

論文 簡易凍結融解試験装置による表面緻密性の評価

湯北 記代彦^{*1}・橋本 紳一郎^{*2}・橋本 親典^{*3}・渡辺 健^{*4}

要旨：筆者らは、円柱供試体および既存コンクリート構造物のかぶりコンクリートの一部をモデル化した平板供試体を対象とした液体窒素を用いた簡易な凍結融解試験方法を提案してきた。本研究では、材齢の異なる円柱供試体および平板供試体を用いて、かぶりコンクリートの表面緻密性を簡易凍結融解試験装置によって定量的に評価する可能性を検討した。その結果、供試体種別に関係なく材齢初期では、サイクル数に伴う相対動弾性係数の著しい低下が確認された。しかしながら、同一配合、特に水セメント比が大きい場合、供試体種別で耐久性指数が大きく異なり、劣化機構が異なることが明らかになった。

キーワード：液体窒素，簡易凍結融解試験装置，相対動弾性係数，耐久性指数

1. はじめに

寒冷地環境下でのコンクリート構造物の維持管理において、凍害の影響を考慮することは重要な要素となる。コンクリートの凍害は、施工初期の硬化過程で劣化する初期凍害と、コンクリート硬化後、長年にわたる凍結融解の繰返し作用によって徐々に劣化する通常の凍害がある。初期凍害を受けるとその後適当な温度で養生しても強度、耐久性、水密性など、コンクリートの品質が著しく低下する。

現在、我国ではコンクリートの凍結融解作用に対する抵抗性を検討する試験方法として、2001年にはじめて制定された「コンクリートの凍結融解試験方法(JIS A 1148)」がある。このJIS規格試験方法は、凍害劣化であるコンクリート内部組織の膨張による脆弱化を捉える有効な方法とされてきた。しかしながら、その試験に非常に多大な労力と時間が必要とされることや、評価に用いる相対動弾性係数のための共鳴振動による動弾性係数測定試験(JIS A 1127-2001)は、任意のサイズや形状に適用できない等の制約がある。このJIS規格試験方法だけでは様々な凍害劣化の評価は難しいという報告がある¹⁾。

これまでに筆者らは、このJIS規格試験方法に代わる新しい試験方法として、液体窒素を使用し、円柱供試体を対象とした室内規模の凍結融解試験方法を提案してきた²⁾。本研究では、この室内規模の試験方法と、既存コンクリート構造物に適用可能な簡易凍結融解試験装置を用いて、材齢1.3日の初期材齢を含む養生期間、配合や供試体の含水率を主たる実験パラメータとして、凍結融解試験終了後の供試体の表面強度と耐久性指数の相関性を求め、かぶりコンクリートの表面緻密性評価の可能性を検討した。

2. 実験概要

本研究は、簡易的に円柱供試体を液体窒素に浸して表面を評価した試験と簡易凍結融解試験装置を使用して液体窒素を平板供試体表面に吹き付けて検討した2つの実験内容で構成されている。

2.1 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度：3.16g/cm³)を使用した。骨材は細骨材に徳島県阿南市下大野町産川砂(密度：2.62g/cm³, F.M:2.84)、粗骨材に最大寸法25mmの徳島県

*1 戸田建設株式会社 (正会員)

*2 函館工業高等専門学校 環境都市工学科 助手 博士(工学) (正会員)

*3 徳島大学大学院 ソフトウェア研究部エクスプレザイ部門 教授 工学博士 (正会員)

*4 徳島大学大学院 ソフトウェア研究部エクスプレザイ部門 助手 博士(工学) (正会員)

表 - 1 コンクリートの配合

配合名	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						空気量の 実測値 (%)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 剤	
40-(AE)	8.0±2.5	4.5±1.0	40	43	170	425	732	949	C×0.015	C×0.008	5.0
60-(AE)		4.5±1.0	60	47	176	293	845	931	C×0.015	C×0.007	4.5
80-(AE)		4.5±1.0	80	51	182	228	936	879	C×0.015	C×0.005	4.2

鳴門市撫養町産砕石(密度:2.56g/cm³,F.M:6.85)を使用した。混和剤には,AE減水剤,および空気量調整剤としてAE剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合

使用したコンクリートの配合を表-1に示す。配合は,スランプと目標空気量を一定とし,水セメント比を変化させた合計3配合とした。表中の配合名は,水セメント比-(AE剤)を示す。また,表中には,空気量の実測値も示す。

2.3 供試体形状寸法及び試験条件

2.3.1 円柱供試体表面での検討

円柱供試体表面での検討には,100×200mmの円柱供試体を使用した。供試体の材齢は1,3,14,28日とし,湿潤状態(含水率100%とする)で試験を行った。材齢28日においては,各配合で湿潤状態,含水率70,85%の3種類で試験を行った。湿潤状態の供試体は,水中養生させた供試体を材齢28日後に取り出し,表面の水分を拭き取った状態である。含水率70,85%の供試体は,湿潤状態と同様の供試体を,各サイクルの凍結開始前に供試体の含水率が吸水率の70,85%になるまで乾燥させた状態である。含水率Q(%)は供試体の質量より,以下の式(1)で求めた。

$$Q = (m - m_d) / (m_s - m_d) \times 100 \quad (1)$$

Q:含水率(%)

m:測定時のコンクリートの質量(g)

m_s:十分に吸水させたコンクリートの質量(g)

m_d:完全に乾燥させたコンクリートの質量(g)

2.3.2 平板供試体表面での検討

平板供試体表面での検討には,200×200×

100mmの平板供試体を使用した。また,供試体の材齢は1,3,28日とし,全て湿潤状態で試験を行った。

2.4 液体窒素を用いた簡易凍結融解試験方法

試験方法は既往の研究²⁾より,2種類の試験方法で簡易凍結融解試験を行った。

2.4.1 円柱供試体表面の簡易凍結融解試験方法

写真-1に実験状況を示す。円柱供試体表面の簡易凍結融解試験では,まず,写真-1に示す保冷用容器を使用し,容器内に円柱供試体を入れ,容器内に約210mlの液体窒素を注ぐ。1分間液体窒素に浸した後,供試体を容器から取り出し,



写真 - 1 円柱供試体を用いた簡易凍結融解試験の実施状況



写真 - 2 平板供試体を用いた簡易凍結融解試験の実施状況

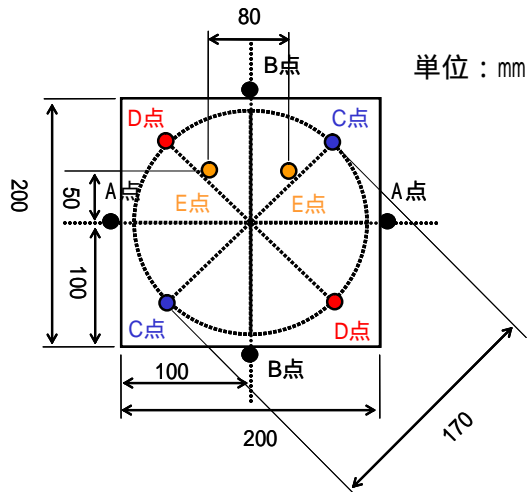


図 - 1 平板供試体のセンサー計測位置

約 40 程度の温水で 5 分間浸し融解させる。完全に融解した後、供試体の水分を拭き取り各種測定を行う。この手順を 1 サイクルとし、この作業を繰り返し行い、相対動弾性係数が 60% 以下になった時点、またはサイクル数 10 回で試験終了とした。動弾性係数は、超音波伝播時間を超音波測定器により測定し、その値から求めた。測定位置は、供試体を液体窒素に浸すため、最もよく凍結している供試体底面部から 15mm 離れた側面(約-190)とした。伝播距離は 100mm である。

2.4.2 平板供試体表面の簡易凍結融解試験方法

実験状況を写真 - 2 に示す。平板供試体表面には簡易凍結融解試験装置を使用した。試験方法は円柱供試体の場合とほぼ同様であるが、保冷用容器は使用しない。供試体も液体窒素に浸すのではなく、液体窒素を供試体の表面に吹き付ける。液体窒素を吹き付けた時間は、1 分間(約 420ml)である。

超音波伝播時間を測定するための発振端子と受振端子の測定位置を図 - 1 に示す。側面での測定は表面から 15mm の位置で A-A, B-B 間、また表面での測定は C-C, D-D 間、液体窒素が最も吹き付けられている E-E 間(約-190)で計測を行った。

2.5 評価方法

(1) 相対動弾性係数及び耐久性指数

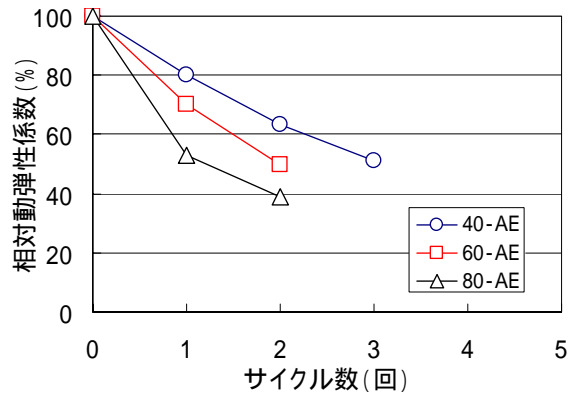


図 - 2 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 1 日

各試験で測定した超音波伝播時間を用いて動弾性係数は、緒方ら³⁾の研究より算出した。試験は各試験供試体 2 体で行い、測定は各サイクル数で 2 回以上の測定を平均した。

また、既往²⁾の研究より、相対動弾性係数と耐久性指数を算出した。相対動弾性係数は、動弾性係数の値を使用して求めた。耐久性指数は、試験終了時のサイクル数を 10 回とし、サイクル数と相対動弾性係数から算出した。

(2) 表面強度

試験終了後の供試体の強度測定は、硬化コンクリートのテストハンマー強度の試験方法(JSCE-G504-1999)に基づいて行った。

3. 試験結果及び考察(円柱供試体表面での検討)

3.1 円柱供試体表面の簡易凍結融解試験結果

図 - 2 と図 - 3 に、材齢 1 と 3 日におけるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。材齢 1 日では、いずれの配合も 3 サイクル目で相対動弾性係数が 60% 以下になった。また、材齢 3 日の場合、水セメント比の小さい配合名：40-AE は 10 サイクル目で相対動弾性係数が 60% 程度まで低下し、その他の配合名：60-AE, 80-AE は 3 サイクル目で相対動弾性係数が 60% 以下になった。材齢初期の段階では強度が発現していないため、AE 剤によりエントレインドエアを十分に混入させた供試体であっても相対動弾性係数の低下が著しい。また、水セメント比が大きい場

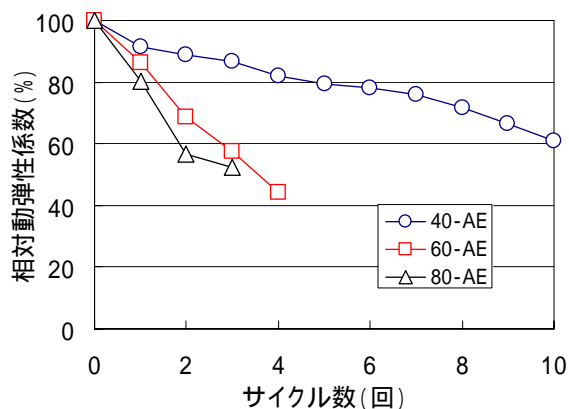


図 - 3 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 3 日

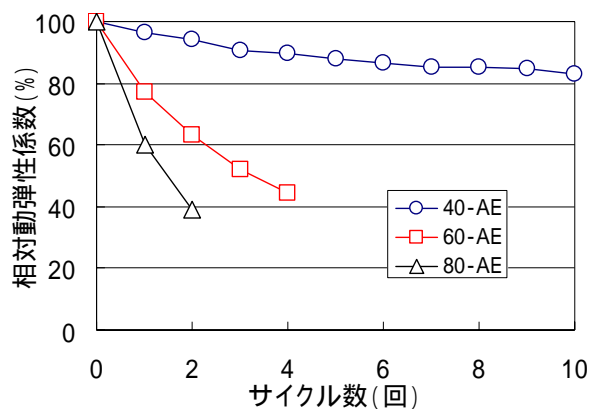


図 - 4 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 14 日

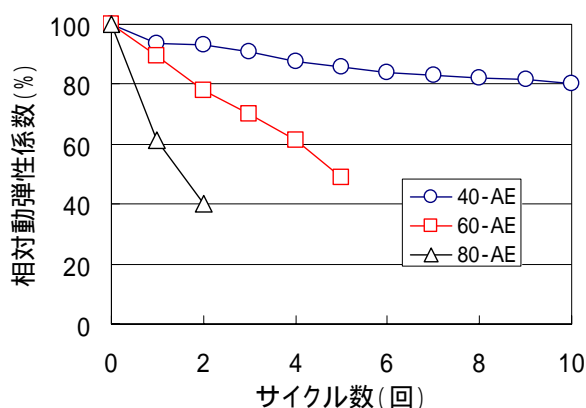


図 - 5 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 28 日

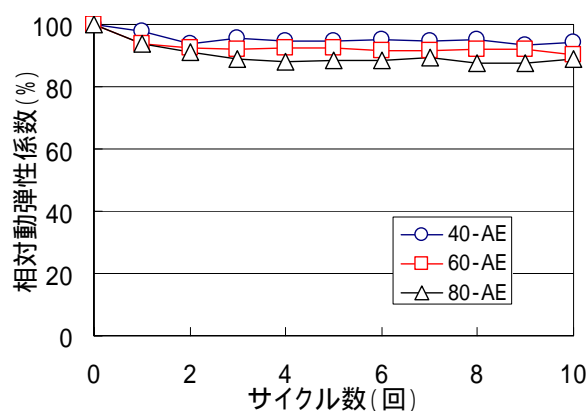


図 - 6 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 28 日 (含水率 70%)

合、耐凍害性は相当低いことを示している。

図 - 4 と図 - 5 は、それぞれ材齢 14 と 28 日におけるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。図より、水セメント比が小さく、供試体表面が緻密となる配合名：40-AE と水セメント比が大きく、供試体表面が緻密ではない配合名：80-AE は、材齢の進行に伴う相対動弾性係数の関係に違いは見られず、材齢 3 日と同様の傾向を示した。材齢 14 日以降では、十分な強度発現とコンクリート内部及び表面が緻密になっているためと考えられる。

以上から、水セメント比が 80% と極端に大きく、供試体表面が緻密ではない配合に関しては、材齢とは無関係にサイクル数初期、特にサイクル数が 1 または 2 サイクル目の相対動弾性係数から配合の違いを評価できる。

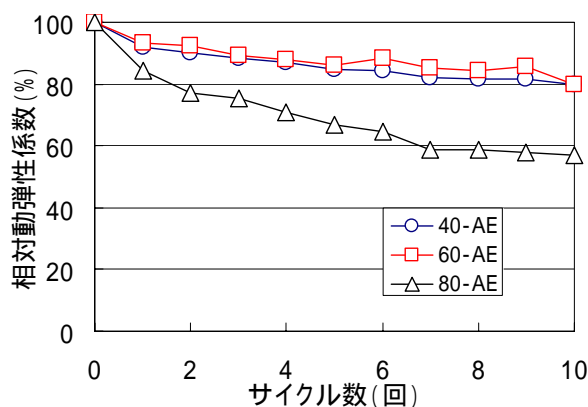


図 - 7 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 28 日 (含水率 85%)

3.2 円柱供試体の含水率の影響

図 - 6、図 - 7 に、含水率 70% と含水率 85% の状態の円柱供試体による試験結果を示す。

含水率 70% の場合は、水セメント比の違いによる相対動弾性係数の変化の影響はほとんどな

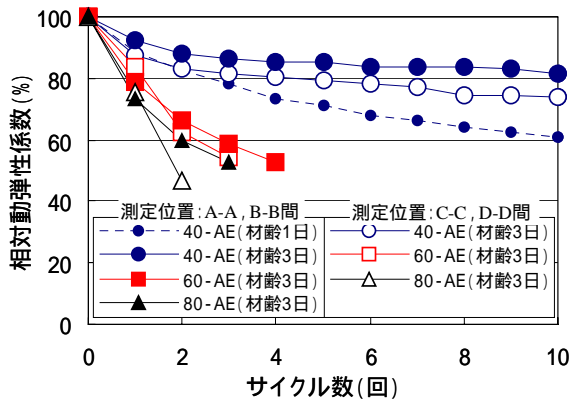


図 - 8 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 1, 3 日

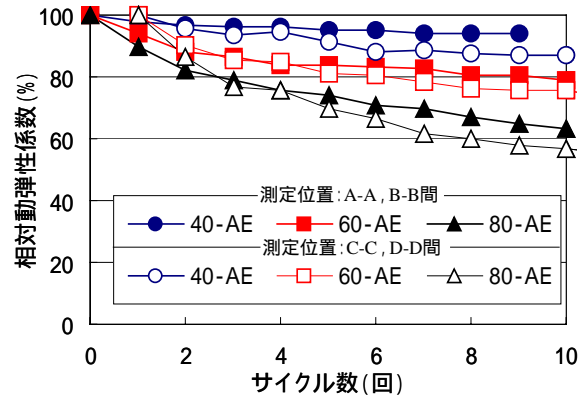


図 - 9 サイクル数と相対動弾性係数の関係
材齢 28 日

く、供試体にひび割れや剥離も発生しなかった。含水率 70% の場合では、液体窒素を用いても水セメント比の違いは確認できない。

含水率 85% の場合は、配合名：40-AE と 60-AE で、相対動弾性係数が同様の傾向を示したが、水セメント比の大きい配合名：80-AE は 7 サイクル目で相対動弾性係数が 60% 以下まで低下した。図 - 5 の含水率 100% の結果とは異なるが、含水率 85% 程度の供試体では、水セメント比が極端に大きい供試体や、強度が低い供試体の劣化が評価できる。

4. 試験結果及び考察(平板供試体表面での検討)

4.1 平板供試体表面の簡易凍結融解試験結果

図 - 8 に材齢 1 日の配合名：40-AE と材齢 3 日のサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。供試体の測定位置は、平板供試体側面(測定位置:A-A,B-B間と測定位置:C-C,D-D間)である。平板供試体に簡易凍結融解試験装置を使用した場合、材齢 1 日の配合名：40-AE の他は、強度が発現していないため安定した測定を行うことは出来なかった。また、材齢 3 日では、配合名：60-AE と配合名：80-AE のサイクル数初期で相対動弾性係数が 60% 以下になった。これらは、図 - 3 の結果と同様な傾向を示しており、また、同様に 2 サイクル目で水セメント比の大きい配合と他の配合との違いを評価できた。

図 - 9 に材齢 28 日、平板供試体側面(測定位

置：A-A,B-B間と測定位置：C-C,D-D間)の測定によるサイクル数と相対動弾性係数の関係を示す。配合名：40-AE の相対動弾性係数に変化はなく、配合名：60-AE と配合名：80-AE の相対動弾性係数は、10 サイクル終了時でそれぞれ 80, 60% 程度であった。図 - 8 の結果と比較した場合、配合名：60-AE, 80-AE は材齢 3 日での耐凍害性は劣るが、材齢 28 日では強度増進に伴い、耐凍害性を有する。以上から、材齢 28 日以降の平板供試体では、簡易凍結融解試験装置を使用した場合、10 サイクル程度行うことにより、水セメント比の大きい配合と他の配合との違いを評価できる。

しかし、図 - 5 のようには、サイクル数初期で相対動弾性係数が 60% 以下まで低下しなかった。平板供試体の場合、凍結融解作用を受けているのは液体窒素を吹き付けている表面部分だけだが、円柱供試体では底面部から約 30mm の位置までを均等に凍結・融解させている。試験方法が違うため、劣化の進行速度の違いにより、結果に差が生じたと考えられる。供試体種別によって、サイクル数に伴う相対動弾性係数の低下の傾向は必ずしも同じではない。特に水セメント比が大きいほど、この差異が大きくなる。

また、簡易凍結融解試験では、側面での測定だけでなく、表面での測定も可能であることが明らかになった。一方、液体窒素が最も吹き付けられている E-E 間での計測は、測定距離が近

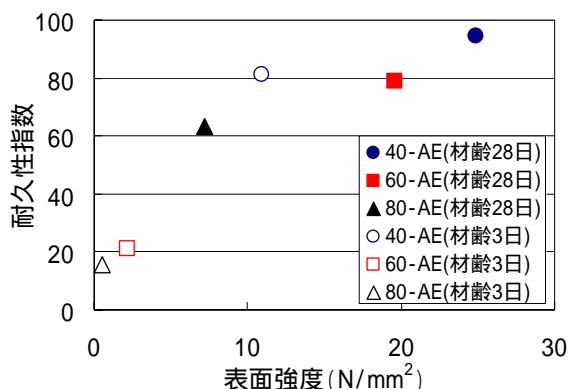


図 - 10 表面強度と耐久性指数の関係
(材齢 3, 28 日, 平板供試体)

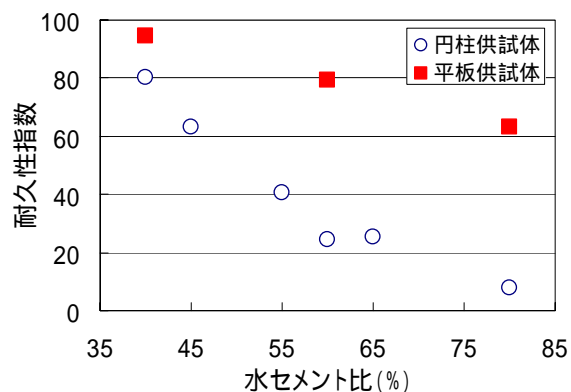


図 - 11 水セメント比と耐久性指数の関係

いため若干の誤差が生じる。しかしながら、表面での計測と同様の傾向を示した。

4.2 耐久性指数

図 - 10 に材齢 3, 28 日の平板供試体における表面強度と耐久性指数の関係を示す。試験終了後の平板供試体の表面強度が約 10N/mm² のとき、耐久性指数は 80 以上あり十分な耐凍害性を有する。また、材齢 3 日で表面強度の弱い配合に関しても、簡易凍結融解試験方法により耐久性の評価が十分可能であった。

図 - 11 に水セメント比と耐久性指数の関係を示す。円柱供試体では、水セメント比が小さいほど耐久性指数も大きくなる傾向が確認できた。同じ水セメント比における円柱供試体と平板供試体の耐久性指数に差はあるが、平板供試体でも水セメント比と耐久性指数の相関性を示した。

以上の実験的検討によって、かぶりコンクリートの表面緻密性を、平板供試体に用いた簡易凍結融解試験装置によって定量的評価できる可能性を示唆することができた。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に記す。

- (1) 円柱供試体, 平板供試体の供試体種別及び試験方法に関係なく, 材齢初期における簡易凍結融解抵抗性は, 空気量が十分であっても相対動弾性係数の著しい低下が認められた。

- (2) 水セメント比が大きく, 供試体表面が緻密ではない配合に関しては, サイクル数初期の相対動弾性係数の関係から配合の違いを評価できる。
- (3) 平板供試体の試験終了後の表面強度が高いほど耐久性指数が高く, 表面緻密性と耐凍害性には強い相関性がある。

謝辞

本研究の一部は, 日本学術振興会平成 18 年度科学研究費補助金の基盤研究(B)(2) (課題番号 17360205, 研究代表: 橋本親典) に基づき実施されたものであることを付記し, 感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 庄谷征美, 月永洋一: 東北地方のコンクリート構造物の凍害について, コンクリート工学, Vol.42, No.12, pp.3-8, 2004.12
- 2) 湯北記代彦, 橋本紳一郎, 加地貴, 橋本親典: 液体窒素を用いた急速凍結融解試験によるコンクリート表面劣化の定量化, コンクリート工学年次論文集, Vol.28, No.1, pp.1481-1486, 2006
- 3) 緒方英彦, 服部九二雄, 高田龍一, 野中資博: 超音波法によるコンクリートの耐凍結融解特性の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.1, pp.1563-1568, 2002