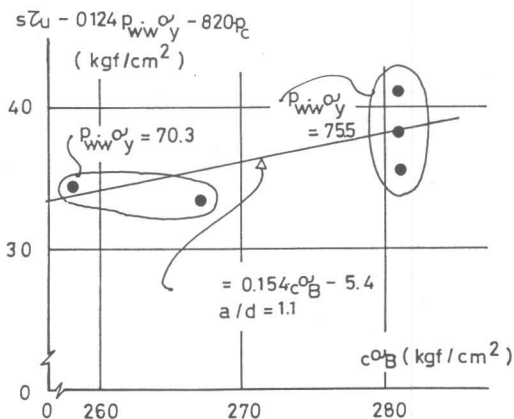


図8 見掛けのせん断終局強度とコンクリートの圧縮強度 $c\sigma_B$ との関係

逆数の平方根 $\sqrt{d/a}$ との関係を検討する。

図9は、この結果を示したものである。この図で縦軸は $\{ (s\tau u - 0.124 \cdot pw \cdot w\sigma y - 820 \cdot pc) / (0.154 \cdot c\sigma B) \}$ を示し、横軸は $\sqrt{d/a}$ である。図9に示すように、 $pw \cdot w\sigma y$ 、 $pc(=pt)$ 、 $c\sigma B$ 等の影響量の補正を行ったこの見掛けのせん断終局強度影響係数は、せん断スパン比の逆数の平方根 $\sqrt{d/a}$ にほぼ比例する傾向を示し、その回帰直線式を求めると下記(5)式で表わすことができる。

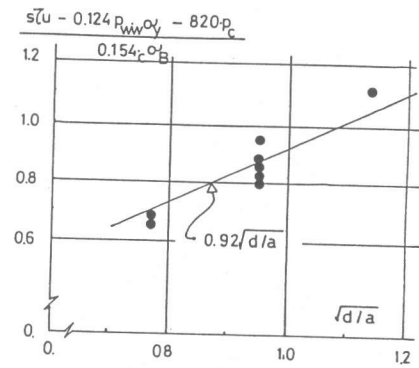


図9 見掛けのせん断終局強度影響係数と $\sqrt{d/a}$ との関係

$$\begin{aligned} & \{ (s\tau u - 0.124 \cdot pw \cdot w\sigma y - 820 \cdot pc) / (0.154 \cdot c\sigma B) \} \\ & = 0.92 \cdot \sqrt{d/a} \quad \text{--- (5)} \end{aligned}$$

3. $3 c\sigma B \cdot \sqrt{d/a}$ の影響量

(5)式からコンクリートの圧縮強度 $c\sigma B$ とせん断スパン比の逆数の平方根 $\sqrt{d/a}$ の積の影響量は下記(6)式のように表わすことができる。

$$\begin{aligned} & (s\tau u - 0.124 \cdot pw \cdot w\sigma y - 820 \cdot pc(=pt)) \\ & = (0.154 \cdot c\sigma B) \times (0.92 \cdot \sqrt{d/a}) = 0.14 \cdot c\sigma B \cdot \sqrt{d/a} \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{--- (6)} \end{aligned}$$

§. 4 高強度せん断補強筋を用いたはりのせん断圧縮破壊型せん断終局強度算定式の提案

(6)式から高強度せん断補強筋を用いたせん断圧縮破壊型はりのせん断終局強度推定式 $s\tau u$ は、下記(7)式が提案できる。

$$\begin{aligned} s\tau u &= 0.124 \cdot pw \cdot w\sigma y + 820 \cdot pc \\ &+ 0.14 \cdot c\sigma B \cdot \sqrt{d/a} \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{--- (7)} \\ &\text{ただし } pt = pc \end{aligned}$$

§. 5 結 び

本報では、FEMマクロモデルを用いて求めた数値解析結果、ならびに実験結果を資料とし、せん断圧縮破壊に及ぼす影響因子ならびにその影響量を検討した。次にそれら検討結果を踏まえ、文献4のせん断引張型破壊型せん断終局強度算定式の提案に続き、せん断圧縮破壊型せん断終局強度算定式(7式)の提案を行った。

なお、文献4ならびに本報で提案した算定式は推定式であり、実用式として用いる場合にはその適用範囲、ならびに妥当性を検証する必要がある。その適用性の検討は次報で行う。

謝辞：本研究を行うに際し、東京工業大学・教授・黒正清治博士、同助教授・滝口克己博士、同助教授・和田章博士には貴重なご助言を頂きました。紙面を借り厚く御礼申し上げます。

注釈1：文献4で提案したはりのせん断引張破壊型せん断終局強度算定式を下記に示す。

$$\text{stru} = \text{sru}(\text{pw}=0) + \alpha \cdot \text{pw} \cdot \text{w}\sigma_y \quad \text{kgf/c m}^2$$

ただし $\alpha = -5.09 \times 10^{-5} \text{w}\sigma_y + 1.7$

記号

stru ：せん断引張破壊型はりのせん断終局強度 (= sQu/b_j)

$\text{sru}(\text{pw}=0)$ ：荒川mean式の無補強はり($\text{pw}=0$)のせん断終局強度

α ：せん断補強筋の補強効果係数 pw ：せん断補強筋比 (%)

$\text{w}\sigma_y$ ：せん断補強筋の降伏強度 (kgf/ cm^2)

参考文献

- 1) 福原正志, 黒正清治：鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究 (梁の曲げせん断実験), 日本建築学会論文報告集, 第320号, 1982, 10
- 2) 福原正志：はりのせん断終局耐力付近における高強度せん断補強筋のせん断伝達力 (第2報 鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋の補強効果に関する実験研究), 日本建築学会論文報告集, 第339号, 1984, 5
- 3) 福原正志：斜めひび割れ付近におけるせん断抵抗要素のせん断伝達力に関するFEMを用いた数値解析による検討 (第3報 鉄筋コンクリート部材における高強度せん断補強筋お補強効果に関する実験研究) 日本建築学会論文報告集, 第355号, 1985, 9
- 4) 福原正志：高強度せん断補強筋を用いたはりのせん断引張破壊型のせん断終局強度算定式の提案, JCI 7th Conference 1985
- 5) 福原正志：はりのせん断終局耐力付近における斜めひび割れ近傍のせん断性状に関する解析的研究, 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 (日本コンクリート工学), Vol. 2, 1983
- 6) M.FUKUHARA, A.WADA and S.KOKUSHO : Shear Strength of Reinforced Concrete Beams with High Tension Shear Reinforcement, IABSE 12th Congress, Vancouver, Sep. 1984
- 7) 福原正志, 黒正清治：鉄筋コンクリート梁のせん断終局強度付近における斜めひび割れを横切る高強度せん断補強筋のせん断伝達力, 日本コンクリート工学年次講演会論文集, Vol. 5, 1983
- 8) 福原正志：高強度せん断補強筋を用いた鉄筋コンクリート梁のせん断終局強度 (せん断引張破壊型のせん断終局強度) 1985, 日本建築学会大会学術講演梗概集
- 9) 荒川卓：鉄筋コンクリート梁のせん断抵抗に関する研究, 北大工学部研究報告, 第25号, 1960
- 10) A.H.Mattock et al. : Stirrup Effectiveness in Reinforced Concrete Beams with Axial Force, Journal of Structural Division, Proc. of American Society of Civil Eng., Sep. 1971