

論文 非貫通ひび割れを有するコンクリートの水密性評価法の検討

遠藤孝夫^{*1}・広永道彦^{*2}・名倉健二^{*3}・田辺忠顕^{*4}

要旨：地下水位より深部に構築されるコンクリート構造物では、設計のうえで水密性の評価が重要項目となる場合がある。筆者らは、これまで地下に構築されるコンクリート構造物の水密性を評価するため、非貫通ひび割れを有するコンクリート部材について有限要素法による評価モデルの提案と透水試験による検証を行ってきた。ここでは前報に引きつづき、ひび割れ幅をパラメータとして人工的にひび割れを導入したコンクリート試験体による透水試験結果と、水密性評価モデルの適合性について検討し、適用範囲を明らかとした。

キーワード：水密性評価モデル、非貫通ひび割れ、透水試験

1. はじめに

近年、コンクリート構造物はその有用性から従来の範囲を超えて使用されるようになり、使用目的や環境などによりコンクリートに要求される性能も変化し複雑で厳しいものになってきている。筆者らは、図-1 に示すような地中の地下水位以下に構築される構造物に要求される性能の一つである水密性に重点を置き、劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法について検討を行ってきた。この検討では、コンクリート構造物の水密性に影響を与える要因としてひび割れに着目し、ひび割れを貫通ひび割れと非貫通ひび割れ（以下表面ひび割れと記す）に分類した。このうち、貫通ひび割れの水密性については、既往の研究成果があることから、これにより漏水量を評価項目とした水密性評価モデルを構築した。一方、表面ひび割れの水密性については、水密性に関する研究がほとんどなされていなかったため、ひび割れをモデル化した二次元の有限要素法浸透流解析に基づいて解析を実施し、水密性評価モデルを構築した^{1),2),3)}。このモデルは解析的に求められたものであり、その適用性や精度について課題が残されていた。

このようなことから、人工的に設けた表面

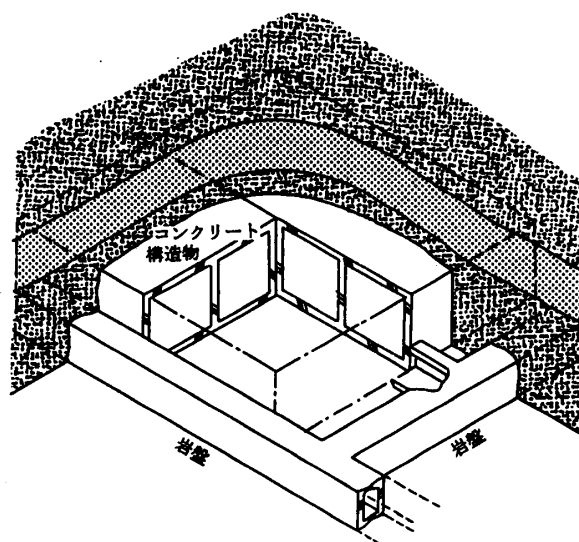


図-1 地中コンクリート構造物の概念図

ひび割れを有するコンクリート試験体を製作し、この試験体を用いた透水試験を行い、表面ひび割れを有するコンクリートの水密性評価モデルを実験的に検証し、モデルの適用性の評価と高度化を図る必要が認められた⁴⁾。

本論文は、パラメータとして表面ひび割れの幅と深さを変化させたコンクリート試験体で透水試験を行い、これを基にその水密性について評価するとともに、水密性評価モデルを検証した結果についてまとめたものである。

*1 東北学院大学教授 工学部土木工学科 工博（正会員）

*2 （財）電力中央研究所バックエンドプロジェクト部天然バリアチーム 主任研究員（正会員）

*3 清水建設（株）土木本部技術第一部グループ長（正会員）

*4 名古屋大学大学院教授 工学系研究科土木工学専攻 工博（正会員）

表-1 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
25	14	4.5	55	47.0	153	279	887	1024	0.658

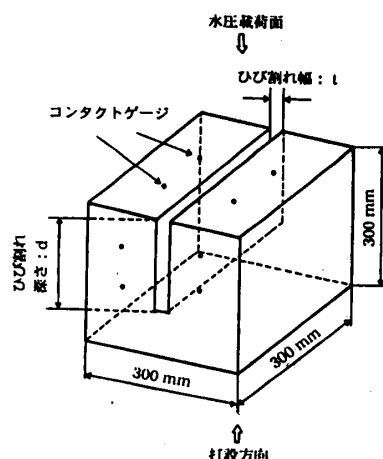


図-2 試験体の形状寸法

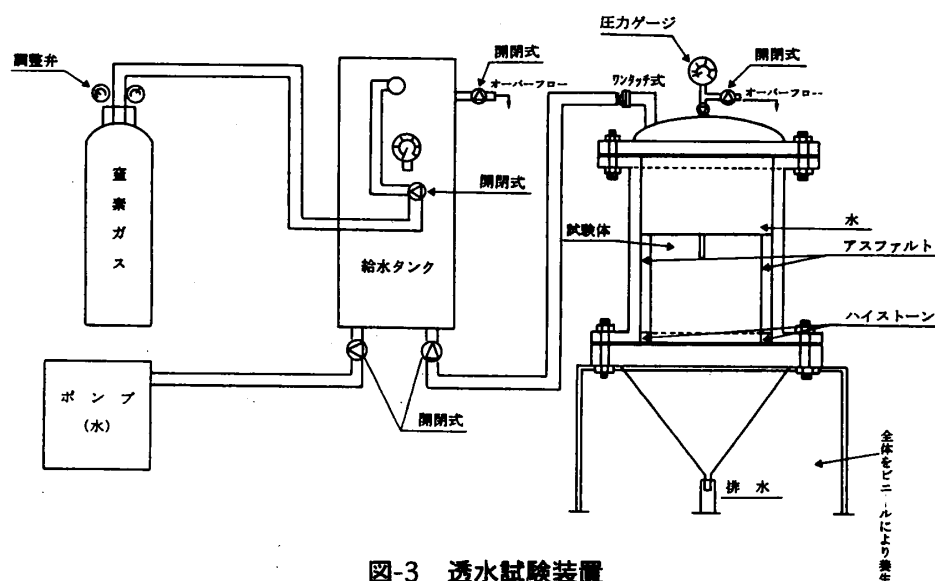


図-3 透水試験装置

2. 表面ひび割れを有するコンクリート試験体を用いた透水試験

2.1 実験概要

(1) 使用材料と配合

試験体を用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。セメントは低発熱形高炉セメントB種（普通ポルトランドセメント：高炉スラグ=45：55），細骨材は陸砂と砕砂の混合（混合比率=40：60），粗骨材は碎石，混和剤はリグニンスルホンサン系AE減水剤を使用した。

(2) 試験体

試験体の形状寸法は、図-2 に示すように一辺が30cmの立方体とし、その一面に人工的にひび割れを設けた。人工ひび割れの深さは、0，10，15，20，25cmの4水準とした。試験体は、人工ひび割れとして厚さ2，1，0.5，0.3mmの

ステンレス板をひび割れ深さまで設置した状態でこれと反対の面からコンクリートを打ち込んで製作した。また、試験体は材齢21日までは20℃の室内で散水養生し、その後7日間は20℃・湿度60%の室内に放置した。材齢28日で透水試験に供した。

なお、ひび割れ幅の変動を確認するため、透水試験の直前までコンタクトゲージによりひび割れ幅を測定し、ひび割れ幅が変動していないことを確認した。

(3) 透水試験装置

透水試験装置を図-3 に示す。この装置は最大水圧30kgf/cm² (2.94N/mm²) まで载荷可能である。透水試験はひび割れを設けた面側から水圧を载荷するアウトプット法を採用している。

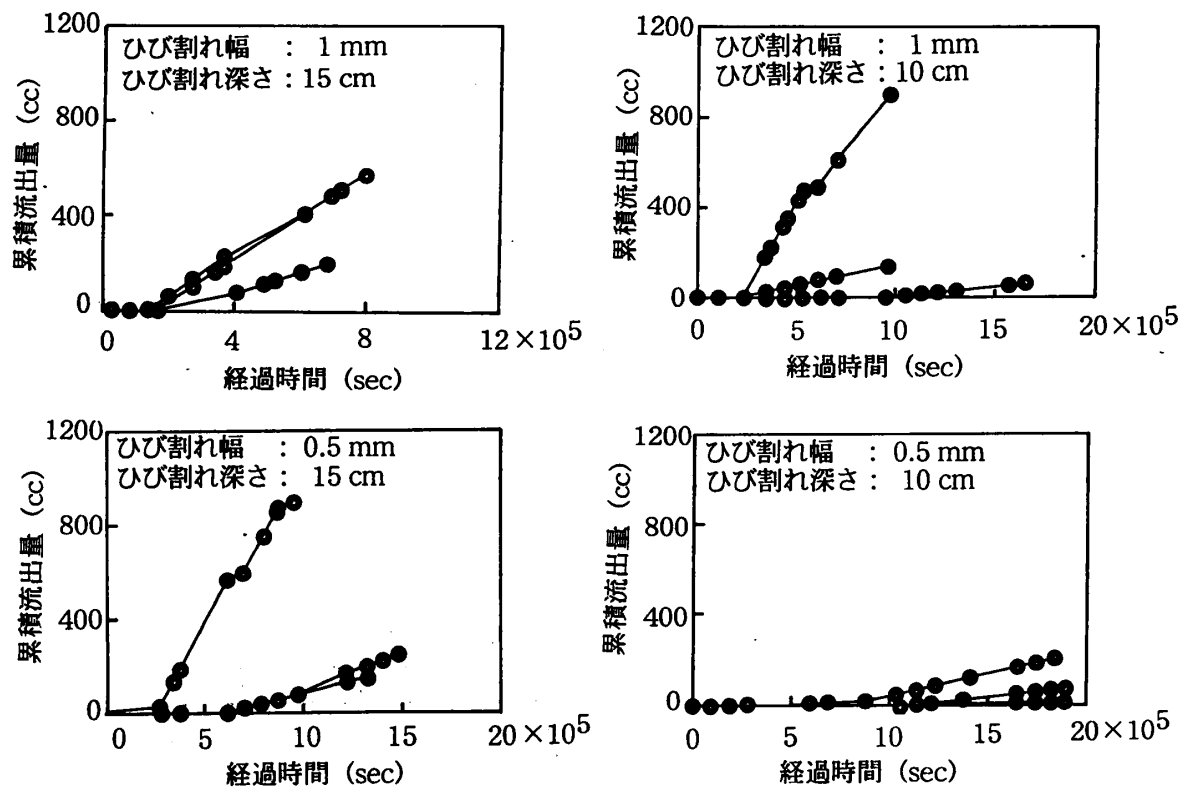


図-4 累積流出量と経過時間（各条件下で試験体3体）

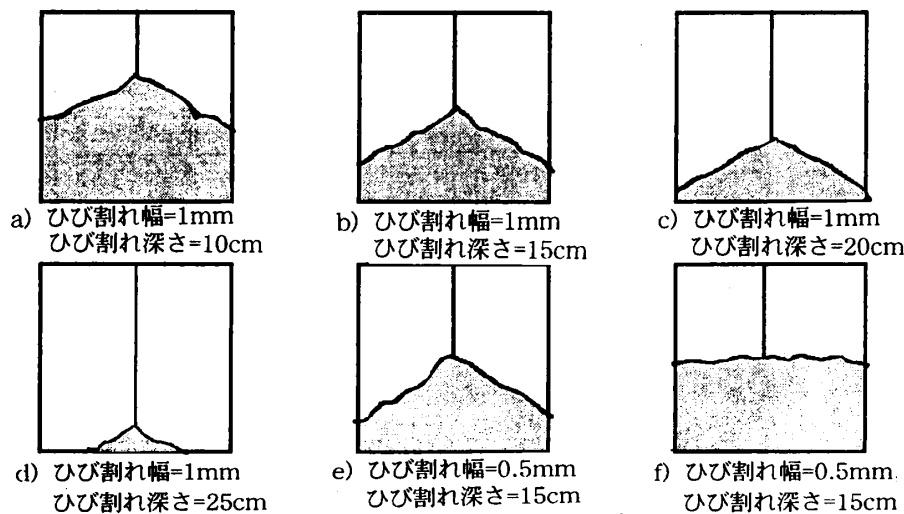


図-5 水分の残っていた領域

2.2 実験結果

透水実験で得られた累積流出量と経過時間との関係の数例を図-4 に示す。これらより、同じ条件で行われた実験でも透水性状にかなりの差異が生じていることがわかる。すなわち、水が流出するまでの時間や、一旦流出が始まってからの単位時間当たりの流出量にばらつきがある結果となっている。

表面ひび割れがある場合の水の通過領域を確

かめるために、実験終了後試験体周りのアスファルトを暖めて溶かして除去し、試験体を割ってみると、水分の残っていた領域がみられた。これらの領域の例を図-5 に示す。これらより、多くの場合は人工ひび割れ先端から扇状に水分移動が行われていることを示唆しているが、一部は水平に広がっている試験体もあり（図-5 のe)とf)は同一条件）、水分が特殊な経路をたどって移動している場合もあることが示唆された。

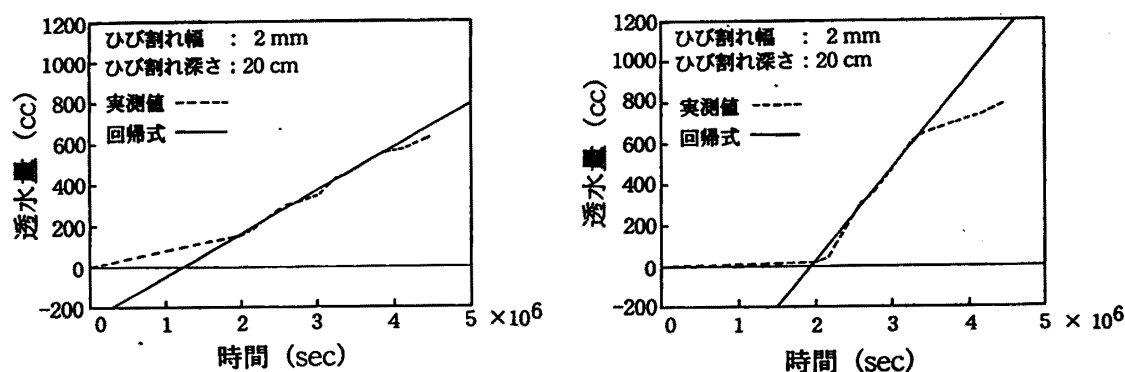


図-6 透水係数の算出

表-2 実験で得られた見かけの透水係数

単位: cm/s

ひび割れ無し	ひび割れ深さ	ひび割れ幅			
		2mm	1mm	0.5mm	0.3mm
1.29×10^{-7} 2.54×10^{-8} 3.23×10^{-8}	10cm		1.07×10^{-8}	2.30×10^{-8}	1.24×10^{-7}
			2.00×10^{-8}	1.79×10^{-9}	9.77×10^{-8}
			1.22×10^{-7}	1.21×10^{-8}	
	15cm	1.19×10^{-8}	4.42×10^{-8}	2.42×10^{-8}	
		8.38×10^{-9}	9.62×10^{-8}	3.46×10^{-8}	
		2.76×10^{-8}	1.02×10^{-7}	1.65×10^{-7}	
	20cm	4.97×10^{-8}	2.80×10^{-8}		
		2.32×10^{-8}	8.34×10^{-8}		
	25cm	1.65×10^{-7}			
		2.62×10^{-6}			

累積流出量と経過時間より次式により透水係数を算定した。

$$K = \frac{Q}{\frac{P}{W} A} \quad (1)$$

ここに、 K : 透水係数 (cm/s)

Q : 透水量 (cm^3/s)

P : 水頭 (cm)

W : 部材厚 (cm)

A : 透水面積 (cm^2)

透水係数算出の例を図-6 に示す。透水係数を求める際は、流出量が定常状態にある区間を選んで、算出した透水係数とひび割れ深さの関係をひび割れ幅をパラメータとして示せば表-2, 図-7 のようになる。

これらの図表より、ひび割れ深さが10cmではひび割れ幅が1mm, 0.5mm, 0.3mmのいずれでも見かけの透水係数はほぼ同じ範囲にあり、ひび割れ幅が0.3mm以上ではひび割れ幅の影響は無いものと判断される。また、ひび割れ幅が2mm, 1mm, 0.5mmのいずれでもひび割れ深さが増大するとともに見かけの透水係数も増加する傾向が明らかとされ、その増加量もひび割れ深さの増大とともに急激に増加しているように見受けられた。

3. 水密性評価モデルとその検証

3.1 水密性評価モデルの概要

著者らが提案している水密性評価モデルは、コンクリートに非貫通ひび割れが生じている場

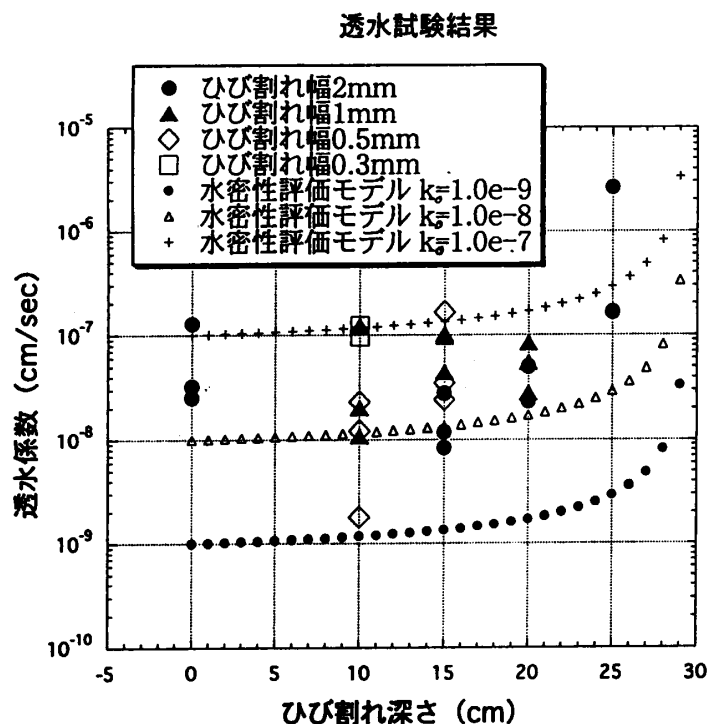


図-7 透水試験結果

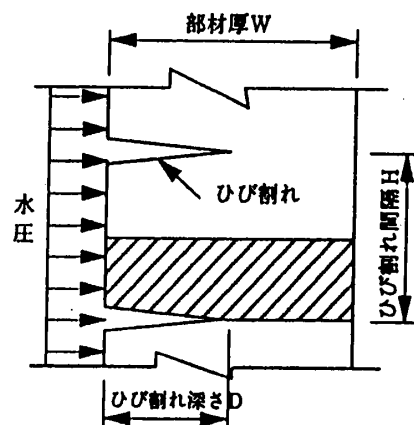


図-8 解析モデル概念図

合を対象としたものである。すなわち、図-8 のように、ある部材厚 (W) の断面に任意のひび割れ (深さ D) が生じており、この部材の平均ひび割れ間隔 (H) が既知の場合に、この部材に使用されているコンクリートの透水係数より、この非貫通ひび割れ状態での水密性を評価しようとするものである。具体的には、部材の状態を図-8 のように考え、飽和・不飽和浸透流理論による二次元有限要素法解析を行い、各パラメータによる浸透流量への影響を解析的に求め式 (2) を示している。

$$\frac{Q}{Q_0} = \frac{\frac{D}{W}}{(0.0793H + 0.5672) - (0.0831H + 0.5240) \cdot \frac{D}{W}} + 1 \quad (2)$$

ここに、 Q : 任意のひび割れ深さ、部材厚、ひび割れ間隔における単位奥行き当たりの浸透流量 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)
 Q_0 : ひび割れの無い場合の単位奥行き当たりの浸透流量 ($\text{cm}^3/\text{s}/\text{cm}$)
 D : ひび割れ深さ (cm)

W : 部材厚 (cm)

H : ひび割れ間隔 (cm)

すなわち、表面ひび割れを有するコンクリート部材のひび割れ深さ、部材厚およびひび割れ間隔がわかれば、その水密性は浸透流量比で評価できるとしたもので、浸透流量比は見かけの透水係数比でもある。

3.2 水密性評価モデルの検証

実験で得られた見かけの透水係数と水密性評価モデルより算出した見かけの透水係数の計算値を図-7 に示す。水密性評価モデルでは、コンクリート単体の透水係数 k_0 をそれぞれ 10^{-7} , 10^{-8} , 10^{-9}cm/s としたケースについて計算値を示している。これらの実験と解析結果より、ばらつきはあるものの、ひび割れ深さの増大とともに見かけの透水係数が増加する傾向は一致していることがわかる。しかし、ひび割れ深さが増大するとともに、実験による見かけの透水係数の増加が大きくなり、水密性評価モデルの適用範囲はひび割れ深さが15cmぐらまでとするのが妥当と思われる。すなわち、これまでの結果から、筆者らの提案した水密性評価モデルは

部材厚30～50cmで、ひび割れ深さに対する部材厚 (D/W) が0.5以内の範囲で用いるべきと考えられる。

D/W が0.5を越えるにともない見かけの透水係数が大きく増加する理由は、いくつか考えられる。水密性評価モデルについては、式(2)を求める場合の部材厚の取り方が42～50cmであったことも幾分影響しているかもしれない。また、 D/W の増大により実際に浸透する面積が減少することより、コンクリート内部の応力勾配やコンクリートの不均一性の影響を強く受ける可能性がある。試験での水圧は多くのケースで30 kgf/cm² (2.94N/mm²) とし、ひび割れ幅1mmでひび割れ深さが200mmの場合で20kgf/cm² (1.96N/mm²)、ひび割れ幅2mmでひび割れ深さが250mmの場合で5kgf/cm² (0.49N/mm²) としているが、ひび割れ先端に応力集中を起こす恐れがあり、これによりコンクリート内部に微細なひび割れを生じさせた可能性も考えられる。

さらに、コンクリート打込み時に混入した空気も含め、打設方向も考えたコンクリート内の空隙分布(細孔径分布)や、コンクリートの内部に生じている応力状態によっても水の浸透性状は変化するものと考えられる。いずれにせよ、今後は著者らの提案した水密性評価モデルの適用できる最小ひび割れ幅を明確にすることと、透水性状をコンクリートの内部状況と詳細に対応づけて評価することが重要と考えられる。

4. 結論

本論文では、地下水位より深部に構築されるコンクリート構造物を念頭に、表面ひび割れを有するコンクリート部材の水密性の評価法を確立するため、ひび割れ幅とひび割れ深さをパラメータとした透水試験を行い、この結果とこれまでに有限要素法にもとづいて構築した水密性評価モデルとの検証を行った。その結果以下の結論が得られた。

(1) 透水試験の結果、ひび割れ幅が2mmから0.5mmの範囲ではひび割れ深さが深くなるほど

見かけの透水係数は増加し、ひび割れ幅による差異はみられない。

(2) 著者らが提案した水密性評価モデルによる算定法は、ひび割れ幅が2mmから0.5mmの範囲で、部材厚に対するひび割れ深さの比 (D/W) が0.5程度までは有効である。ただし、これ以下のひび割れ幅やこれ以上の D/W については検討が必要である。

今後は、コンクリート内部の状況と透水性状を対応づけて詳細な透水実験を行いたいと思っている。

謝辞： 本研究は文部省科学研究費補助金(基盤研究(A)(1)、課題番号09305031、研究代表者：名古屋大学教授 田辺忠顕)の一部として実施されたことを付記いたします。

参考文献

- 1) 名倉健二, 辻村捷太郎, 遠藤孝夫, 広永道彦: ひび割れを有するコンクリートの止水性能に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp723-726, 1992.5
- 2) 広永道彦, 名倉健二, 遠藤孝夫, 小野定, 辻村捷太郎: 劣化作用を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案, 土木学会論文集, No.502/V-25, pp.63-72, 1994.11
- 3) 広永道彦, 河西 基: 劣化の進行を考慮したコンクリート構造物の長期止水性能評価手法の提案, 電力中央研究所報告, 1996.3
- 4) 名倉健二・広永道彦・遠藤孝夫・小野 定: 非貫通ひび割れを有するコンクリートの水密性評価に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp661-666, 1997.6