

V-27

FRP シートの曲げ付着性状におよぼす載荷点間隔の影響

室蘭工業大学 フェロー 松 岡 健 一
 三井建設(株) フェロー 三 上 浩
 計測技販(株) 正 員 佐 藤 良 一
 室蘭工業大学 ○学生員 栗 橋 祐 介

1. はじめに

近年、道路・鉄道橋脚などの既存鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐震補強工事が盛んに行われている。著者らはこれまで FRP シートを用いた補強工法に着目し、FRP シート巻き付けによるせん断補強効果および靱性向上効果について検討を行いその補強効果を確認している^{1), 2)}。一方、FRP シートによる耐震補強をより効果的にするため、せん断および靱性補強とともに FRP シートを縦貼りして曲げ補強する工法も考えられ、一部で実用化されている。しかし、FRP シートの曲げ付着性状に関する研究報告は比較的少なく、未だ効率的な補強設計法が確立されていないのが現状である。特に FRP シートの付着性状は、コンクリートとシートの相対変位差、曲げモーメントによる曲率およびひびわれ(特にせん断ひびわれ)の発生に伴うせん断ずれに起因するピーリング(引き剥がれ)など多くの因子に影響されるため、それらを念頭に入れた検討・評価が重要となる。

本研究は FRP シートの曲げ付着性状を定量的に検討することを目的とし、RC 梁に FRP シートを接着した試験体を用い、シートの材料特性および載荷点の間隔が FRP シートの曲げ付着性状や剝離挙動に与える影響に着目して検討した。曲げ付着性状の検討は FRP シート上に 10 cm 間隔で貼り付けたひずみゲージ出力によるひずみ分布をもとに行い、必要定着長および平均付着強度を検討した。また、実験終了後には試験体のひびわれ状況をスケッチし、ひびわれ性状がシートの付着性状に与える影響を検討した。

2. 実験の概要

表-1 に試験体の一覧を示す。試験体は無補強を含め、載荷点間隔(以後、載荷幅と称する。)を3種類、FRP シートの材料種別を2種類に変化させた全9体である。試験体名は1項目に載荷幅、2項目に FRP シートの材料種別(A; AFRP, C; CFRP, N; 無補強)を示している。なお、試験体は底面シートが剝離する要因となる斜めひびわれの発生を低減するためせん断余裕度を十分にとり、せん断スパン比 a/d を 5.5 として計画した。

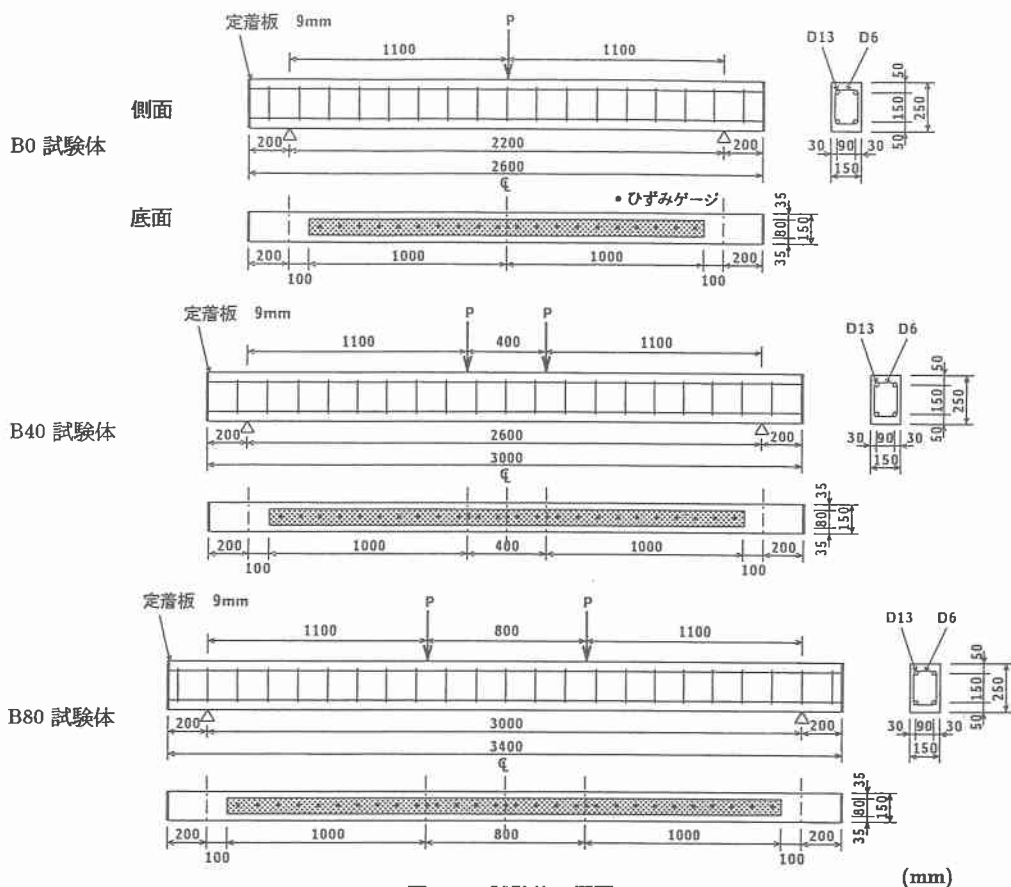
図-1 に試験体の概要を示す。試験体は断面寸法を一定としせん断スパン比を 5.5 に設定しているため、各載荷幅ごとにスパン長を変化させている。本実験に用いたコンクリートは実験時材令:65 日、平均圧縮強度:24.88 MPa、弾性係数:21.95 GPa、ポアソン比 0.19 であった。主鉄筋は D13(SD295)、スターラップには D6(SD 295)を用い 15 cm 間隔に配筋している。鉄筋の降伏強度は引張試験結果より、

表-1 試験体一覧

試験体名	載荷点間隔 (cm)	補強材	目付量 (g/m ²)	せん断 余裕度
B0-N	0	無補強	—	3.17
B0-A		AFRP	415	2.17
B0-C		CFRP	300	2.14
B40-N	40	無補強	—	3.17
B40-A		AFRP	415	2.17
B40-C		CFRP	300	2.14
B80-N	80	無補強	—	3.17
B80-A		AFRP	415	2.17
B80-C		CFRP	300	2.14

AFRP: アラミド繊維 CFRP: カーボン繊維

Flexural Bonding Property of FRP Sheet on RC Beam under Two-point Loading with Various Interval
 by Ken-ichi MATSUOKA, Hiroshi MIKAMI, Ryoichi SATO and Yusuke KURIHASHI



図－１ 試験体の概要

D6 は 402.8 MPa、D13 は 378.8MPa であった。補強した全試験体の底面には引張耐力が 588.4 KN/m 程度の FRP シートを梁中央部から両支点の 10 cm 手前までの範囲に幅 8 cm で貼りつけている。なお、既往の研究³⁾よりコンクリート表面と FRP シートの付着性能を向上させるためには深いチッピングが最も効果的であることが明かとなっていることから、補強した全試験体の底面には深さ 2.5 mm 程度のチッピングを施すこととした。図中の●は FRP シートに貼り付けたひずみゲージの位置であり、シート端部より 5 cm の位置から 10 cm 間隔の位置および中央点と載荷点位置に貼り付けることとした。

測定項目は載荷荷重、スパン中央部変位およびシートのひずみ分布であり、任意時刻の各出力データを精度よく測定するため、動ひずみ測定器を介しデータレコーダに一括収録している。なお、各データは約 6 Hz の A/D 変換を施し各物理量に変換している。表－２に本実験に用いた FRP シートの力学的特性を示す。

表－２ 補強材の力学的特性

シートの種類	厚さ (mm)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (GPa)	破断ひずみ (%)
AFRP シート	0.286	126.51	2.48	1.96
CFRP シート	0.167	230.46	4.07	1.77

3. 実験結果

3.1 荷重－変位関係

図－２に各載荷幅ごとの荷重－変位関係の実験結果および計算結果をとりまとめた。無補強の場合と異なり FRP シート補強した試験体では載荷幅に関わらず、主筋降伏荷重が増大し、主筋降伏後も荷重が顕著に

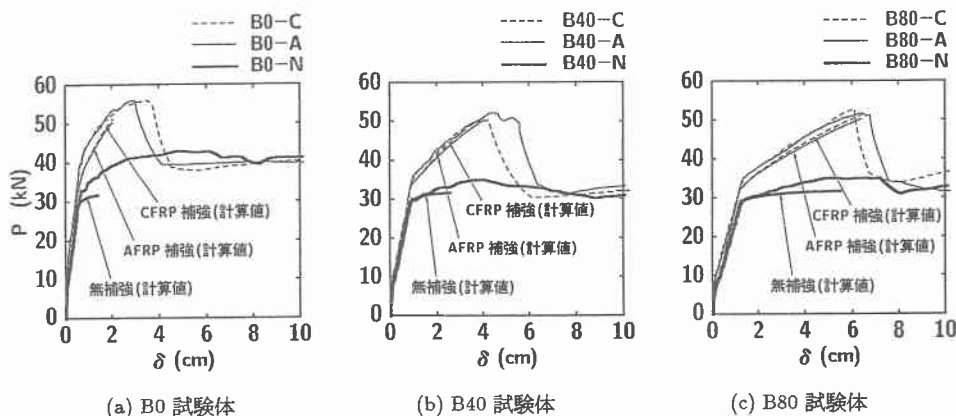


図-2 荷重-変位関係

表-3 実験結果の一覧

試験体名	実測最大荷重 (kN)	実測最大荷重時 変位 (cm)	計算最大荷重 (kN)	計算最大変位 (cm)	破壊形式
B0-N	42.9	4.99	31.8	1.39	主筋降伏後圧壊
B0-A	56.1	2.94	50.2	2.06	付着破壊
B0-C	55.8	3.49	51.2	2.09	付着破壊
B40-N	35.1	3.96	31.8	2.55	主筋降伏後圧壊
B40-A	52.3	4.39	50.2	4.06	付着破壊
B40-C	50.1	4.23	51.2	4.07	シート破断
B80-N	35.2	7.11	31.8	5.49	主筋降伏後圧壊
B80-A	52.4	6.39	50.2	6.44	シート破断
B80-C	52.5	6.10	51.2	6.43	シート破断

増加している。荷重はその後、最大値近傍において FRP シートの剝離もしくは破断により急激に低下し、無補強の荷重レベルに至っている。実験結果と計算結果を比較すると、B0-N 試験体の場合で若干対応しないものの、補強した試験体の場合には計算最大荷重時まで比較的精度良く対応していることから、主筋降伏後もコンクリートと FRP シートの付着は良好であったものと考えられる。計算は前述のコンクリート、主鉄筋および FRP シートの力学的特性を用い断面分割法により行っている。断面の分割数は約 5 mm 間隔の 50 分割である。なお、コンクリートの終局圧縮ひずみ ϵ'_{cu} は実験結果を参考に $4,500 \mu$ とした。

表-3 に実験結果と計算結果および破壊形式を示す。表より B0 試験体は補強の有無に関わらず B40, 80 試験体よりも実測最大荷重が大きいことがわかる。また、各載荷幅において補強材の種類に関わらず実測最大荷重および実測最大荷重時変位はほぼ同等となっている。

3.2 FRP シートのひずみ分布

図-3 に実験および計算による FRP シートのひずみ分布を示した。計算結果は前述の断面分割法による結果を基に、スパン方向 10 cm 間隔の位置におけるひずみを算出し細線で示している。(a) には、付着破壊した B0-A, B0-C, B40-A およびシート破断した B40-C, B80-A に関して、①：主筋降伏時、②：0.8 Pcal (計算最大荷重 Pcal の 80%) 時、③：0.9 Pcal 時、④：Pcal 時のひずみ分布を示した。ただし、B40-C の場合は実測最大荷重が計算最大荷重よりも若干小さいため、④には実測最大荷重近傍のひずみ分布を示した。な

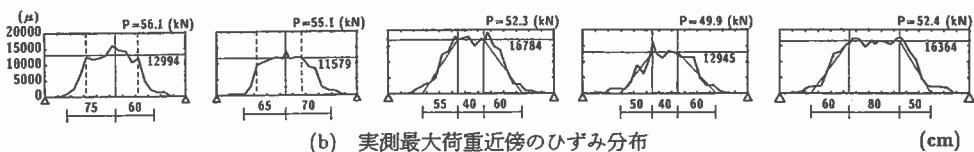
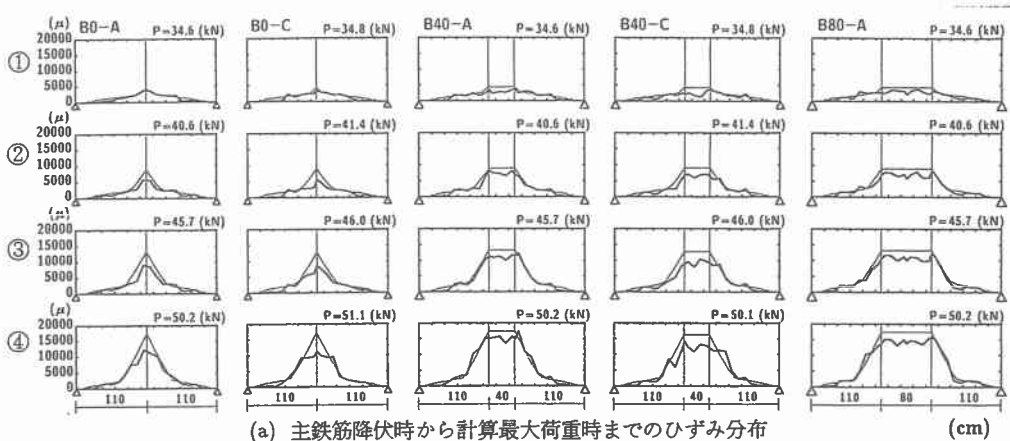


図-3 FRP シートのひずみ分布

お、シート破断した B80-C は同様にシート破断した B80-A よりも比較的小さな荷重レベルで 20,000 μ を越えるひずみが載荷点付近で多数発生して測定不良となったため、検討から除外した。

計算したひずみ分布は B0 試験体を除き実験結果と良く対応しており、シートの付着が十分に保たれている場合には計算により実験時のひずみ分布を精度良く推定できるものと考えられる。図より、主筋降伏時(①) から 0.8 Pcal 時(②) にかけて主筋の降伏とともに載荷点付近でひずみが急激に増加し、その後載荷点付近のひずみの増加に伴い、ひずみ分布は支点側に拡大していることがわかる。しかし、B0-A, B0-C 試験体のような一点載荷試験体の計算結果は実験結果と若干異なり、実験では 0.9 Pcal 時(③) にはひずみが載荷点から支点側に向かって直線的に低下する三角形分布を示していたが、Pcal 時(④) には載荷点付近において一様なひずみを有する台形分布に移行している。これは、後述するひびわれ性状からわかるように、一点載荷試験体では最大荷重到達前に載荷点近傍に曲げ・せん断ひびわれがアーチ状に発生・進展したためと考えられる。実験では、その後シートが曲げ・せん断ひびわれ発生位置から支点方向に引き剥がれるピーリング現象が発生し、剥離が支点側に進展していることを確認している。

(b) に実測最大荷重近傍のひずみ分布を示す。図中には、付着強度を算定するために既往の研究⁴⁾と同様に等曲げモーメント区間のひずみの平均値 (以後、平均ひずみ) および載荷点と平均ひずみの交点から支点側に向かってひずみがほぼ 0 に収束する位置を示し、これらを細線で結んでいる。ただし、B0 試験体のひずみ分布は載荷点から支点側に直線的に低下せず台形分布となっていることから、ひずみがほぼ一様であるアーチ形成区間 (区間長 $L \approx 3 \times$ 梁高さ) におけるひずみの平均値を平均ひずみとし、載荷点からひずみがほぼ 0 に収束する位置までの距離を付着抵抗長としている。ここで、B40, B80 試験体のような二点載荷の場合、載荷点間においてひずみが一様となっているが、これはシート剥離の発生によるものではなく、載荷点間が等曲げモーメント区間であるため接着界面に発生するせん断応力が 0 に近い状態になっているためであることに留意しなければならない。

表-4 に、図-3 (b) から得られるシートの付着性状に関する実験結果を取りまとめた。ただし、B40-C, B80-A 試験体はシートが破断した試験体であり、実験結果にはシートが破断する直前のデータを用いた。

表－４ FRP シートの付着性状

試験体名	実測最大荷重 (kN)	平均ひずみ (μ)	単位幅当りの平均 引張力 (kN/cm)	平均付着抵抗 長さ (cm)	平均付着強度 (MPa)
B0-A	56.1	12,994	4.70	67.5	0.70
B0-C	55.8	11,579	4.46	67.5	0.69
B40-A	52.3	16,784	6.07	57.5	1.06
B40-C*	50.1	12,945	4.98	55.0	0.94
B80-A*	52.4	16,364	5.92	55.0	1.08

* シート破断した試験体

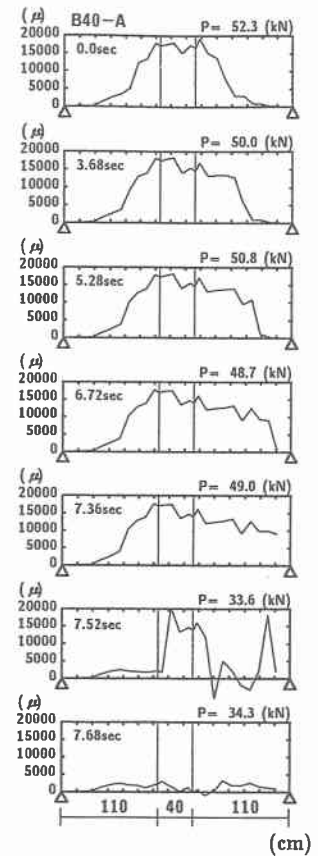
表中、単位幅当たりの平均引張力は、平均ひずみに FRP シートの弾性係数とシートの厚さを乗じたものであり、平均付着抵抗長さは図－３ (b) の載荷点両側の付着抵抗長さを平均化したものである。また、平均付着強度は単位幅当たりの平均引張力を平均付着抵抗長さで除したものである。

この表から、付着破壊した B0 試験体は同様に付着破壊した B40-A 試験体と比較して実測最大荷重が大きいにも関わらず発生する平均ひずみが小さいことがわかる。これは、B0 試験体の場合、実測最大荷重時において既にアーチ状ひびわれが卓越しその部分からピーリングが生じてシートが剝離したためと考えられる。また、B40-C 試験体は B40-A 試験体に比して実測最大荷重、平均ひずみともに小さいにも関わらず、シートが破断している。これより、CFRP シートは同等の引張耐力を有する AFRP シートと比較して破断しやすい傾向にあることがわかる。一点載荷ではシート剝離時の平均ひずみが二点載荷に比べて小さく、かつ、付着抵抗長さも若干長くなるため平均付着強度は 0.70 MPa 程度以下と小さい。一方、二点載荷では載荷幅や材料種別に関わらず付着抵抗長さは 55 cm 程度とほぼ一定であり、平均付着強度は 0.9 ～ 1.1 MPa 程度となっている。

図－４ に、B40-A 試験体の動的計測結果をもとに、FRP シートの剝離挙動の一例を示す。図では実測最大荷重時の時刻を 0 とし、シートの剝離進展時およびシートのひずみが完全に解放されれば 0 に低下するまでを示した。ひずみ分布は、実測最大荷重時において等曲げモーメント区間のひずみ分布が一般的な台形分布を示しているが、その後一点載荷試験体同様アーチ状ひびわれ発生位置が起点となり剝離範囲が支点側に進展している。剝離範囲がシート末端にまで至ると、シートは完全にコンクリート表面から剝離し、ひずみはほぼ 0 まで低下する。本試験体はアーチ状ひびわれの発生を抑制するため、せん断余裕度およびせん断スパン比を十分大きく設定している。しかしながら、試験体はアーチ状ひびわれが起因となるピーリングによって付着破壊していることから、今後は、相対変位差に起因する剝離現象のみならず、ピーリング現象による付着破壊に対する検討も必要であると考えられる。

3.3 ひびわれ性状

図－５に全試験体の実験終了後のひびわれ性状を示す。載荷幅が 40 cm 以上の場合において FRP シート補強によるひびわれ分散効果が発揮されており、特に載荷幅が大きくなる程その効果は顕著に現れている。



図－４ FRP シートの剝離挙動

一方、一点載荷試験体では他の試験体と比較してシート補強によるひびわれの分散効果が小さいようである。要因としては、他の試験体では主筋降伏時から曲げひびわれの分散が顕著になり、アーチ状のひびわれがわずかに発生する程度で最大荷重に至っているのに対し、一点載荷試験体は曲げひびわれの分散が広範囲に広がって発生する前にアーチ状のひびわれが載荷点近傍で卓越したためと考えられる。

4. まとめ

本研究では FRP シートで曲げ補強した RC 梁を用いて静的載荷実験を行い、載荷点間隔が RC 梁の耐力性状および FRP シートの付着性状に与える影響について実験的に検討した。本研究の範囲内で得られた知見を要約すると以下の通りである。

- (1) CFRP シートは AFRP シートに比較して破断しやすい傾向にある。
- (2) 断面分割法によって、実験時のシートのひずみ分布を比較的精度良く推定できるものと考えられる。
- (3) 一点載荷試験体はアーチ状のひびわれが発生しやすく、ひびわれ発生位置におけるピーリング現象が起因となって、シートの剝離が支点側に進展しやすい。この場合のシート剝離時のひずみは二点載荷試験体の剝離時のひずみに比べて小さいため、平均付着強度は小さくなる。
- (4) 二点載荷試験体では載荷点の間隔やシート材料の種類に関わらず平均付着抵抗長さは 55 cm 程度であり、平均付着強度は 0.9 ～ 1.1 MPa 程度である。

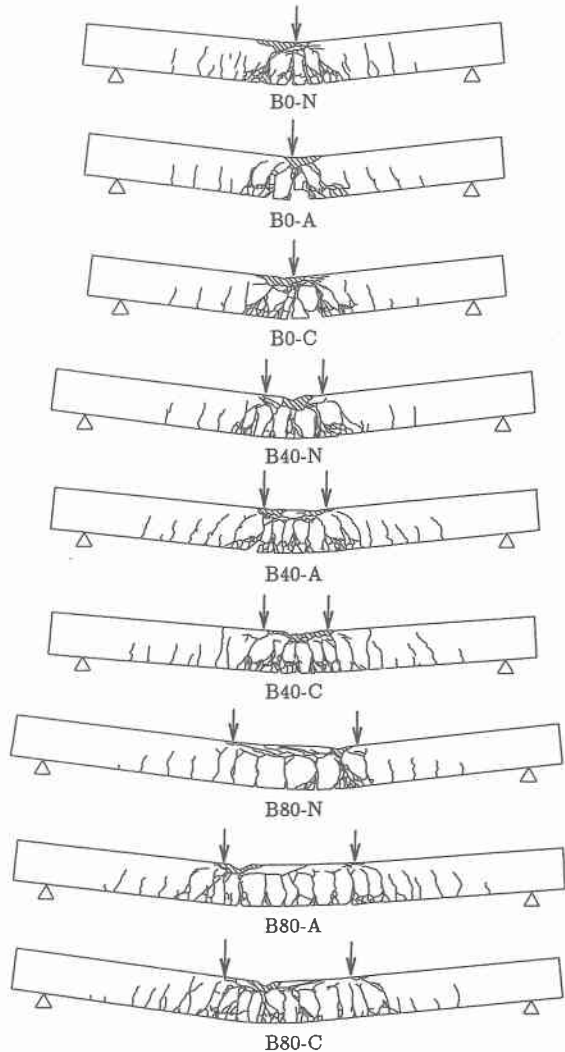


図-5 ひびわれ性状

参考文献

- 1) 佐藤昌志, 西 弘明, 三上 浩, 岸 徳光: アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の静的耐力性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1451-1456, 1996.
- 2) 三上 浩, 佐藤昌志, 谷本俊充, 松岡健一: アラミドテープを巻き付けた RC 橋脚模型の靱性能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.18, No.2, pp.1457-1462, 1996.
- 3) 岸 徳光・三上 浩・佐藤昌志・佐藤良一・佐藤 大: AFRP シートの曲げ付着性状に与えるコンクリート表面処理方法の影響, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 54 号, pp. 492-497, 1998.2
- 4) 岸徳光, 三上浩, 佐藤昌志, 松岡健一: FRP シートを接着した RC 梁の曲げ付着性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No1, pp.515-520, 1998