

論文 せん断面を横切るアラミドロッドとCF ストランドの性状に関する実験的研究

原 忠勝^{*1}・中澤 さより^{*2}

要旨：本研究は、ひび割れ面を横切って伝達されるせん断力作用下の連続繊維補強材性状について、実験的な検討を行なったものである。ここではアラミドロッドと炭素繊維ストランドを用いて、Push-Off型試験体によるせん断試験を行ない、せん断面と補強材のなす角度、および補強材量を実験条件として取り上げた。連続繊維補強材は、キンキングによる破壊性状を示したことから、素材としてのせん断強度とは別個なものとして検討する必要性を述べた。

キーワード：連続繊維補強材，せん断伝達，Push-off試験，キンキング

1. はじめに

連続繊維補強材は、高耐食性、高強度、および軽量であるなどの特徴を有することから、鉄筋やPC鋼材の代替としての利用検討が盛んに行なわれている。しかし連続繊維補強材は、長繊維を樹脂で固めて成形してあるため、運搬や移動などの際に曲げられたり、せん断力を加えられると、割れや、繊維の破断を生じる恐れがあり、曲げ引張強度や、せん断強度の評価も重要なこととなる。このことは、斜めひび割れ面を横切って連続繊維補強材が配置されていれば、ひび割れ面を介して伝達されるせん断力によって、割れや、繊維の破断により断面積が減少し、材質強度に達する前に破壊する恐れがあることを示している。

以上のような背景の下に、本研究では、ひび割れ面を横切って伝達されるせん断力作用下の連続繊維補強材の性状について実験的な検討を行なうものである。ここでは、アラミドロッドと炭素繊維ストランドについて、Push-Off型試験体による一面せん断試験を行ない、せん断面と補強材の角度、および補強材量が及ぼす影響について検討したものである。

2. 実験の概要

本実験では、図-1に示すように、Push-Off型試験体による間接一面せん断試験を行なった。せん断面は290mm×150mmとし、連続繊維補強材には、パラ系アラミド繊維（φ7.4mm，異形ロッド），および炭素繊維（φ12.5mm，ストランド）の2種類（表-1）を用いた。

実験条件は、表-2および図-2に示すように、連続補強材の種類，せん断面と補強材のなす角度を $\theta = 75^\circ, 90^\circ, 105^\circ, 120^\circ$ ，および 135° の5段階に変化させたものである。

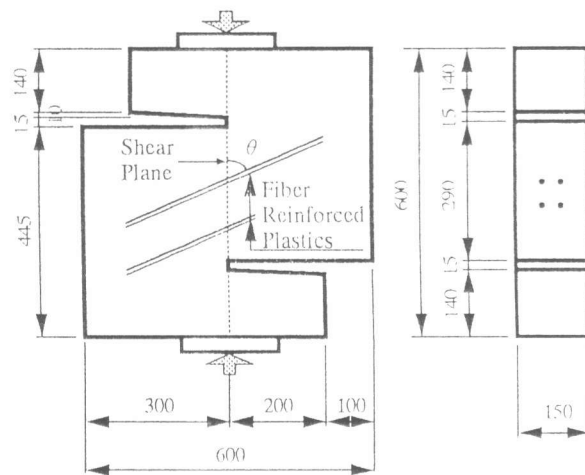


図-1 Push-Off型試験体の寸法

*1 日本大学教授 工学部土木工学科，工博（正会員）

*2 オリエンタルコンサルタンツ（株）

また $\theta = 90^\circ$ の条件については、アラミドロッドが 2, 3, 4, 5, よび 6 本と、また炭素繊維 (CF) ストランドが 1, 2, 3, および 4 本と、補強材の量を変化させた。

コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いたレディーミクストコンクリートで、試験日材齢における圧縮強度が $f'_c = 27.7 \text{ N/mm}^2$ (引張強度 $f_t = 2.8 \text{ N/mm}^2$) のものを用いた。

载荷に際しては、スクリージャッキシステムによる高剛性試験装置を用い、破壊までの漸次増加荷重を加えた。試験に際しては、試験体表面でのコンクリートのひずみと、せん断面の水平、および鉛直変位を測定した。なお、水平変位の測定に際しては、治具をヒンジとし、データ収録後に開口変位 (ひび割れ幅) と、せん断変位 (ずれ) に換算した。

表-1 本実験に用いた連続繊維補強材の性質

| 繊維の種類 | 表面形状 | 公称径 (mm) | 断面積 (mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) |
|---------|------|----------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| アラミド | 異形 | 7.4 | 43.0 | 2136.4 | 52920 |
| CFストランド | より線 | 12.5 | 76.0 | 2214.8 | 141120 |

表-2 実験条件

| Aramid Rod Reinforced Plastics | | |
|--------------------------------|---------------|----------|
| Specimens | No. of Bars | θ |
| T2-90° | 2 ϕ 7.4 | 90° |
| T3-90° | 3 ϕ 7.4 | 90° |
| T5-90° | 5 ϕ 7.4 | 90° |
| T6-90° | 6 ϕ 7.4 | 90° |
| T4-75° | 4 ϕ 7.4 | 75° |
| T4-90° | 4 ϕ 7.4 | 90° |
| T4-105° | 4 ϕ 7.4 | 105° |
| T4-120° | 4 ϕ 7.4 | 120° |
| T4-135° | 4 ϕ 7.4 | 135° |
| CF Strand | | |
| Specimens | No. of Bars | θ |
| C1-90° | 1 ϕ 12.5 | 90° |
| C3-90° | 3 ϕ 12.5 | 90° |
| C4-90° | 4 ϕ 12.5 | 90° |
| C2-75° | 2 ϕ 12.5 | 75° |
| C2-90° | 2 ϕ 12.5 | 90° |
| C2-105° | 2 ϕ 12.5 | 105° |
| C2-120° | 2 ϕ 12.5 | 120° |
| C2-135° | 2 ϕ 12.5 | 135° |

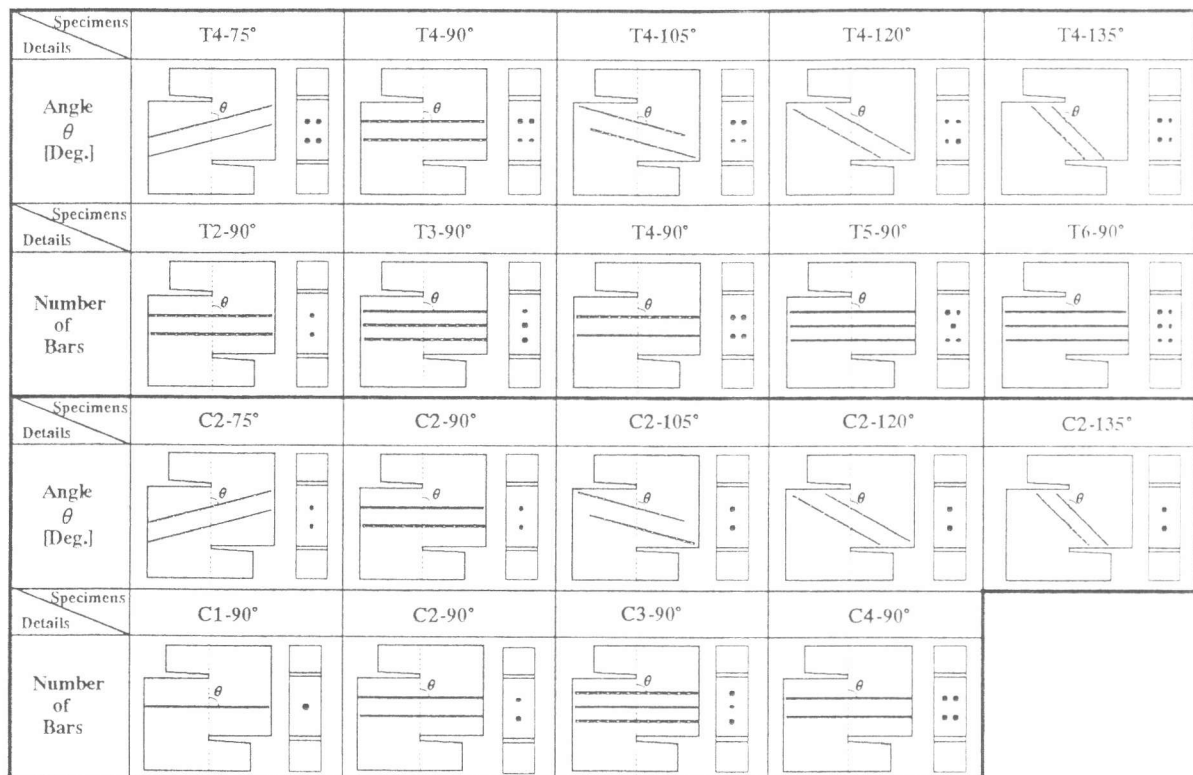


図-2 Push-Off型試験体における連続繊維補強材の配置

3. 実験結果および考察

3. 1 連続繊維補強材のせん断強度

Push-Off型試験体の荷重試験に先立って、土木学会・連続繊維補強材小委員会による「二面せん断による連続繊維補強材のせん断試験方法（案）」[1]に準じて、アラミドロッドとCFストランドのせん断強度を求めた。この試験方法（案）は、図-3に示すような装置を用いて、連続繊維補強材を挟み切断するもので、いわゆる素材としてのせん断強度を求めるものである。ここでは、せん断面の間隔 t を 25mm、50mm に変化させ、各 3 本の供試体について実験を行なった。実験結果は、表-3に示すように、アラミドロッドのせん断強度が約 200N/mm^2 程度で、CFストランドの場合、 $t = 25\text{mm}$ が約 310N/mm^2 で、 $t = 50\text{mm}$ が若干大きく、約 330N/mm^2 となった。

3. 2 Push-Off型試験体の実験結果

(1) ひび割れおよび変位の性状

写真-1は、破壊後の試験体のひび割れ様相を示したものである。また図-4、5には、せん断応力度と、ひび割れ面でのせん断変位（ずれ変位）の測定結果を示した。

試験体は、初期ひび割れが試験体中央のせん断面に添って発生し、その後の荷重増加に伴ってひび割れ幅が広がり、骨材のかみ合いによってせん断面のコンクリートが剥離するような性状を示した。

ひび割れ面でのせん断変位は、せん断面と補強材のなす角度 θ を変化させた場合、図-4に示すように、 θ および補強材の種類によって、若干傾向が異なる。アラミドロッドの場合、初期ひび割れ発生後に荷重が低下するが、その後、徐々に耐力が増加する傾向を示した。そして、角度が大きい場合 ($\theta = 120^\circ, 135^\circ$)、2回目のピークを迎えた後に荷重が低下した。しかし $\theta = 105^\circ$ 以下の試験体の場合、これら2回目のピークを確

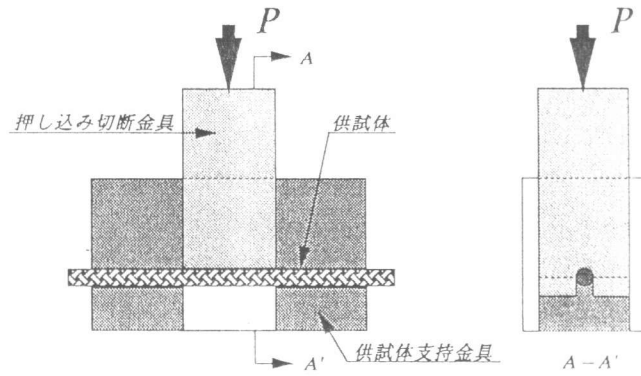


図-3 二面せん断試験の方法

表-3 二面せん断試験の結果

| せん断面間隔 | | アラミドロッド | | CFストランド | |
|----------------------------|------|---------|--------|---------|--------|
| | | t=25mm | t=50mm | t=25mm | t=50mm |
| せん断荷重 kN | No.1 | 17.3 | 17.8 | 46.6 | 50.1 |
| | No.2 | 17.7 | 17.5 | 45.1 | 51.0 |
| | No.3 | 17.1 | 17.2 | 49.2 | 49.6 |
| | Ave. | 17.4 | 17.5 | 47.0 | 50.2 |
| | SD. | 0.25 | 0.24 | 1.69 | 0.58 |
| せん断強度 N/mm ² | No.1 | 201.1 | 206.9 | 306.6 | 329.6 |
| | No.2 | 205.8 | 203.5 | 296.7 | 335.5 |
| | No.3 | 198.8 | 200.0 | 323.7 | 326.3 |
| | Ave. | 201.9 | 203.5 | 309.0 | 337.1 |
| | SD. | 2.91 | 2.82 | 11.15 | 13.06 |

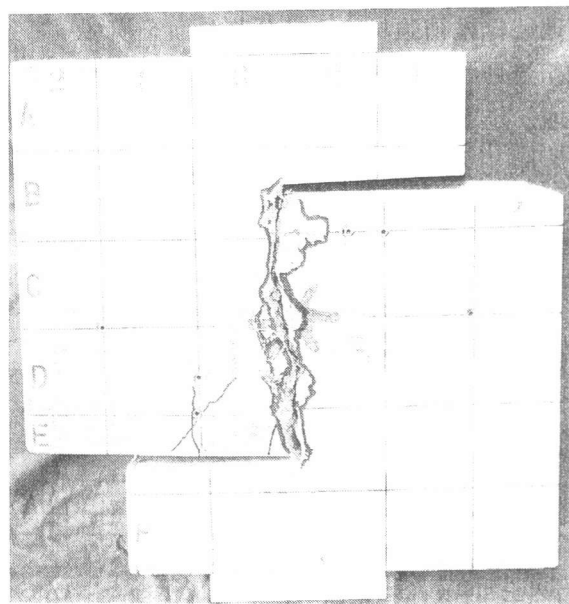
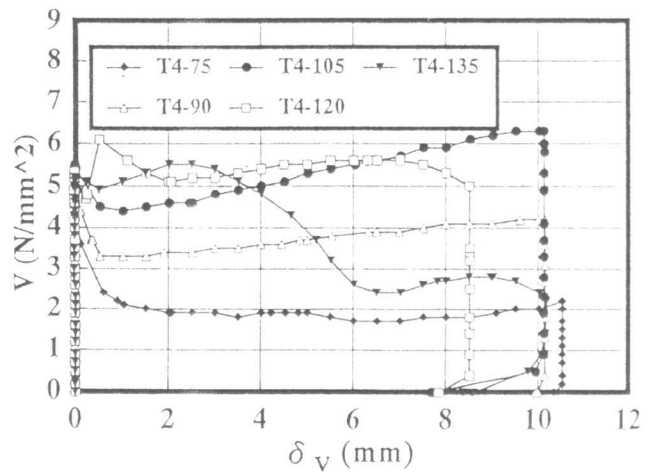


写真-1 試験後のひび割れ様相
(アラミドロッド, T4-135)

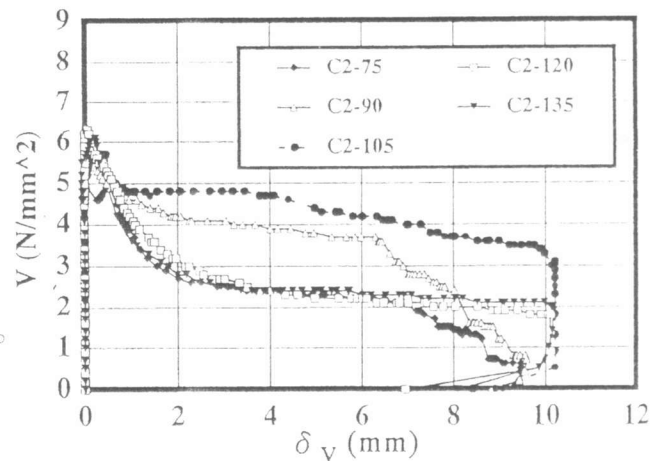
認できないまま、せん断部が試験体下端部と接触してしまったため荷重を終了したが、変位量は多くなるものと思われる。これに対してCFストランドは、 $\theta = 90^\circ$ 以下の場合、初期ひび割れ発生後に変位の小さい領域で、一旦、荷重の上下が見られたが、その後は、荷重が徐々に低下し、内部より繊維の破断する音が発生する度に明確な荷重低下を示した。

一方、 $\theta = 90^\circ$ で補強材量を変えた場合、図-5に示すように、初期ひび割れ発生後より荷重が低下した後、アラミドロッドは徐々に荷重が増加し、CFストランドは、ほぼ平衡状態を保ちながら変位が増加し、繊維の破断する音と伴に荷重が低下していった。

試験後の連続繊維補強材の状態を観察するために、ひび割れ面のコンクリートを取り除き、写真撮影を行なった。アラミドロッドの場合、写真-2に示すように、ロッドは曲げ試験後のような様相を呈している。またCFストランドは、写真-3に示したように、より線部が破断して、若干、バラバラの状態になっていた。このことから、連続繊維補強材は、ひび割れ面を横切って伝達されるせん断力を受ける場合、キンキングによる破壊性状を示すように思われる。

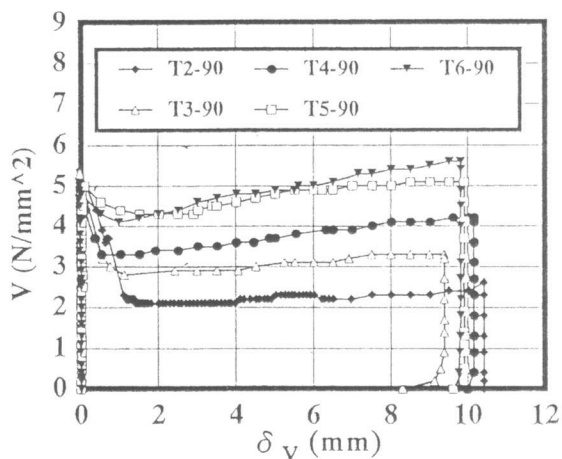


(a) アラミドロッド

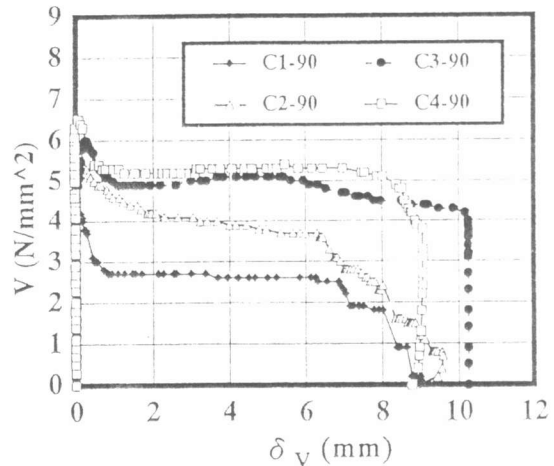


(b) CFストランド

図-4 作用せん断応力とせん断変位



(a) アラミドロッド



(b) CFストランド

図-5 作用せん断応力とせん断変位 ($\theta = 90^\circ$)

(2) ひび割れ発生荷重と耐力

表-4は、実験結果よりひび割れ発生荷重、および最大荷重をFRP断面で除したせん断強度とせん断面積で除したせん断強度を示したものである。表に示すように、FRP断面で除したせん断強度は、二面せん断強度と比べて、アラミドロッドでは、4~13倍、CFストランドでは、2~9倍といずれも高い値を示した。

図-6は、本実験結果より得られたひび割れ発生荷重、および最大荷重から求めたせん断強度に対するせん断面と補強材のなす角度 θ の関係を示したものである。

ひび割れ発生時のせん断強度は、主としてコンクリートの強度に依存するためか、おおよそ 5 N/mm^2 程度で、図中に示すように、角度による違いは余りないように思われる。また最大荷重は、ひび割れ発生時のせん断強度より若干大きくなり、そして角度が大きくなるのに従って大きくなり、 $\theta = 120^\circ$ で最大を示した後、小さくなる傾向を示した。

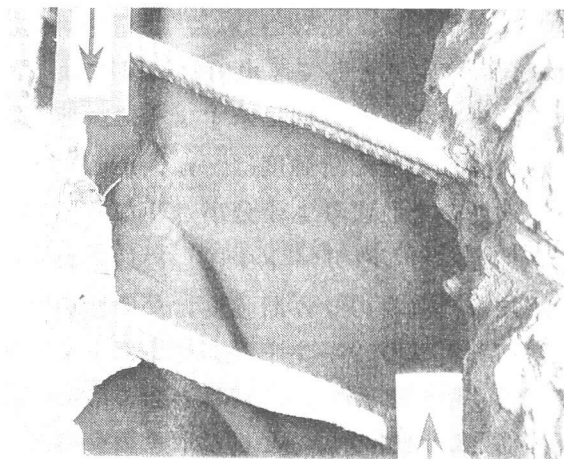


写真-2 アラミドロッド
(T4-75, $\theta = 70^\circ$)

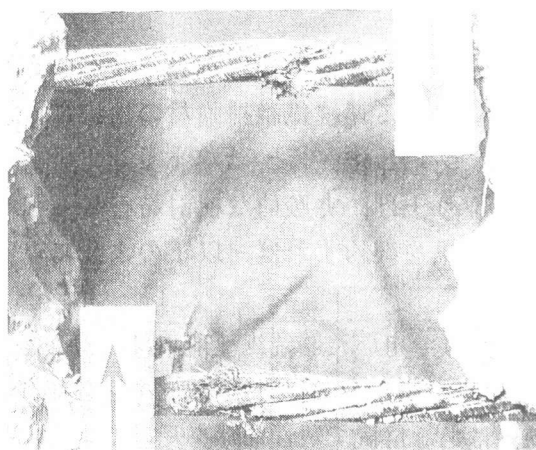


写真-3 CFストランド
(C2-90, $\theta = 90^\circ$)

表-4 連続繊維補強材量とせん断面積から求めたせん断強度の比較

| Specimen | FRP断面積 mm ² | Pcr kN | Pmax kN | Pcr/FRP断面積 N/mm ² | Pmax/FRP断面積 N/mm ² | Pcr/せん断面積 N/mm ² | Pmax/せん断面積 N/mm ² |
|----------|---------------------------|-----------|------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| T2-90 | 86.0 | 235.69 | 235.69 | 2740.58 | 2740.58 | 5.42 | 5.42 |
| T3-90 | 129.0 | 226.48 | 226.48 | 1755.66 | 1755.66 | 5.21 | 5.21 |
| T5-90 | 215.0 | 185.91 | 212.86 | 864.70 | 990.05 | 4.27 | 4.89 |
| T6-90 | 258.0 | 223.05 | 223.05 | 864.53 | 864.53 | 5.13 | 5.13 |
| T4-75 | 172.0 | 198.06 | 226.97 | 1151.51 | 1319.59 | 4.55 | 5.22 |
| T4-90 | 172.0 | 177.38 | 210.41 | 1031.28 | 1223.31 | 4.08 | 4.84 |
| T4-105 | 172.0 | 205.8 | 229.61 | 1196.51 | 1334.94 | 4.73 | 5.28 |
| T4-120 | 172.0 | 219.72 | 255.19 | 1277.44 | 1483.66 | 5.05 | 5.87 |
| T4-135-1 | 172.0 | 176.9 | 233.73 | 1028.49 | 1358.90 | 4.07 | 5.37 |
| T4-135-2 | 172.0 | 201.98 | 238.14 | 1174.30 | 1384.53 | 4.64 | 5.47 |
| C1-90 | 76.0 | 211.19 | 211.19 | 2778.82 | 2778.82 | 4.85 | 4.85 |
| C3-90 | 228.0 | 192.47 | 254.9 | 844.17 | 1117.98 | 4.42 | 5.86 |
| C4-90 | 304.0 | 206.58 | 283.61 | 679.54 | 932.93 | 4.75 | 6.52 |
| C2-75 | 152.0 | 208.45 | 208.45 | 1371.38 | 1371.38 | 4.79 | 4.79 |
| C2-90 | 152.0 | 211.39 | 240.79 | 1390.72 | 1584.14 | 4.86 | 5.54 |
| C2-105 | 152.0 | 215.31 | 249.61 | 1416.51 | 1642.17 | 4.95 | 5.74 |
| C2-120 | 152.0 | 207.07 | 271.46 | 1362.30 | 1785.92 | 4.76 | 6.24 |
| C2-135 | 152.0 | 196.59 | 254.21 | 1293.36 | 1672.43 | 4.52 | 5.84 |

また、図中には、比較のため、鉄筋を用いた場合の算定式として、山田の式[2]による計算結果を示した。図に示すように、連続繊維補強材のせん断強度は、剛性が低いため、鉄筋のそれよりも十分小さくなっている。また、コンクリート中に埋め込まれた連続繊維補強材のせん断強度は、剛性の高い鉄筋と異なり、キンキング作用による曲げ引張を受けるためか、素材としてのせん断強度とは別個のものとして取り扱うのが良いように思われる。

4. まとめ

ひび割れ面を横切って伝達されるせん断力作用下における連続繊維補強材の性状について、アラミドロッドとCFストランドの2種類を取り上げ、実験的な検討を行なった。その結果を要約すれば、以下のようになる。

(1) 本実験で用いた連続繊維補強材の場合、ダウエル作用による補強材下側のコンクリートの圧壊は余り見られず、補強材がキンキング作用によって破壊する様相を示した。そして、アラミドロッドはある位置で塑性曲げを受けたようになり、CFストランドは、曲げ引張による繊維の破断により、ストランドがバラバラの状態になっていた。

(2) ひび割れ発生時のせん断強度は、補強材の量、およびせん断面とのなす角度にかかわらず、ほぼ同程度であった。また最大せん断強度は、ひび割れ発生時より若干高い程度であるが、補強材量、および角度の影響を受けることがわかった。このことは、鉄筋の場合、剛性が高いので最大せん断強度はコンクリートの強度に依存するが、連続繊維補強材は、素材そのものの強度特性を考慮した検討が必要と思われる。

以上、せん断力の作用を受ける連続繊維補強材の性状について実験的な検討を行なったが、連続繊維補強材は、素材としてのせん断強度とは別個なものとして取り扱う必要があり、今後は、キンキング作用を考慮した評価法について検討する予定である。

謝 辞

本研究は、土木学会・連続繊維補強材小委員会の活動を通じて生まれたもので、また帝人(株)、および東京製綱(株)からは試料を提供して頂いた。本文をお借りして、厚くお礼申し上げる次第である。

参考文献

- [1]土木学会コンクリート委員会：資料No.6-4-4 二面せん断による連続繊維補強材のせん断試験 方法(案)，第6回連続繊維補強材小委員会議事録，1995.4
 [2]山田 一宇：面内力を受ける鉄筋コンクリートのせん断伝達機構および耐力，変形に関する実験的研究 東京大学学位論文，1981

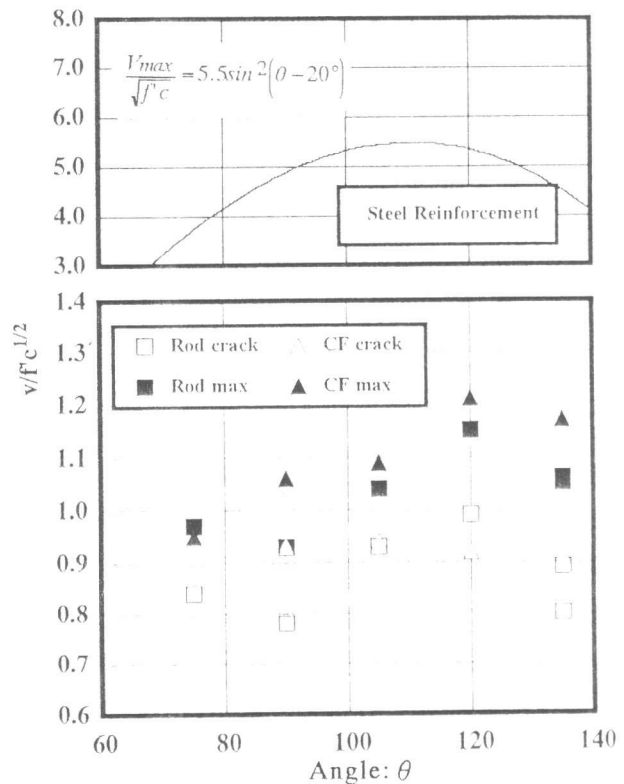


図-6 せん断強度とθの関係