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の補強効果に関する実験研究

正 会 員 福 原 正 志*

§1. 序

本研究は、0.2 % Offset 法による耐力（以下、降伏強度という）が、約 13 tonf/cm² と高い強度を有する鉄筋をせん断補強筋として用いたとき、その降伏強度の有効な活用範囲を究明することを目的とした一連の研究の一部である。

第一報¹⁾（建論報 320 号）では、52 体の逆対称ばり型試験体（ $b \times D = 18 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$ ）を用いて、はりの曲げせん断実験を行い、従来あまり使用されていなかった高強度せん断補強筋を用いたはりのせん断終局強度に及ぼす補強効果を中心に報告した。

第 2 報²⁾（建論報 339 号）では、第 1 報の実験シリーズの中から、せん断スパン比が 1.5 の試験体を解析の対象に選び、初めから多数の斜めひび割れを入れた FEM マクロ弾性解析モデルを提案した。この解析モデルは、破壊時に生じている斜めひび割れを、初から組み込んだモデルであり、このような意味でこのモデルを FEM マクロ弾性解析モデルと呼んでいる。このモデルの妥当性を検討した後、せん断破壊にとって極めて重要な役割を果たす斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力等について検討した。

本報の目的は、先の FEM マクロ弾性解析モデルを用いて数値解析を行い、高強度せん断補強筋を用いたはりのせん断終局強度を評価するための基礎資料を得ることである。数値解析におけるパラメーターは、せん断スパン比 a/D (1.0 と 1.5)、せん断補強筋比 p_w (0~4.0 %)、ならびに主筋比 p_t (1.3~3.2 %) の 3 種である。

§2. 数値解析

2.1 FEM マクロ弾性解析モデル

Photo.1 は a/D が 1.0 の終局耐力近傍のひび割れ状況を示した写真の 1 例であり、Fig.1 は a/D が 1.0 の解析モデルである。この解析モデルは Photo.1 等の写真を参考に作成したもので、その特徴は試験体の一方の圧縮部端部からほかの一方の圧縮部端部に入れた Diag-

onal Shear Crack である。

Photo.2 は a/D が 1.5 の終局耐力近傍のひび割れ状況を示した写真の 1 例であり、Fig.2 はこれ等の実験結果を参考に作成した a/D が 1.5 の解析モデルである。この解析モデルの特徴は、斜めひび割れとして A, B, C の 3 種が逆対称に入れてあり、この解析モデルは、第 2 報²⁾でその妥当性を実験結果との対応で検討したモデルと同じものである。これ等二つの解析モデルの要素分割はコンクリートと主筋が三角形ならびに四角形要素に、せん断補強筋は線材要素に置換してある。Fig.3 は解析モデルの断面を、Fig.4 は主筋とコンクリート要素を結ぶボンドリンクを示したものである。また Fig.5 は、試験部に作用しているせん断力 Q_{unit} (=1.0 tonf) と斜めひび割れ部分を含むせん断破壊面のせん断抵抗要素のせん断伝達力 Q_w , Q_a , Q_c との関係を示したものである。これ等の関係は、下式のようになる。

$$Q_{unit} = Q_w + Q_c + Q_a \dots \dots \dots (1)$$

Q_{unit} : 試験部に作用している単位のせん断力
(=1.0 tonf)

Q_w : 斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力

Q_c : 斜めひび割れ先端付近のコンクリート要素のせん断伝達力

Q_a : 斜めひび割れを水平に横切る主筋のダボせん断伝達力

なお、 Q_w は Fig.6 に示すように斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力の総和を示したものであり、これはせん断補強筋に作用している引張り応力の総和である。

また Q_c , Q_a はコンクリートならびに主筋の面要素の節点に作用した等価節点力より求められる。

2.2 材料の定数

斜めひび割れ付近のせん断抵抗要素が分担するせん断伝達力は、材料の定数の値に伴って変化することが考えられる。そこで、斜めひび割れ部分を横切るせん断補強筋に作用するせん断伝達力の分担に、コンクリートのヤング係数 E_c ならびにボンドリンクのパネ剛性 xyK_b が

* 東京工業大学 助手

(昭和 59 年 6 月 6 日原稿受理日、昭和 60 年 5 月 2 日改訂原稿受理日、
討論期限昭和 60 年 12 月末日)

どの程度影響するかを調べるために予備解析(1)を行った。

コンクリートのヤング係数 E_c は $1.0 \sim 2.0$ ($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$) に変化させ、ボンドリンクのパネ剛性 $_{xy}K_b$ は、 $2.0 \sim 3.0$ (tonf/cm^3) に変化させた。なお、

ポアソン比はコンクリートが 0.167 ，鉄筋が 0.333 とした。

Fig.7 は、解析結果である。この図にみられるように、斜めひび割れ部分の補強筋に作用するせん断伝達力 wQ_{unit} に与えるボンドリンク $_{xy}K_b$ の影響はほとんどな

Photo.1 Behavior of the Cracks after Shear Failure ($a/D = 1.0$)

Fig.1 Analytical Model ($a/D=1.0$)

Photo.2 Behavior of the Cracks after Shear Failure ($a/D = 1.5$)

Fig.2 Analytical Model ($a/D=1.5$)

Fig.3 Actual Section of Analytical Models

Fig.4 Bond Links

Fig.5 Relation between the Shear Strength ($= Q_u$) and the Shear Transfer (Q_w , Q_c and Q_d)

Fig.6 Shear Transfer carried by Shear Reinforcement across the Inclined Crack (A)

Fig. 7 Results of the Reserve Analysis (1)

く、また、コンクリートのヤング係数 E_c を $1.0 \sim 2.0 (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$ に変化させても約 1 割程度の影響がみられるに過ぎない。そこで、本解析ではこれ等予備解析結果を踏まえ、コンクリートのヤング係数 E_c を $2.0 (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$ とし、またボンドリンクのバネ剛性は森田⁷⁾、野口⁶⁾、黒正⁵⁾等の研究結果をも参考にし、鉛直方向 yK_b 、水平方向 xK_b とも $2.0 (\text{tonf/cm}^3)$ とした。

2.3 ダボ剛性に及ぼす要素分割の影響

斜めひび割れを横切る主筋のダボ剛性いかなでは、せん断抵抗要素のせん断伝達率に微妙な影響を及ぼすことが懸念される。そこで斜めひび割れを横切る主筋のダボ剛性に及ぼす要素分割、ならびにひび割れ付近の付着剛性の影響をみるために Fig. 8 に示すように、ひび割れを横切る主筋をモデル化したテスト用モデルを作成し、予備解析 (2) を行った。またこのモデルの断面を示したのが Fig. 9 である。この解析ではテスト用モデルの要素の大きさを $5.0, 2.5, 1.25 \text{ cm}$ の 3 種に変化させ、さらにひび割れ部分では付着剛性が喪失すると考えられ、その喪失長さがダボ剛性にどの程度影響するかを把握するために付着剛性を 0 とした長さ L_0 を $1.25 \sim 7.5 \text{ cm}$ に変化させ解析した。その結果を示したのが Fig. 10 である。この図が示すように、同じ L_0 で比較した場合、要素分割を小さくすれば主筋の変形は大きくなり、また、同じ大きさの要素分割では L_0 を大きくすると主筋の変形も大きくなり、ダボ剛性としては少なくなる。

Table 1 Results of the Preparative Analysis (1)

No.	E_c	K_b	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(Σ)
1	2.0	3.0	81	132	131	90	25	459
2	2.0	2.5	85	132	130	88	23	458
3	2.0	2.0	89	131	128	84	20	452
4	1.5	3.0	84	136	136	94	24	474
5	1.5	2.5	88	136	135	92	22	473
6	1.5	2.0	92	135	134	88	20	469
7	1.0	3.0	89	146	153	106	20	514
8	1.0	2.5	94	147	152	103	19	515
9	1.0	2.0	99	146	150	99	16	510

E_c : Young's Modulus of Concrete Element

($\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$)

K_b : ($= xK_b = yK_b$) Stiffness of Bond Links Spring (tonf/cm^3)

(1)-(5): Shear Transfer of Shear Reinforcement under unit Load ($=1000. \text{ kgf}$)

本解析モデルの要素分割は 5 cm であり、ひび割れ部分の付着喪失長さ L_0 も 5 cm であるが、Fig. 10 にみられるように、 5 cm メッシュ、 L_0 が 5 cm の主筋の変形は、要素分割 1.25 cm 、 L_0 が 2.5 cm にほぼ等しい。

一般に、FEM 解析では要素分割を小さくすればする程精算解に近くなること、また既往⁵⁾の付着の両引き試験結果では、ひび割れ面から主筋径の $1.5 \sim 2.0$ 倍の範囲の付着剛性は極端に少なくなることが報告されている。このことを考えると、今回の予備解析 (2) で要素分割 5 cm で付着剛性を 0 にした長さ L_0 が 5 cm の解析結果のダボ剛性が、要素分割 1.25 cm 、 L_0 が 2.5 cm のダボ

Fig. 8 Model of the Preparative Analysis (2)

Fig. 9 Actual Section of the Preparative Analytical Model (2)

Fig. 10 Results of the Preparative Analysis (2)

剛性にほぼ等しいことは、要素分割が5.0 cm L_0 が5.0 の本解析モデルは、精算解に近いダボ剛性で解析しているものと考えられる。

§3. 解析結果の検討

3.1 パラメーター解析結果

数値解析は、 a/D が1.5の解析モデルを用いたものを36ケース、 a/D が1.0の解析モデルを用いたものを11ケース行った。Table 2に a/D が1.5の場合の解析結果を示した。パラメーターとしては、せん断補強筋比 p_w (0~4.0 %), せん断補強筋の降伏強度 $w\sigma_y$ (3 000~12 000 kgf/cm²), 主筋比 p_t , p_c (1.9, 2.6, 3.2 %) の3種類である。

3.2 せん断スパン比の影響

せん断スパン比 a/D の影響をみるために行った Diagonal Shear Crack を有する a/D が1.0の解析モデル (Fig.1) ($p_w=1.0$ %, $p_t=p_c=3.2$ %) を用いて解析した結果と多数の Inclined Shear Crack を有する

a/D が1.5の解析モデル (Fig.2) ($p_w=1.0$ %, $p_t=p_c=3.2$ %) を用いて解析した結果とを以下に示す。なお、これ等解析結果は試験部分に単位のせん断力 Q_{unit} ($=1.0$ tonf) を作用させたときの応力状態である。

1. 圧縮主応力分布

Fig.11は、 a/D が1.0の、また Fig.12は a/D が1.5の圧縮主応力分布の解析結果の比較を示したものである。

a/D が1.0の特徴は、試験部分の一方の端部の圧縮側からほかの一方の圧縮側に Diagonal Shear Crack に沿って対角線状に力が集中して流れている。一方、 a/D が1.5の特徴は、 a/D が1.0の結果に比較して端部の圧縮部コンクリート要素に応力が集中し、その応力の流れは広い範囲に分散する結果を得た。

2. 主筋の応力分布

Fig.13は a/D が1.0の、また Fig.14は a/D が1.5の主筋における材軸方向の応力分布の解析結果の比較を示したものである。いずれの解析結果も主筋に生じる引張り応力が、試験部中央の反曲点を越え、その引張り領域が大きくなっていた。また、圧縮応力を受ける部分に

Table 2 Analytical Parameters and Results

No.	p_w (1)	$w\sigma_y$ (2)	$p_{w\sigma_y}$ (3)	$p_t=p_c$ (4)	wQ_{unit} (5)	dQ_{unit} (6)	$c\sigma_{unit}$ (7)	bW_{unit} (8)
— $p_{w\sigma_y}$ Series —								
1.	0.0	3000.	0.0	3.2	0.	95.	101.	4.1
2.	0.10	3000.	3.0	3.2	377.	68.	95.	2.9
3.	0.25	3000.	7.5	3.2	573.	57.	91.	2.2
4.	0.33	3000.	9.9	3.2	639.	55.	90.	2.0
5.	0.50	3000.	15.0	3.2	737.	52.	89.	1.7
6.	0.75	3000.	22.5	3.2	818.	51.	87.	1.4
7.	1.00	3000.	30.0	3.2	866.	51.	86.	1.3
8.	1.50	3000.	45.0	3.2	922.	50.	86.	1.1
9.	2.00	3000.	60.0	3.2	947.	50.	85.	1.0
10.	2.50	3000.	75.0	3.2	951.	49.	85.	1.0
11.	3.00	3000.	90.0	3.2	951.	49.	84.	0.9
12.	4.00	3000.	120.0	3.2	952.	48.	84.	0.9
— $w\sigma_y$ Series —								
13.	1.00	3000.	30.0	3.2	866.	51.	86.	1.3
14.	0.50	6000.	30.0	3.2	737.	52.	87.	1.7
15.	0.33	9000.	30.0	3.2	639.	55.	90.	2.0
16.	0.25	12000.	30.0	3.2	573.	57.	91.	2.2
17.	3.00	3000.	90.0	3.2	951.	49.	84.	0.9
18.	1.50	6000.	90.0	3.2	922.	52.	86.	1.1
19.	1.00	9000.	90.0	3.2	866.	51.	86.	1.2
20.	0.75	12000.	90.0	3.2	818.	51.	87.	1.4
— p_t, p_c Series —								
21.	0.0	3000.	0.0	3.2	0.	95.	101.	4.1
22.	0.0	3000.	0.0	2.6	0.	83.	101.	4.7
23.	0.0	3000.	0.0	1.9	0.	64.	101.	4.9
24.	0.0	3000.	0.0	1.3	0.	41.	126.	5.0
25.	0.10	3000.	3.0	3.2	377.	68.	95.	2.9
26.	0.10	3000.	3.0	2.6	411.	58.	95.	3.2
27.	0.10	3000.	3.0	1.9	416.	45.	104.	3.3
28.	0.10	3000.	3.0	1.3	423.	36.	118.	3.4
29.	1.00	3000.	30.0	3.2	866.	51.	86.	1.3
30.	1.00	3000.	30.0	2.6	898.	47.	88.	1.3
31.	1.00	3000.	30.0	1.9	881.	41.	95.	1.4
32.	1.00	3000.	30.0	1.3	829.	35.	110.	1.6
33.	3.00	3000.	90.0	3.2	951.	49.	84.	0.9
34.	3.00	3000.	90.0	2.6	950.	48.	87.	0.9
35.	3.00	3000.	90.0	1.9	949.	47.	94.	1.0
36.	3.00	3000.	90.0	1.3	920.	40.	109.	1.2

- (1) Shear reinforcement (%)
- (2) Yield stress of shear reinforcement (kgf/cm²)
- (3) $p_{w\sigma_y}$ (kgf/cm²)
- (4) Amount of longitudinal reinforcement (%)
- (5) Shear transfer carried by shear reinforcement across the shear crack (B)
- (6) Dowel shear transfer carried by longitudinal reinforcement across the shear crack (B)
- (7) Mean value of compressive stress in critical concrete elements subjected to unit shear force ($\times 10^{-4}$ tonf/cm²)
- (8) Maximum width in shear crack (B) subjected to unit shear force ($\times 10^{-2}$ mm)

Fig. 11 Compressive Principal Stress in Concrete Elements ($a/D=1.0$)

Fig. 12 Compressive Principal Stress in Concrete Elements ($a/D=1.5$)

Fig. 13 Stress of the Longitudinal Reinforcement ($a/D = 1.0$)

Fig. 14 Stress of the Longitudinal Reinforcement ($a/D = 1.5$)

着目すると、その領域は a/D が 1.5 の方が 1.0 のものより大きく、かつ、広く分布している傾向がみられる。

3. セン断補強筋のせん断伝達力

Fig. 15 は、 a/D が 1.0 の試験体の Diagonal Shear Crack を横切るせん断補強筋のせん断伝達力を示したものである。Fig. 16 は、 a/D が 1.5 の試験体の斜めひび割れ B 面を横切るせん断補強筋のせん断伝達力を示したものである。これ等のせん断伝達力を比較すると、 a/D が 1.0 の Diagonal Shear Crack を横切るせん断補強筋のせん断伝達力より、 a/D が 1.5 の B 面を横切るせん断伝達力の方が負担力は大きい結果を得た。

Fig. 17 は、これ等斜めひび割れを横切るせん断伝達力の総和、 wQ_{unit} とせん断補強筋比 p_w との関係を示したものである。この図にもみられるように、せん断破壊面におけるせん断伝達力は、 p_w が 0%~4.0% の全範囲にわたり a/D が 1.0 のものより、1.5 の方が約 2 割程度大きい値を示していた。

3.3 a/D が 1.5 の斜めひび割れ面を横切るせん断補強筋のせん断伝達力

Fig. 17 の・印は、 a/D が 1.5 の解析モデルにおける

Fig. 15 Shear Transfer carried by the Shear Reinforcement across the Diagonal Shear Crack ($a/D = 1.0$)

Fig. 16 Shear Transfer carried by the Shear Reinforcement across the Shear Crack B ($a/D = 1.5$)

Fig. 17 Relation between wQ_{unit} and p_w

斜めひび割れ B 面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 との関係を示したものである。

この図に示すように、 wQ_{unit} は、 p_w に比例して上昇する傾向を示し、 p_w が約 1.0% になると、上昇は頭打ちになってくる。また、 p_w が約 1.5% になると、全せん断の 90% 以上せん断補強筋が負担するようになり、いわゆる全補強の状態に近くなる結果を得た。

3.4 最大斜めひび割れ幅

Fig. 18 は、 a/D が 1.5 の解析モデルの斜めひび割れ B 面における節点同志間の鉛直方向の開きを、最大斜めひび割れ幅 bW_{unit} と考え、この bW_{unit} とせん断補強筋比 p_w との関係を示したものである。

この図に示すように、 bW_{unit} は、 p_w に反比例する傾向を示した。

3.5 斜めひび割れを横切る主筋のダボせん断力

Fig. 19 は、斜めひび割れ B 面を水平に横切る主筋要素に作用している鉛直方向力（ダボせん断力）の総和 dQ_{unit} と $p_t \cdot p_c$ との関係を示したものである。Fig. 19 にみられるように、ダボせん断力 dQ_{unit} は、主筋比が大きくなる程大きくなる傾向を示し、このような傾向は、

Fig. 18 Relation between bW_{unit} and p_w ($a/D=1.5$)

Fig. 19 Relation between dQ_{unit} and p_t, p_c ($a/D=1.5$)

Fig. 20 Stress of the Bond Links ($p_w=1.0\%$)

p_w が少ない程顕著であった。

3.6 ボンドリンクの応力

Fig. 20 は、せん断補強筋が 1.0 % で主筋比を 2.6 %, 1.9 %, 1.3 % と変化させた場合の主筋とコンクリート要素を結ぶボンドリンクに作用した応力を示したものである。この図に示すように、ボンドリンクに作用した応力は、斜めひび割れ B 面の先端付近に集中していた。そして、このボンドリンクの応力は、主筋比の大きいもの程大きい傾向を示し、せん断補強筋量に関しては、 p_w の少ないもの程大きい結果を得た。

3.7 付着割裂破壊に対する考察

3.5 で記述したように、ダボせん断伝達力は主筋比が大きいもの程大きく、 p_w の小さいもの程その傾向は顕著であった。また、3.6 で記述したように、主筋とコンクリートの相互作用を示すボンドリンクの応力は、斜めひび割れ B 面の引張り側先端に集中して、ダボせん断伝達力と同様主筋比が大きいもの程大きな値を示した。

これらの解析結果から、ダボせん断力が大きく、ボンドリンクの応力が大きい主筋比の大きいものの方が、主筋のまわりのかぶりコンクリート部分に負担がかかり、その結果、付着割裂破壊が生じやすくなることが考えられる。この様に、主筋量が多い程付着割裂破壊を生じやすいことは、広沢博士の文献⁹⁾等にも報告されている。

§4. 結 び

せん断破壊時のひび割れの状況を参考にし、初めから多数の斜めひび割れを組み込んだ FEM マクロ弾性解析モデルを用い、せん断スパン比、せん断補強筋比、主筋比をパラメーターとした数値解析を行った。その結果、一般に行われている FEM 弾塑性逐次解析法や、実験的手法より簡単な方法で、斜めひび割れの各せん断抵抗要素が負担するせん断伝達力等が把握できた。

以下に、数値解析結果の要約を示す。

1. せん断スパン比の影響

せん断破壊時近傍の圧縮主応力分布、主筋の応力分布、ならびに斜めひび割れを横切るせん断補強筋が負担するせん断伝達力に及ぼす、せん断スパン比の影響が把握できた。

2. せん断補強筋のせん断伝達力とせん断補強筋比の関係

斜めひび割れを横切るせん断補強筋のせん断伝達力は、せん断補強筋比 p_w に比例して増加する。しかし、 p_w が約 1.0 % になると増加の割合は急に緩慢になる。また、 a/D が 1.5 では、 p_w が約 1.5 % になるとほぼ全補強の状態になることが明らかになった。

3. 主筋比の影響

せん断破壊面を横切る主筋のダボせん断伝達力は、主筋量が多くなる程大きくなり、このような傾向は p_w が少ないもの程顕著であった。

4. その他

上記のほか、斜めひび割れ幅とせん断補強筋との関係、付着割裂破壊にとって重要な情報を有するボンドリンクの挙動等が把握できた。

謝 辞

本実験研究を行うに際し、御指導いただいた東京工業大学教授・工学博士黒正清治先生、ならびに解析をするにあたって適切な助言をいただいた東京工業大学助教授和田章博士に紙面を借り厚く御礼申し上げます。

また、実験に際し、長期間にわたり御協力下さいました高周波熱錬株式会社常務水馬克久氏ならびに関係各位に深く感謝の意を表します。

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 (はりの曲げせん断実験), 日本建築学会論文報告集, 第 320 号, 昭和 57 年
- 2) 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), 2, 昭和 58 年

- 3) 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, 第 339 号, 昭和 59 年
- 4) 黒正清治, 滝口克己: 有限要素法による鉄筋コンクリート部材の二次元非線形解析 (その 1, 2, 仮定および解析方法), 日本建築学会論文報告集, 189 号, 昭和 46, 47 年
- 5) 黒正清治, 林 静雄, 小林克己, 吉田弘行: 異形鉄筋とコンクリートの付着に関する基礎的研究 (その 2, その 3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 57 年
- 6) 野口 博, 丸田 誠: 鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗機構の非線形有限要素法解析, RC 構造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, 昭和 57 年
- 7) 森田司郎, 角 徹三: 繰返し荷重における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究, 日本建築学会論文報告集, 229 号, 昭和 50 年
- 8) 荒川 卓: 鉄筋コンクリートはりのせん断抵抗に関する研究, 北大工学部研究報告第 25 号, 昭和 35 年
- 9) 広沢雅也: 鉄筋コンクリート短柱の崩壊防止に関する総合研究 (その 19: 付着割裂破壊モードについて), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和 49 年

SYNOPSIS

UDC : 624.012.45 : 624.072.2

STUDY ON THE SHEAR TRANSFER NEAR INCLINED CRACK BY FEM LINEAR ANALYSIS

Part 3 Effectiveness of high tension shear reinforcement in reinforced concrete members

by MASASHI FUKUHARA, Research Associate of Tokyo Institute of Technology, Member of A. I. J.

This study describes the analytical results concerning the shear transfer carried by the shear resistant elements across the inclined cracks. The analytical method was FEM linear analysis used the models with some inclined cracks as many as the experimental results. The analytical results provided the information about the critical inclined crack near the ultimate shear strength.