

## [132] 高強度せん断補強筋を用いた梁のせん断引張破壊型の せん断終局強度算定式の提案

正会員 ○福原正志(東京工大工学部)

### §.1 研究の目的

高強度せん断補強筋がせん断終局強度に及ばず補強効果は、同量の普通強度せん断補強筋と比べ著しい効果を発揮することは、先の実験研究(文献1)で明らかになっている。本論文の目的は、この実験結果を資料とし高強度せん断補強筋を用いた梁のせん断終局強度算定式の提案を行なうことである。

本論文では、まず実験結果より破壊モードを検討し、せん断終局強度算定式はせん断引張破壊型のせん断終局強度算定式と、せん断圧縮破壊型のせん断終局強度算定式の二つの算定式を提案する必要があることを論じた後、ここでは紙面の関係で、せん断引張破壊型のせん断終局強度算定式の提案のみを行なっている。

### §.2 実験結果の検討とせん断引張破壊型のせん断終局強度算定を誘導する上での基本方針

#### 2・1 実験中の写真

写真1は、せん断補強筋の無い試験体のせん断破壊直後の写真である。この写真で見られる様に、せん断斜めひび割れが入って間もなく、部材は、せん断破壊した。一般にせん断補強筋は、この斜めひび割れを拘束するよう補強効果を発揮し、その結果せん断破壊を遅らせ、そしてせん断終局強度が上がるのである。写真2ならびに3は、このような状況を示したものである。写真2は、6mm筋のせん断補強筋が16cm間隔に入っている試験体のせん断破壊直後のせん断破壊面の状況であり、写真3は、6mm筋、6cm間隔のせん断破壊直後の状況である。このようにせん断補強筋が少ない場合(写真2)は、せん断補強筋の持っている拘束能力の最大能力を発揮した直後にせん断破壊していた。これは、いわゆるShear Tension Failureと言われるせん断引張破壊モードであった。一方せん断補強筋が多い場合(写真3)は、せん断補強筋がそれほど大きい損傷を受ける以前に、斜めひび割れ先端付近の圧縮部コンクリートが主筋の座屈を伴ってせん断破壊していた。これは、いわゆる、Shear Compression Failureと言われるせん断圧縮破壊モードであった。これらの写真からも判るように、せん断補強筋量の少ない部材は、このせん断補強筋が降伏すると、斜めひび割れを拘束する能力を無くしまもなくせん断破壊を誘発し、また一方、せん断補強筋量の多い試験体は、せん断補強筋が降伏強度に達する以前に圧縮部分が圧壊しせん断圧縮破壊していた。

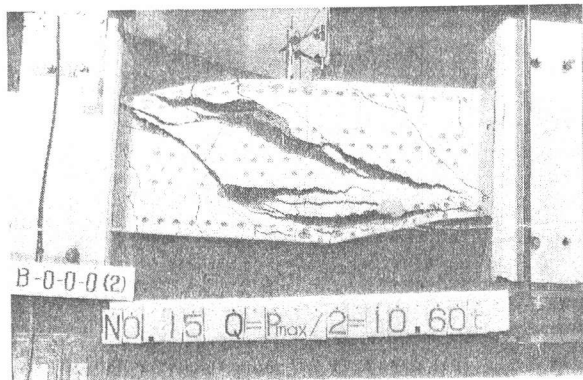


写真.1 無補強試験体の破壊状況

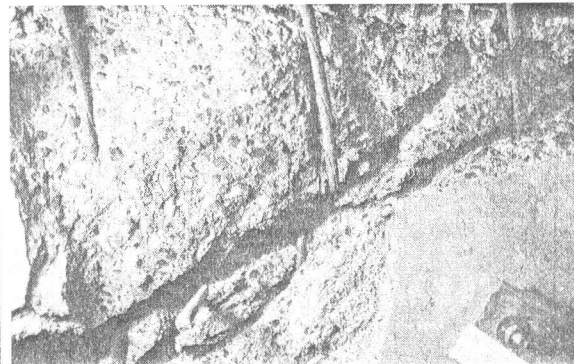


写真.2 補強筋の少ない場合の破壊状況

2・2 せん断補強筋の歪性状と  $p_w \cdot w \sigma_y$

図1は、 $p_w \cdot w \sigma_y$  の異なる  $a/D$  が1.0 の試験体の、実験中の補強筋の挙動をみるために、せん断補強筋の歪性状とせん断力との関係を示した図である。即ち、縦軸は、せん断補強筋の実験中の歪 ( $\epsilon$ ) とせん断補強筋の降伏歪 ( $\epsilon_y$ ) との比  $\epsilon / \epsilon_y$  を示し、横軸は、せん断力  $Q$  (tonf) を示した図である。この図に示すように、 $p_w \cdot w \sigma_y$  が  $36.1 \text{ kgf/cm}^2$  以下の試験体では、せん断補強筋が降伏歪 ( $\epsilon_y$ ) に達した後せん断破壊している。それに対して  $p_w \cdot w \sigma_y$  が  $47.2 \text{ kgf/cm}^2$  以上の試験体では、せん断補強筋の降伏歪 ( $\epsilon_y$ ) に達する以前でせん断破壊していた。2・3 せん断終局強度と  $p_w \cdot w \sigma_y$  との関係

図2は、 $a/D$  が1.0 の試験体の、せん断破壊時のせん断応力度  $s\tau_u$  (以下、この  $s\tau_u$  をせん断終局強度と言う) と  $p_w \cdot w \sigma_y$  との関係を示した図である。この図で見られるように、 $p_w \cdot w \sigma_y$  が約  $40 \sim 50 \text{ kgf/cm}^2$  までは、直線的に上昇する。それを過ぎると、せん断終局強度の上昇が急に緩慢になり、その後は、 $p_w \cdot w \sigma_y$  が増えてもせん断終局強度の上昇は、あまり期待出来なくなっていた。

2・4 せん断終局強度算定式を誘導する上の基本方針

以上、文献1の実験結果を資料にし、そのせん断終局強度と、せん断破壊モードの観点から検討した結果をまとめてみると次のようになる。

つまり、せん断終局強度は  $p_w \cdot w \sigma_y$  が小さい範囲では、せん断引張破壊モードであり、このモードのせん断終局強度は、 $p_w \cdot w \sigma_y$  に比例する傾向を示す。また一方、 $p_w \cdot w \sigma_y$  が大きくなると、せん断圧縮破壊モードを示し、このモードのせん断終局強度は、 $p_w \cdot w \sigma_y$  の影響はあまり受けなくなり、このモードの別れるのは、 $p_w \cdot w \sigma_y$  が約  $50 \text{ kgf/cm}^2$  付近と考えられる。

それ故に、せん断終局強度算定式を誘導するに当たって、この破壊モード別に二つのせん断終局強度式を提案することを基本方針とする。即ち、一つは、せん断引張破壊型のせん断終局強度算定式であり、もう一つはせん断圧縮破壊型のせん断終局強度算定式である。なおせん断終局強度算定値は、この二つの式で求めた小さい方を採用することとする。

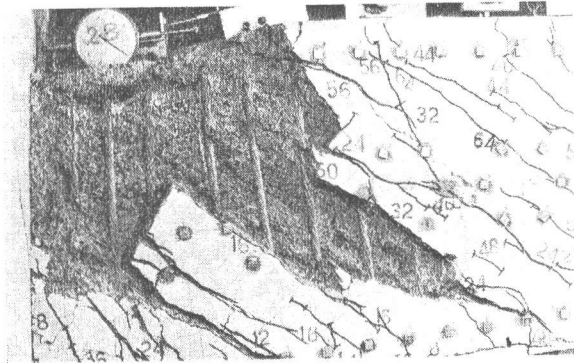


写真.3 補強筋の多い場合の破壊状況

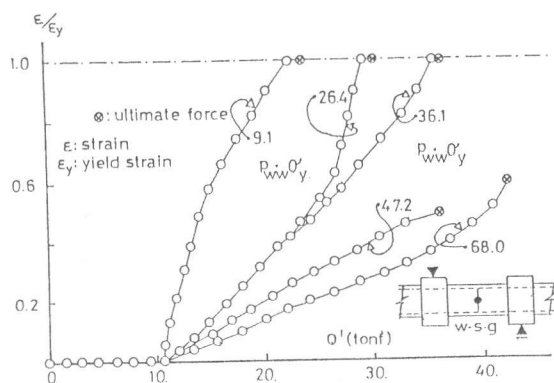


図.1 せん断力とせん断補強筋の歪との関係

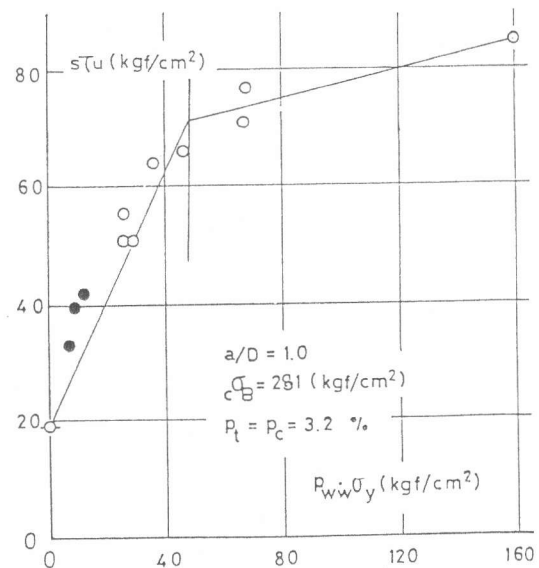


図.2 せん断終局強度と  $p_w \cdot w \sigma_y$  との関係

§.3 せん断引張破壊型の梁のせん断終局強度

3・1 はじめに

前節で検討したように、 $p_w \cdot w\sigma_y$  が小さい範囲では、せん断引張破壊モードを示し、このモードのせん断終局強度は、無補強のせん断終局強度を原点として  $p_w \cdot w\sigma_y$  に比例する傾向を示した。また一方、 $p_w \cdot w\sigma_y$  が大きくなると、せん断圧縮破壊モードを示し、このモードのせん断終局強度は、 $p_w \cdot w\sigma_y$  の影響はあまり受けなくなり、このモードの別れるのは、 $p_w \cdot w\sigma_y$  が約  $50 \text{ kgf/cm}^2$  付近であった。それ故に、このせん断引張破壊型のせん断終局強度  $stru$  を誘導するにあつては、文献 1 の実験結果の中から、 $p_w \cdot w\sigma_y < 50 \text{ kgf/cm}^2$  の実験結果を資料とし、算定式の型は、下記、(1) 式の様に表わすものとする。即ち、せん断引張型の終局強度 ( $stru$ ) は、せん断補強筋の無いせん断終局強度 ( $stru(p_w=0)$ ) と見掛けのせん断補強筋の補強効果 ( $\alpha \cdot p_w \cdot w\sigma_y$ ) との和とする。

$$stru = stru(p_w=0) + \alpha \cdot p_w \cdot w\sigma_y \quad \text{kgf/cm}^2 \quad \dots (1)$$

3・2 無補強梁のせん断終局強度

表 1 は、筆者の行なったせん断補強筋の無い試験体のせん断終局強度と下記、(2) 式を用いて求めた計算結果との比を示した表である。この(2) 式は、現在最も一般に知られる荒川mean式の無補強梁のせん断終局強度算定式である。この表に見られるように、無補強梁のせん断終局強度は荒川mean式(2式、 $stru(p_w=0)$ )で求めた値に比較的良く近似していた。そこで筆者も、(1) 式の第一項は、荒川が提案した無補強梁のせん断終局強度式を採用することにした。またせん断引張破壊型のせん断終局強度に及ぼすせん断スパン比 ( $a/d$ )、主筋比 ( $P_t$ )、コンクリートの圧縮強度 ( $c\sigma_B$ ) の影響量も、荒川式等と同様に(1) 式の第 1 項で表現できるものとする。

$$stru(p_w=0) = \{k_u \cdot k_p (180 + c\sigma_B) \cdot 0.12\} / (a/d + 0.12) \quad \dots (2)$$

記号  $stru(p_w=0)$ : 荒川式の無補強梁 ( $p_w=0$ ) のせん断終局強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$k_u$ : 荒川式に於ける断面寸法による補正係数

$k_p$ : 荒川式に於ける主筋比による補正係数

$c\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$a/d$ : せん断スパン比

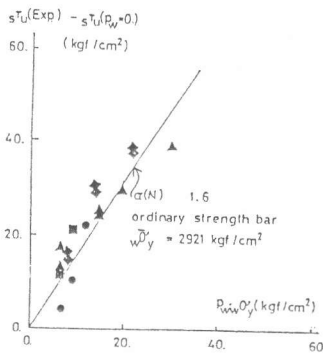


図. 3 普通強度せん断補強筋の補強効果係数

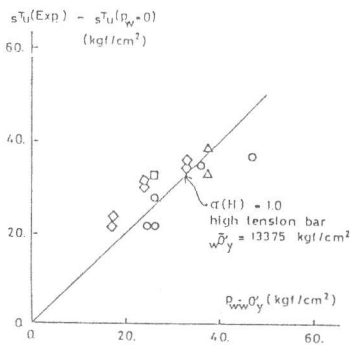


図. 4 高強度せん断補強筋の補強効果係数

表. 1 無補強試験体のせん断終局強度の検討

Specimens	$a/d$	$c\sigma_B$	$s_{\tau_u}$ (Exp)	$s_{\tau_u}$ (Exp)/Cal
(1)-1	1.1	281	19.1	0.65
(2)-1	1.7	324	20.5	0.90
(2)-2	1.7	324	19.8	0.86
(3)-1	2.2	281	15.9	1.10
(4)-1	1.7	199	16.8	0.98
(4)-2	1.7	199	20.5	1.19

$\bar{x} = 0.93$

$\sigma_w = 0.16$

$a/d$ : Shear Span Ratio

$c\sigma_B$ : Compressive Strength of Concrete

$s_{\tau_u} = Q_u / b_j$  ( $\text{kgf/cm}^2$ )

Cal:  $= \{k_u k_p (180 + c\sigma_B) \times 0.12\} / (a/d + 0.12)$

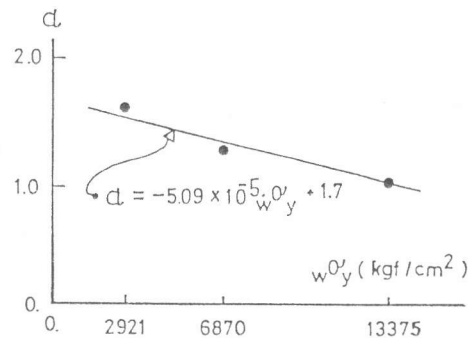


図. 5 補強効果係数  $\alpha$  と降伏強度  $w\sigma_y$  との関係

### 3・3 せん断補強筋の補強効果

#### 1. 降伏強度が2921 kgf/cm<sup>2</sup>のせん断補強筋の補強効果

図 3は、普通強度せん断補強筋の補強効果(  $\alpha \cdot pw \cdot w\sigma_y$  )を(2)式より求め {  $stru(Exp.) - stru(pw=0)$  } と、 $pw \cdot w\sigma_y$  との関係で示した図である。これは、資料数が17でその降伏強度が2550~3520 kgf/cm<sup>2</sup>な範囲であり、その平均値は2921 kgf/cm<sup>2</sup>の普通強度せん断補強筋を用いた試験体の補強効果を示した図である。この図から、(  $stru(Exp.) - stru(pw=0)$  )と、 $pw \cdot w\sigma_y$  との回帰直線を求めると、(3)式が求まる。

$$stru(Exp.) - stru(pw=0) = \alpha(N) \cdot pw \cdot w\sigma_y = 1.6 \cdot pw \cdot w\sigma_y \quad \text{---(3)}$$

降伏強度の平均値  $w\bar{\sigma}_y = 2921 \text{ kgf/cm}^2$

即ち、せん断終局強度に及ぼす普通強度せん断補強筋の補強効果は、(3)式で評価出来る。

#### 2. 降伏強度が6870 kgf/cm<sup>2</sup>の普通強度せん断補強筋の補強効果

資料数は1個であるが普通強度と高強度せん断補強筋のほぼ中間にある降伏強度のが6870 kgf/cm<sup>2</sup>のせん断補強筋の補強効果(  $stru(Exp.) - stru(pw=0)$  )と、 $pw \cdot w\sigma_y$  との関係を求めると  $\alpha$  は(4)式に示すように1.3であった。

$$stru(Exp.) - stru(pw=0) = \alpha \cdot pw \cdot w\sigma_y = 1.3 \cdot pw \cdot w\sigma_y \quad \text{---(4)}$$

降伏強度  $w\sigma_y = 6870 \text{ kgf/cm}^2$

#### 3. 降伏強度が13375 kgf/cm<sup>2</sup>の高強度せん断補強筋の補強効果

図 5は、高強度せん断補強筋のせん断終局強度に及ぼす補強効果(  $stru(Exp.) - stru(pw=0)$  )と、 $pw \cdot w\sigma_y$  との関係を示した図である。即ち、資料数が14でその降伏強度が12630~14420 kgf/cm<sup>2</sup>の範囲であり、その平均値は13375 kgf/cm<sup>2</sup>の高強度せん断補強筋を用いた試験体の補強効果を示した図である。普通強度せん断終局強度の補強効果を求めたと同様に、この図から、(  $stru(Exp.) - stru(pw=0)$  )と、 $pw \cdot w\sigma_y$  との回帰直線を求めると、(5)式が求まる。

$$stru(Exp.) - stru(pw=0) = \alpha(H) \cdot pw \cdot w\sigma_y = 1.0 \cdot pw \cdot w\sigma_y \quad \text{---(5)}$$

降伏強度の平均値  $w\bar{\sigma}_y = 13375 \text{ kgf/cm}^2$

即ち、高強度せん断補強筋のせん断終局強度に及ぼす補強効果は、(5)式で評価出来る。

#### 4. 降伏強度の異なるせん断補強筋の補強効果の一般式

ここでは、降伏強度が異なる一般の場合にも適用出来る、せん断補強筋のせん断補強筋に及ぼす補強効果の評価式を提案する。その方法は、図 5に示すように、前項で求めた降伏強度の異なる三つの場合のせん断補強筋の補強効果係数  $\alpha$  を直線補間して一般化する。その結果、降伏強度が異なるせん断補強筋のせん断終局強度に及ぼす補強効果係数  $\alpha$  として、(6)式を提案する。

$$\alpha = -5.1 \times 10^{-5} \cdot w\sigma_y + 1.7 \quad \text{---(6)}$$

### 3・4 せん断引張破壊型梁のせん断終局強度算定式の提案

実験結果を分析・検討しせん断終局強度算定式を導くための基本方針を定め、その方針に従って、せん断補強筋の補強効果に関する定量化をした結果、降伏強度の異なるせん断補強筋を用いた、せん断引張破壊型せん断終局強度算定式として(7)式が提案出来る。

$$stru = \{ku \cdot kp(180 + c\sigma_B) \cdot 0.12\} / (a/d + 0.12) + \alpha \cdot pw \cdot w\sigma_y \quad \text{---(7)}$$

ここで  $\alpha = -5.1 \times 10^{-5} \cdot w\sigma_y + 1.7$  他の記号は、(2)式参照

§.4 結論： 文献 1の実験結果を検討し、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のせん断終局強度算定式とせん断圧縮破壊型のせん断終局強度算定式の二つを提案する必要性を論じた後、本論文では、紙面の関係でせん断引張破壊型のせん断終局強度算定式のみを検討の対象とし、検討した結果(7)式が提案できた。 謝辞：本研究を行なうに当たり、東京工大工博・黒正教授、ならび

に同工博・和田助教授の御指導を得たことを紙面を借り深く感謝致します。

参考文献： 1)福原、黒正：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に関する実験研究、コンクリート工学年次講演会講演論文集、1980年