

(52) ひび割れ交差部における連続繊維補強材の破壊基準に関する研究

北海道大学工学部土木工学科	正会員	○上田 多門
三菱重工(株)広島製作所		兼松 秀行
北海道大学工学部土木工学科	正会員	佐藤 靖彦
ドーピー建設工業(株)設計部	正会員	今村 晃久

1. はじめに

連続繊維補強材は、鋼材と比較して軽量、耐腐食性及び非帯磁性に優れているため、コンクリート部材の補強材としての利用が期待されている。また、力学的性状としては、鋼材と比較して弾性係数が低く、高強度であることから、緊張材として用いた場合、クリープ及び乾燥収縮によるプレストレスの減少を小さくすることができる。そのため、プレストレストコンクリート部材に適用した場合、さらにその特性を發揮できる。

連続繊維補強材は、一方向強化材すなわち異方性材料であり、塑性域を持たず、その破壊は脆性的である。それ故、強化されている方向と異なる方向に力が作用すると、強度がかなり低下する。従って、曲げ成形部や連続繊維補強材がひび割れと直角に交差しない場合は、一軸引張強度より低い強度で破断することが知られている¹⁾。

ひび割れと直角に交差しない場合の連続繊維補強材の引張強度の低減に関する従来の研究は、引っ張る方向と補強材の方向との角度を変数とした強度保持率を求める実験的研究²⁾であるが、強度が低減する機構は明確にはされていない。そこで著者は、材料異方性、付着応力-すべり関係等を考慮した有限要素解析を行い、連続繊維補強材の強度低下機構の解明を図る研究を行いその成果を公表した³⁾。本研究では、材料定数、付着応力-すべり関係等にさらに検討を加え、より妥当な仮定に基づいて解析を行い、連続繊維補強材内部の歪みと繊維強化プラスチックの破壊基準を組み合わせ、連続繊維補強材の強度低下の評価を試みた。

2. 解析供試体⁴⁾

有限要素解析を行った供試体は、図-1に示すように3つに分けたコンクリートブロックの中心部に連続繊維補強材を一本配置したものである。連続繊維補強材は、アラミド繊維を組み紐状に編んだものにエポキシ樹脂を含浸させ棒状に固めたものである。ブロック間には厚さ0.3mmのステンレス板を入れ骨材の噛み合わせは起こらないようにしてある。両端のブロック間に挟んだ油圧ジャッキにより、両端ブロックを押し出し、所定のひび割れ幅をブロック間に与えた後、ひび割れ面に平行な方向に別のジャッキで中央のブロックを押し下げることにより、せん断ずれ変位を与えている。

解析供試体は全部で8体である。解析変数はひび割れ幅であり、その値を表-1に示した。表中の供試体1~4は既往の研究⁴⁾からとったもので、コンクリート強度は各32.1、33.8、33.4、40.9MPaである。

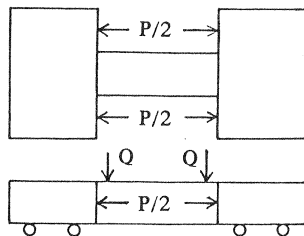


図-1 解析供試体

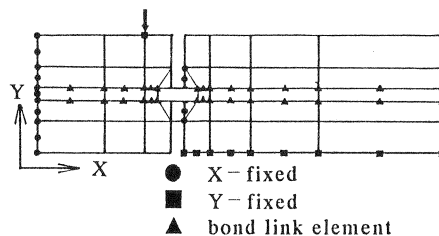


図-2 要素分割図

表-1 供試体のひび割れ幅

Specimen	W(mm)	Specimen	W(mm)
1	11.7	5	2.00
2	1.00	6	2.40
3	3.00	7	3.60
4	4.20	8	4.80

表-2 連続繊維補強材の材料定数

Young's modulus (GPa)	LT(ZL)	66.00
	TZ	5.50
Elastic shear modulus (GPa)	LT(ZL)	2.10
	TZ	2.30
Poisson's ratio	LT(ZL)	0.300
	TZ	0.196

3. 有限要素解析

鉄筋コンクリートの二次元平面応力用の非線形解析プログラムCOMM2⁵⁾を用い、その要素分割図は図-2のようである。連続繊維補強材は、実際の棒状の物と断面積、曲げ剛性が等しくなるような矩形状の物に置き換えた。付着すべりを考慮するために付着接合要素を用いた。付着応力-すべり関係は、鳥らの連続繊維補強材の引き抜き試験結果⁶⁾に基づいて定め、式(1)で与えた。

$$\tau = 6.5\{1 - \exp(-30s^{0.9})\} \quad (1)$$

ここに、 τ : 付着応力 (MPa)、 $s = S/D$: 無次元化されたすべり量、 S : すべり量、 D : 補強材の直径。解析は、ひび割れ幅に相当する強制変位を補強材方向に与えた後、補強材と直角方向に強制変位によりせん断変位を与えることにより行った。せん断すべり変位を与えたとき、現実には生じない補強材周辺のコンクリートの破壊を防ぐために、コンクリート要素は弾性体とした。また、ひび割れ周辺での付着の劣化⁷⁾を考慮するために、ひび割れから補強材の直径の5倍の範囲内では付着応力を直線的に低減させている。所定のひび割れ幅を与えたときのひび割れ幅と補強材に作用する引張力との関係は、実験結果と概ね一致していた(図-3参照)。

三次元線形有限要素解析も併せて行った。この場合、補強材周辺に薄い要素を挿入し付着すべりを表現した。付着すべり要素の剛性は、式(2)で表現される既往の連続繊維補強材の実験式⁸⁾と一致するように定めた。

$$\tau = 980S \quad (2)$$

ここに、 τ (MPa)、 S (cm)。所定のひび割れ幅が1mmの場合は、この付着応力-すべり関係を用いてもひび割れ幅と引張力との関係を概ね推定できたが、それよりひび割れ幅が大きい場合、付着応力-すべり関係の非線形性が大きくなり、実際の引張力を過大に評価してしまうことが明らかとなった(図-3参照)。そこで、三次元解析の場合、ひび割れ幅は予め要素間の隙間として与えた。

解析で用いた連続繊維補強材の材料定数は、軸方向の弾性係数は補強材自身の材料試験による測定値であり、他の定数は一般的なアラミド繊維強化プラスチックにおける材料試験値である(表-2参照)。なお、コンクリートの弾性係数は20GPa、ポアソン比は0.2である。

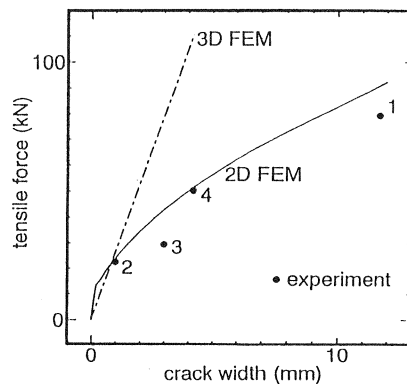


図-3 ひび割れ幅と引張力との関係

4. 解析結果の検討

4.1 材料異方性の影響

供試体2に対し、表-2に示す値を用いた材料異方性を考慮して解析した場合と、繊維の配置方向の弾性係数とポアソン比を用いた等方性を仮定した場合との比較を図-4に示した。材料異方性を考慮した場合の方が、せん断弾性係数がおよそ1/12であるために、せん断ずれ変位が大きくなっているのが明かである。

4.2 ひび割れ周辺のコンクリートの円錐状の引き抜け破壊の影響

既往の研究⁴⁾によれば、連続繊維補強材を引っ張り、所定のひび割れ幅を与えたとき、図-5に示すようにひび割れ部に補強材周辺のコンクリートが円錐状に引き抜け破壊しているのが観察されている。同じく供試体2を用いて、この破壊領域のせん断ずれ変形に与える影響を検討した。円錐状の破壊領域は、周囲のコンクリートとの間に力のやりとりはないと考え、その部分のコンクリートがないものとして解析した(図-2参照)。図-6に示すように、円錐状の破壊を考慮した場合の方がせん断ずれ変形がかなり大きくなっている。円錐状の破壊の影響はその破壊の深さで表現できると考え、実験⁴⁾で観察された深さから、図-7に示すようなバイリニアのひび割れ幅と深さの関係を仮定し解析に用いた。

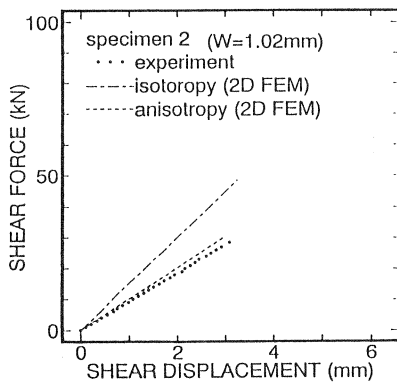
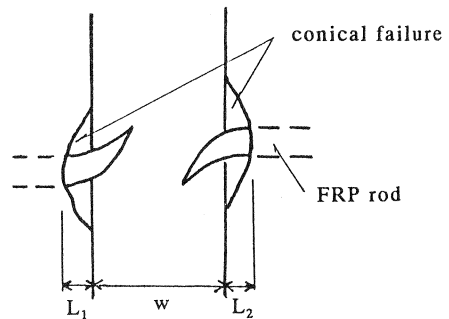


図-4 材料異方性の影響



w : crack width

$\Delta L (=L_1+L_2)$: conical failure depth

図-5 コンクリートの円錐状破壊³⁾

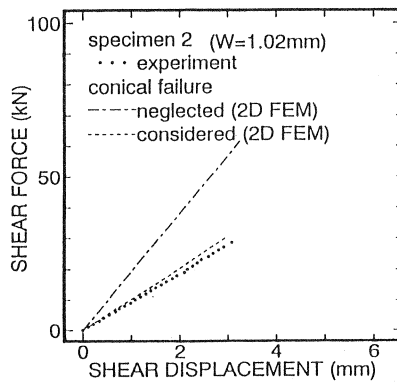


図-6 コンクリート円錐状破壊の影響

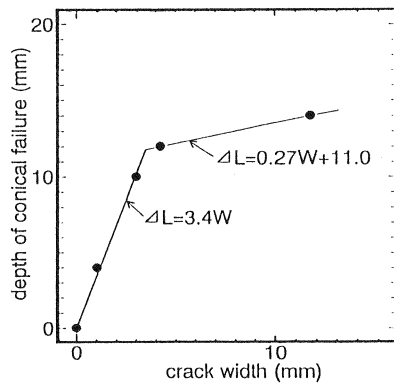


図-7 ひび割れ幅とコンクリートの円錐状破壊との関係

4.3 せん断ずれ変位とせん断力の関係

既往の実験結果⁴⁾である供試体2~4で観察されたせん断ずれ変位とせん断力との関係と、解析結果との比較を示したのが図-8である。ひび割れ幅が大きいほどせん断ずれ変位が大きいことおよびせん断ずれ変位とせん断力との直線的な関係を二次元および三次元解析ともに妥当に推定していると言えよう。このことは、せん断ずれ変位とせん断力との関係においては、線形的に変化する補強材の変形成分の影響が大きく、コンクリートの非線形性の影響は現れないことを示している。

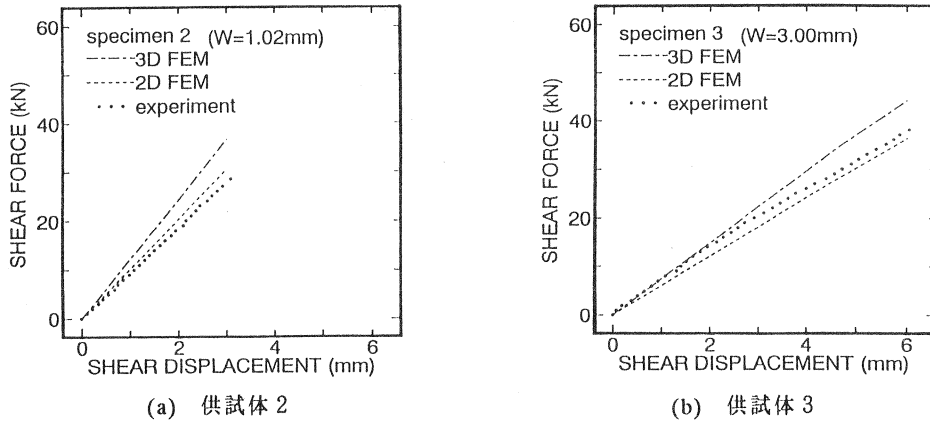


図-8 せん断ずれ変位とせん断力との関係

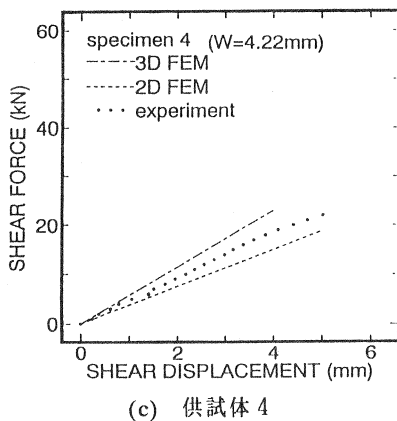


図-8 せん断ずれ変位とせん断力との関係

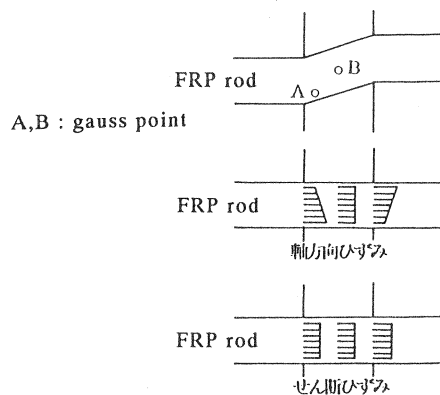


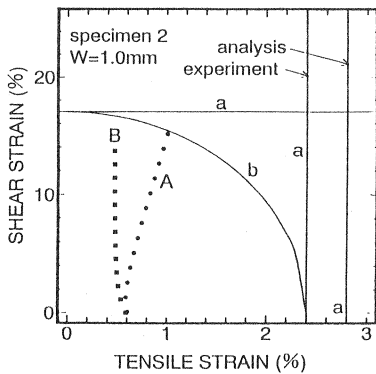
図-9 連続繊維補強材内部の歪み観察点

4.4 連続繊維補強材内部の歪み

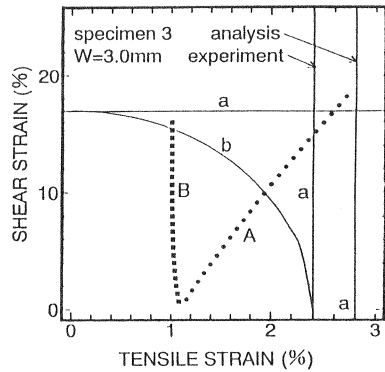
ひび割れ部での2点(図-9の点AとB)における連続繊維補強材の補強材方向軸歪みおよびせん断歪みのせん断力の増加に伴う変化の様子を示したのが図-10である。ひび割れ幅が大きいほど、点Aでの引張歪みの増加の度合いが大きくなるのがうかがえる。

図-10に示した直交する直線aと楕円bとは繊維強化プラスチックに適用される最大歪み説と相互作用説に基づく破壊則を示している。引張の最大歪みは、一軸引張試験における測定値⁴⁾と、試験において観察されたひび割れ幅を強制変位として与えた時の有限要素解析で計算される値とであり、せん断の最大歪

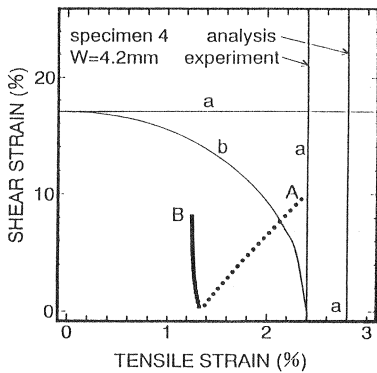
みは供試体2と3の解析結果から推定した値である。相互作用説は、補強材の軸方向に対する軸方向ひずみとせん断力方向に対するせん断歪みのみで表現できると単純化したものである。三つの供試体の場合を総合して判断すれば、最大歪み説の方がより妥当と考えられる。供試体2の場合、せん断歪みが大きく破壊にいたり、供試体4の場合は引張歪みが大きく破壊にいたり、供試体3の場合はその中間と考えられる。相互作用説に基づき破壊を計算し、8つの供試体全ての破壊時の引張力とせん断力との関係およびひび割れ幅とせん断ずれ変位との関係を図-11と図-12とに示す。ひび割れ幅が小さい場合、ひび割れ幅の増加とともにせん断ずれ変位は増加するが、せん断力は僅かしか増加しないこと、ひび割れ幅が大きい場合は、ひび割れ幅の増加とともに引張力、せん断ずれ変位ともに減少することが示されている。どちらの関係においても、実験結果を概ね良好に推定している。なお、図中の記号Sは連続繊維補強材のせん断変形が卓越する場合、Bは引張変形が卓越する場合、Qはせん断歪みによる破壊の場合、Pは引張歪みによる破壊の場合を示している。



(a) 供試体 2



(b) 供試体 3



(c) 供試体 4

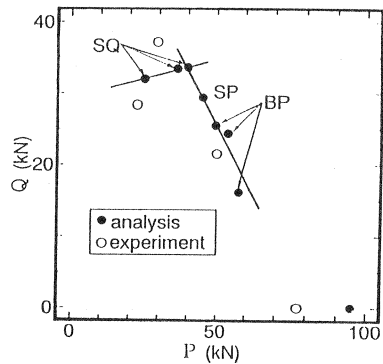


図-11 連続繊維補強材破断時の引張力とせん断力との関係

図-10 連続繊維補強材内部の歪み

5. 結論

以上の連続繊維補強材直線部のひび割れ交差部での有限要素解析結果より、以下の結論が得られた。

①ひび割れでのせん断ずれ変位の予測には、連続繊維補強材の材料異方性を考慮したせん断弾性係数の適用、ひび割れ部で生ずる補強材周辺コンクリートの円錐状破壊の考慮が不可欠である。

②連続繊維補強材のひび割れ幅と引張力との関係およびせん断ずれ変位とせん断力との関係を適切に推定できれば、ひび割れ部での補強材内部の歪みに最大歪み説に基づく破壊則を適用することにより、有限要素解析により補強材のひび割れ交差部での破断強度を妥当に推定できる。

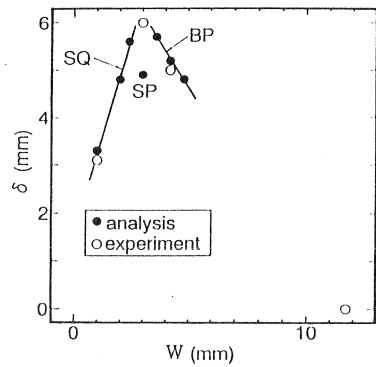


図-12 連続繊維補強材破断時のひび割れ幅とせん断ずれ変位との関係

謝辞

本研究全般を通して北海道大学工学部教授 角田與史雄博士より終始適切な指導をいただいた。また、本研究の一部は斉藤記念プレストレストコンクリート技術研究奨励基金より助成をいただき行ったものである。ここに心より謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会： 連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用、コンクリートライブラリー、No.72、1992年4月
- 2) 丸山武彦・本間雅人・岡村甫： 各種FRPロッドの斜め引張特性に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp.771-776、1989年6月
- 3) Kanematsu, H., Sato, Y., Ueda, T. and Kakuta, Y.: A Study on Failure Criteria of FRP Rods Subject to Tensile and Shear Force, Proceedings of FIP Symposium '93, Kyoto, 17-20 October 1993, Vol.2, pp.743-750, 1994
- 4) 佐藤靖彦・平賀則勇・上田多門・角田與史雄： 引張力とせん断力を受けるFRPロッドの破壊基準に関する実験的研究、連続繊維補強材のコンクリート構造物への適用に関するシンポジウム講演論文報告集、コンクリート技術シリーズ、土木学会、No.1、pp.211-216、1992年4月
- 5) 前川宏一・二羽淳一郎・岡村甫： 鉄筋コンクリート用解析プログラム「COMM2」、第2回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協会、pp.79-86、1983年12月
- 6) 菅・島弘・本間： 片引き試験による連続繊維補強材の局所付着応力-すべり関係、コンクリート工学年次論文報告集、第15巻、第2号、pp.859-864、1993年6月
- 7) 山尾芳秀・周礼良・二羽淳一郎： 付着応力-すべり関係に関する実験的研究、土木学会論文集、No.343、pp.219-228、1983年3月
- 8) 谷垣・岡本・蓮尾： 繊維補強材の付着性状に関する解析的研究、コンクリート工学年次論文報告集、第13巻、第2号、pp.831-836、1991年6月