

論文

[2175] ロープ状新素材を外ケーブルに用いたノンメタルPC部材の研究

山口 統央*1・睦好 宏史*2・谷口 裕史*3・喜多 達夫*4

1. はじめに

連続繊維補強材は、高強度、軽量、非磁性、耐腐食性に優れるなどの利点を有してはいるものの、鋼材と比較して伸びひずみが小さくその破壊性状は脆性的であるという欠点も有している。この様な欠点を補い、連続繊維補強材の特性を有効に利用できる構造形式の一つとして外ケーブルPC部材があげられる[1]。筆者らは、外ケーブル用緊張材としてフレキシブルなロープ状新素材（以下、アラミドロープと称す）の有効性を示したが、外ケーブル部材の特性として、部材がたわむことによりケーブル位置変化が生じ、部材の耐力あるいは破壊形状に大きな影響を及ぼすこと、ならびに終局破壊性状がコンクリートの圧壊もしくはケーブルの破断となり、いずれも脆性的であること等も指摘した[2]。また、破壊性状を改善するために、筆者らが提案した、圧縮部コンクリートを拘束する手法[3]を用いることは、有効であると考えられる。

本研究は、外ケーブル式ノンメタルPC部材を開発することを目的としたもので、外ケーブルにアラミドロープ、補強筋に炭素繊維からなる連続繊維補強材（以下、CFRPと称す）を使用し、圧縮部コンクリートにCFRP拘束筋を用いたPC梁部材の実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験では、外ケーブル緊張材としてアラミドロープを、補強筋には断面積の異なる3種類のCFRPおよび比較のために通常の鉄筋を使用した。使用材料の特性値を表-1に示す。

アラミドロープは、アラミド繊維の並立繊維束を芯材とし、その周囲をポリエチレンで被覆したものである。ロープの定着は、専用の定着具内にロープを通し、繊維芯材中心にスパイク金具を挿入することにより定着した。なお、定着具内でのスリップを防ぐ目的で、プレストレスを導入する前に切断保証荷重の60%のプレロードを与えた。

2.2 試験体および載荷方法

載荷実験に用いた供試体形状および配筋状況を図-1に示す。梁供試体

表-1 アラミドロープ及びCFRPの特性値

	公称直径 (mm)	公称破断 保証荷重 (tf)	公称 断面積 (mm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	破断時 のび (%)
アラミドロープ	17	15	76.4	1.3*10 ⁶	1.5
CFRP	7.5	5.8	30.4	1.4*10 ⁶	1.6
	10.5	9.8	55.7		
	15.2	20.3	113.6		
D10SD35	9.5		71.3	2.1*10 ⁶	20以上

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 ハザマ 技術研究所 技術研究部第4研究室 工修 (正会員)

*4 ハザマ 技術研究所 技術研究部第4研究室室長 工修 (正会員)

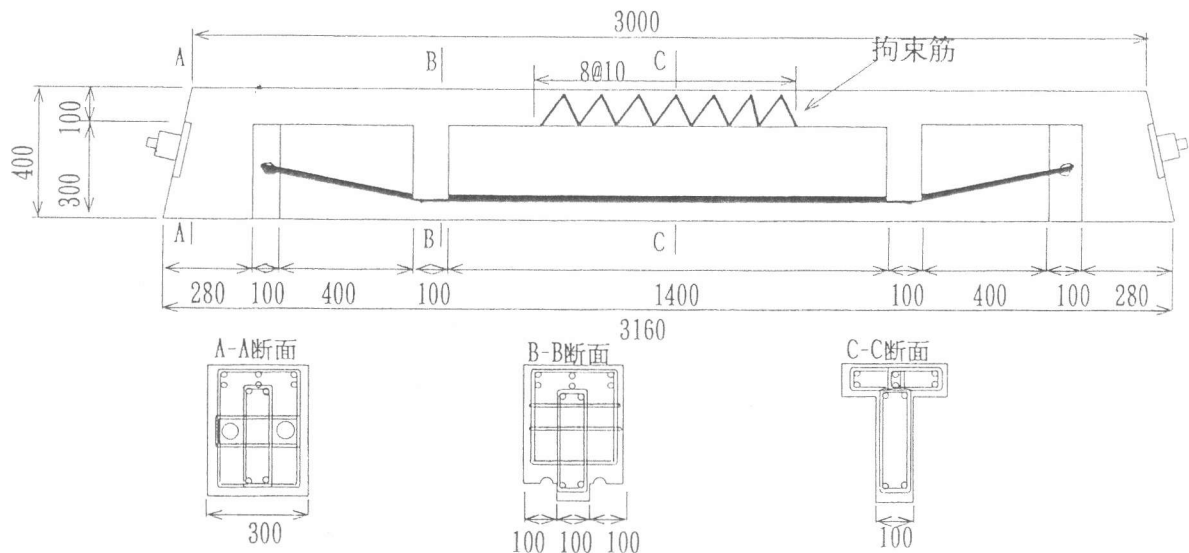


図-1 供試体形状および配筋図(mm)

はT型梁であり、ケーブル定着部およびケーブルを曲線配置とするための曲上げ部（デビエータ）を有している。デビエータ部における摩擦の影響を除去するため、テフロンシートをコンクリートとアラミドロープの間に2枚挿入した。荷重は一方方向静的二点荷重とし、等曲げモーメント区間を40cmとした。表-2に実験要

表-2 実験要因

供試体名 No.	引張補強筋種類	拘束筋種類	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	緊張力 (tf)
1	CFRP φ7.5	あり ピッチ 10 cm	330	1.3
2	CFRP φ10.5		351	
3	CFRP φ15.2		393	
4	CFRP φ10.5		263	1.2
5	CFRP φ10.5	なし	317	1.3
6	D10SD35	あり	320	1.2

因を示す。圧縮部コンクリートには、梁中央部フランジの80cmにわたり拘束筋を配置した（横拘束筋比 $P_w=0.5(\%)$ ）。引張補強筋には、補強筋量の影響を明らかにする目的で、断面積の異なる3種類のCFRPを用いた。導入プレストレス量はアラミドロープの切断保証荷重の約40%とした。荷重は、0.5tfごとに、たわみ、導入プレストレス量の変化、コンクリートのひずみおよびひびわれ幅の測定を行った。供試体No. 1, 3, 5では初期ひびわれ発生時、最大ひびわれ幅が0.2mmおよび0.5mmになった時、他の供試体では初期ひびわれ発生時に除荷し、残留変形量等を測定した。その後再荷重を行い破壊まで荷重を行った。

3. 実験結果

3.1 ひびわれ性状

荷重実験の結果を表-3に示す。ひびわれ発生荷重は、精算法[4]による計算値とほぼ一致した。最大ひびわれ幅が0.2mmおよび0.5mm時の荷重は、コンクリート標準示方書[5]およびプレストレス鉄筋コンクリート構造設計・施工指針・同解説（PRC指針）[6]の式に補強筋の弾性係数を代入し計算した[7]。いずれも、ひびわれ幅が0.2mmの時には計算値/実験値が0.96~1.16と精度の良い値を示した。しかし、ひびわれ幅が0.5mmの時、PRC指針の式では実験値を下回る傾向を示し、土木学会式では、補強筋量によりばらつきが大きくなる傾向を示した。すなわち、ひびわれ幅が0.2mmまでは、CFRPを引張補強筋に用いた梁でもCFRPの弾性係数を用いること

により既往の式で評価が可能である。また、補強筋比が大きいもの程、ひびわれ幅が0.2mmおよび0.5mmの時の耐力は増加しており、補強筋比を大きくする程ひびわれ制御に有効である。供試体No. 1, 2, 3のひびわれ状況図を図-2に示す。補強筋比が増加するにともない、ひびわれ本数およびひびわれ発生範囲も増加

表-3 実験結果

供試体 No.	ひびわれ発生荷重(tf)		ひびわれ幅0.2mm時荷重(tf)		ひびわれ幅0.5mm時荷重(tf)		コンクリート圧壊荷重(tf)	最大荷重(tf)
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値		
1	9.5 (0.95)	9.0	10.0(1.02) (0.97)	10.2 9.7	14.0(0.81) (0.90)	11.3 12.6	21.5 (0.71)	23.2 (0.91)
2	8.5 (1.13)	9.6	—	—	—	—	27.0 (0.56)	31.4 (0.95)
3	9.5 (1.05)	10.0	11.0(1.16) (1.15)	12.6 12.7	17.5(0.97) (1.20)	16.9 21.0	30.0 (1.36)	34.4 (1.34)
4	9.0 (0.96)	8.8	—	—	—	—	23.0 (1.15)	26.6 (0.99)
5	8.5 (1.02)	8.7	10.05(1.01) (0.96)	10.6 10.1	13.5(0.89) (1.06)	12.0 14.3	22.4 (1.13)	24.7 (1.03)
6	7.5 (1.22)	9.2	—	—	—	—	19.9 (0.97)	20.6 (1.05)

計算値 上段：PRC指針式 ()：計算値/実験値
下段：土木学会式

した。CFRP直径がφ15.2の供試体No.3では、軸筋位置に付着割裂ひびわれが認められた。

3.2 破壊性状

本実験に用いた供試体は、全てコンクリートの圧壊 ($\epsilon_{cu}=0.0035$) が先行する破壊性状を示した。圧縮部に拘束筋がない供試体No.5では、梁上面にひびわれが発生し変形が多少進んだ後、圧縮部軸筋が破断し急激な部材の崩壊が生じた。これは2次モーメントの作用による外ケーブル特有の破壊形状といえる。これに対し圧縮部に拘束筋がある供試体は圧壊後、拘束効果により変位が進み、さらに载荷を継続すると供試体No.1, 2, 4では引張補強筋が破断し、供試体No.3では圧縮補強筋が破断した。さらに変位が進んだ後、緊張材の一本が破断し破壊に至った。圧縮部に拘束筋を導入する手法は梁の急激な崩壊を防ぐことができ、外ケーブル梁の靱性改善にとって有効な手段である。

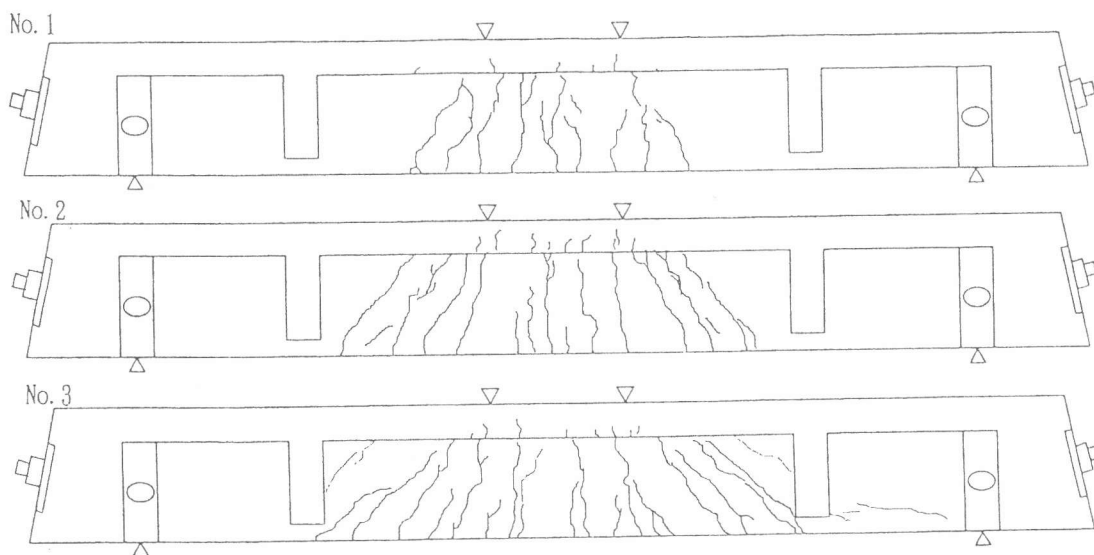


図-2 ひびわれ状況図

3. 3 荷重-変位関係

荷重-変位関係に及ぼす拘束筋の影響を図-3(a)に示す。初期ひびわれ発生までは弾性的な挙動を示し、ひびわれ発生後はほぼ一定の剛性を保つ。引張補強筋であるCFRPの直径が一定であれば、拘束筋の有無、コンクリート強度、緊張力導入量によらず、ひびわれ発生荷重およびひびわれ発生後の剛性はほぼ同じであった。圧縮部のコンクリートひずみが 3500μ を越えると、供試体No. 5は急激な破壊を示したのに対し、供試体No. 2, 4は、圧縮部コンクリートの拘束効果により、圧壊後も耐力および変位が増大し、大幅な靱性の改善がみられた。

アラミドロープを外ケーブルに用い、引張軸筋であるCFRPの補強筋比を変化させた場合の荷重-変位曲線を図-3(b)に示す。補強筋比が小さいものほど早い荷重段階で破断し、アラミドロープと圧縮部コンクリートにより内力がつりあう状態まで耐力は低下する。この為補強筋比が大きいもの程、最大耐力が増加する。しかし、太径のCFRPを用いた場合には、コンクリート上縁のひずみが 3000μ を超えたあたりから剛性が低下し、荷重が増加せず変位が増大していく傾向が顕著に認められ、最大耐力は頭打ちとなる。太径のCFRPを用いることにより、補強筋比をあげることは必ずしも部材耐力を向上させる手法とは言い難い。これは、太径CFRPの特性、すなわち付着性状が影響していると思われる。CFRPを引張補強筋に用いる場合、補強筋比と引張軸筋の直径の大きさを的確に選定する必要があり、十分な付着強度を有する太径のCFRPを用いるか、あるいは本数を増加させることにより引張補強筋量を増大させる手法が有効であると考えられる。

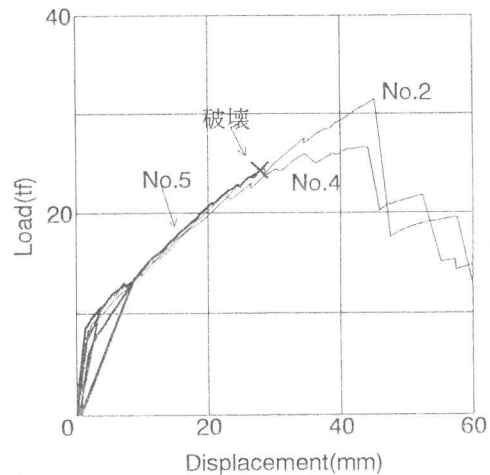


図-3(a) 荷重-変位関係に及ぼす拘束筋の影響

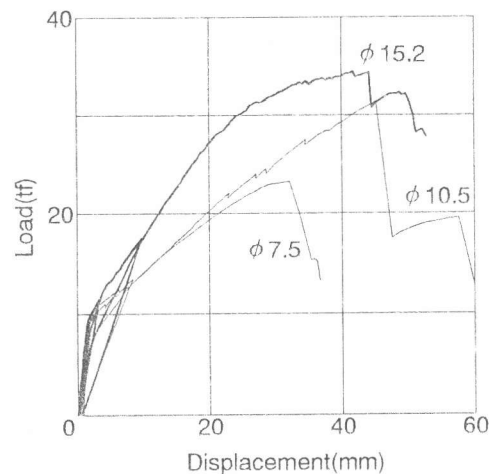


図-3(b) 補強筋比を変えた場合の荷重-変位関係

4. FRPを補強筋に用いたPC梁の曲げ解析

4. 1 精算法による解析

外ケーブルPC部材の場合、ケーブルとコンクリートの付着がないため部材の各断面においてケーブルひずみとケーブル位置のコンクリートひずみが一致せず、平面保持の仮定が成り立たない。しかし、ケーブルの伸びとケーブル位置のコンクリートの変形が部材全長にわたり等しいという適合条件を用いた精算法により精解な曲げ解析を行うことができる[4]。

実験および計算値による荷重-変位関係を図-4に示す。引張補強筋に鋼材を用いた供試体No. 6では、計算値が実験値をやや上回るものの、CFRPを用いたもの(No. 1, 2, 3)より曲げ剛性や曲げ性状をよく推定している。図-4(b), (c)および(d)に示すように引張補強筋にCFRPを用いた供試体No. 1, 2, 3の計算値(Calculated-1)は、引張補強筋が破断するときの変位を小さく評価して

おり、引張補強筋の直径が大きくなるほどひびわれ発生後の剛性は実験値と一致しない。このため引張軸筋に添付したひずみゲージと平面保持の仮定から求めた引張補強筋位置のひずみと荷重関係を求めた。この関係を図-5に示す。この図が示すように荷重が同じ時の引張補強筋に用いたCFRPのひずみは、同位置のコンクリートひずみより小さくなる。この傾向は、CFRPの直径が増大するほど顕著になる。すなわち、CFRPの付着強度は直径が大きくなるほど小さくなり、このことによりCFRPの付着滑りが生じるからであると考えられる。

4. 2 見かけの応力-ひずみ関係を考慮した 精算法による解析

精算法による解析は、引張補強材に鋼材を用いた場合は、精度の良い計算結果を示したのに対し、CFRPを用いた場合には、実験値と一致しない。そこで、実験結果と既往の研究[8]からCFRPの見かけの張力-ひずみ関係を図-6に示すように定め解析を行った。(a)区間は、コンクリートの付着性状が良好でありCFRPの弾性係数および破断応力は特性値とほぼ同じ場合。(b)区間は、コンクリートとCFRPの間で付着切れが発生し、見かけの弾性係数が低下する場合。(c)区間は、(b)区間よりも付着性状および見かけの弾性係数が低下し、ある点でひびわれ断面から抜け出しが生じるためあたかも降伏したかのような場合を想定している。以上の張力-ひずみ関係から各CFRPの応力-ひずみ関係を求め、これを用いて解析した補正解析値(Calculated-2)は実験から得られるひびわれ発生後の剛性とほぼ

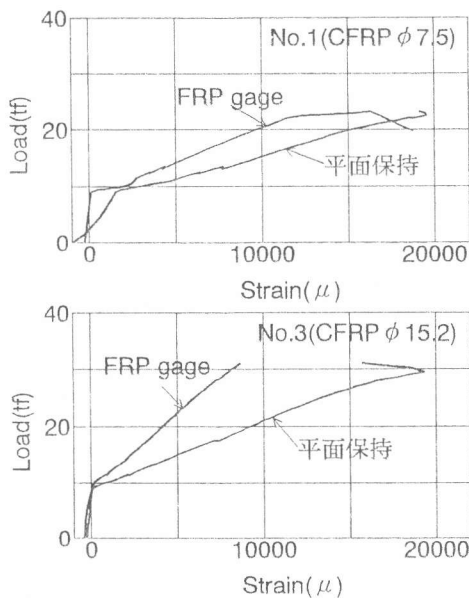


図-5 荷重-ひずみ関係

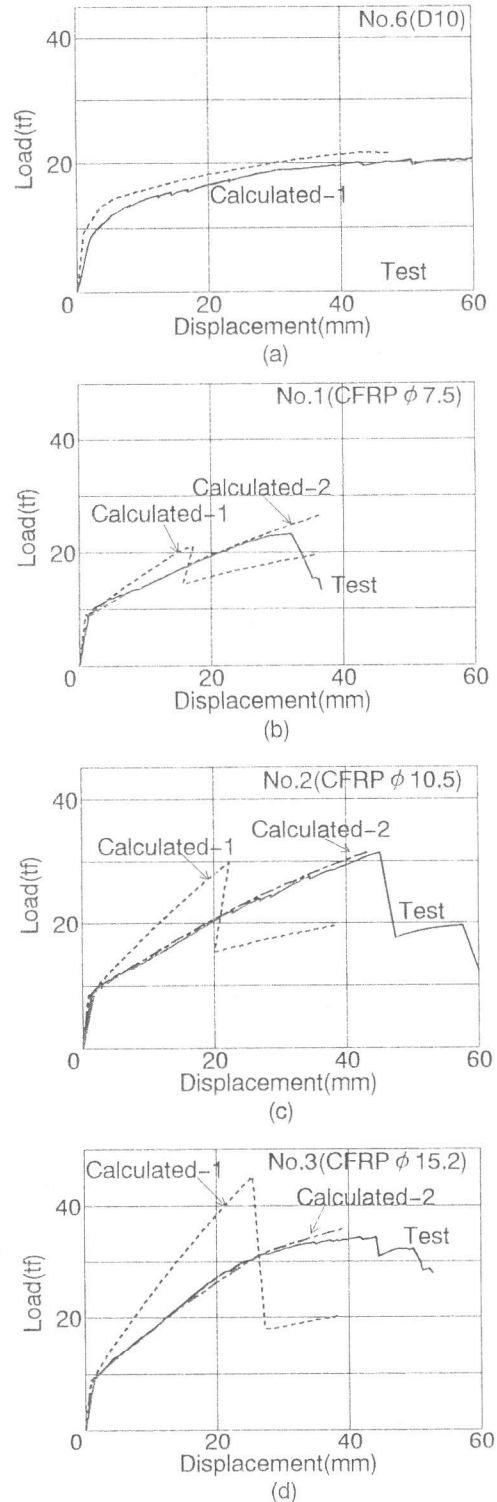


図-4 実験値と解析値の比較

一致する。このことから引張補強筋にCFRPを用いた場合の解析では、FRPの付着性状を十分に考慮する必要があると言える。

5. まとめ

外ケーブルにアラミドロップ、補強筋にFRPを用いたPC部材の研究結果をまとめると以下の様になる。

(1)外ケーブル式ノンメタルPC部材のひびわれ幅は、ひびわれ幅0.2mmまでは、連続繊維補強材の弾性係数を用いることにより既往の算定式で求めることができる。

(2)圧縮部コンクリートを拘束することにより外ケーブル部材の靱性を改善するとともに破壊性状を改善することができる。

(3)CFRPによる引張補強筋比の増加により部材の耐力を増大させることができる。しかし、その比率および引張補強筋比増大の手法を的確に選定する必要がある。

(4)太径のCFRPを引張補強筋に用いた部材の荷重-変位関係は、CFRPの見かけの張力-ひずみ関係を考慮することにより精算法で正確に求めることができる。

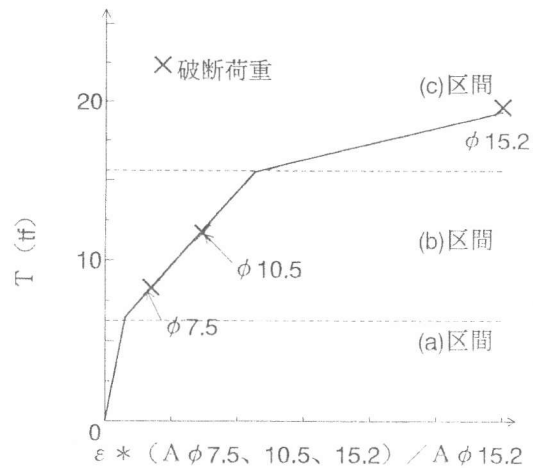


図-6 見かけの張力-ひずみ関係

謝辞

本研究を行うにあたり、元埼玉大学大学院生土田一輝氏、元埼玉大学学生高橋博威君、木次淳子さんには、多大な協力を頂いた。さらに、帝人(株)、東京製鋼(株)から材料の提供頂いた。ここに記して、厚くお礼申し上げます。

参考文献

- [1] 睦好・町田：FRPを外ケーブルに用いたPCはりの力学的性状、土木学会論文集、No. 442/V-16, pp. 153-159, 1992. 2
- [2] 土田・睦好・谷口・喜多：ロープ状新素材を外ケーブルに用いたプレストレスとコンクリートはりに関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2 pp. 899-904, 1993. 6
- [3] 睦好・谷口・喜多・町田：連続繊維を用いたPC部材の曲げ靱性に関する研究、土木学会論文集、No. 460/V-18, pp. 103-111, 1993. 2
- [4] 土田、睦好、谷口、町田：新素材を外ケーブルに用いたPCはり部材の曲げ解析、土木学会第48回年次学術講演会講演概要集、第5部、pp758~759, 1993. 9
- [5] 土木学会：コンクリート標準示方書 平成3年度版
- [6] 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種)構造設計・施工指針・同解説、1986
- [7] 福山、松崎、中野：連続繊維補強コンクリート部材のひび割れ性状、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 15, No. 2 pp. 905-910, 1993. 6
- [8] 菅、島、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、Vol. 15, No. 2 pp. 859-864, 1993. 6