

論文 セメントペーストに着目した若材齢コンクリートの引張クリープ特性

新美 利典^{*1}・糸山 豊^{*2}・上原 匠^{*3}・梅原 秀哲^{*4}

要旨：本研究では、若材齢コンクリートにおいて、セメントペーストに着目した引張クリープ試験を行い、引張クリープに影響を与える配合要因を明確にするとともに、その定量的な評価方法について検討を行った。その結果、主たる配合要因には単位セメントペースト量と水セメント比が挙げられ、両者の影響を組み込んだ提案式により若材齢コンクリートにおけるクリープの定量的な評価が可能となることが明らかとなった。

キーワード：若材齢コンクリート、引張クリープ、セメントペースト、温度応力

1. はじめに

コンクリートのクリープは応力を緩和することから、若材齢時においてはクリープにより温度応力等の拘束応力が緩和され、実際の拘束応力は弾性解析で得られた値と異なり、解析結果に大きな影響を与える。したがって、発生する応力を精度よく予測するためには、若材齢時のクリープ挙動を定量的に評価する必要がある。

筆者らは、これまでに若材齢コンクリートの引張クリープ試験に基づいて、載荷材齢、養生温度、載荷温度、載荷応力等が引張クリープ挙動に与える影響について検討し、そのモデル化を行ってきたが¹⁾²⁾、配合に関する検討は十分にはなされていない。

一般に、コンクリートのクリープの主要因はセメントペースト(以下、ペーストと称す)部分にあり、骨材はペーストのクリープを拘束すると考えられている。また、骨材の拘束効果については単位骨材量がクリープに影響することが推察されるが、このことは相対的に単位セメントペースト量(以下、単位ペースト量と称す)と関連している³⁾。

そこで本研究では、若材齢コンクリートにおいて、クリープ予測式に配合の影響を組み込む

ことを目的に、ペーストに着目した引張クリープ試験を行い、ペースト部分がコンクリートの引張クリープに与える影響を明確にするとともに、その定量的な評価方法の検討を行った。

2. 引張クリープ試験概要

引張クリープ試験用供試体には、中心部分が $\phi 7.5 \times 13.4\text{cm}$ のドックボーン型供試体²⁾を採用した。また、クリープひずみと供試体温度を測定するために、供試体内部に埋め込み型ひずみ計²⁾と熱電対を設置した。コンクリートは、温度 20°C に制御された恒温室内で打設し、24時間静置した。24時間後に脱型し、水分蒸発を防止するため供試体をアルミテープで被膜した後、クリープ試験開始材齢まで、温度 30°C 、湿度98%の湿潤養生槽内で養生した。

引張クリープ試験には、温度および湿度が制御可能な恒温恒湿器を備えた、てこ式引張クリープ試験機¹⁾を使用し、温度 30°C かつ湿度98%に制御して試験を行った。

また、クリープひずみの算出の際、自己収縮等のクリープ以外のひずみは、同一環境内にセットした無載荷供試体より測定されたひずみを、載荷供試体のひずみから差し引いて補正した。

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科都市循環システム工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学助手 工学部社会開発工学科 修(工) (正会員)

*3 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院教授 工学研究科都市循環システム工学専攻 Ph.D (正会員)

表-1 配合表 (実験1)

配合名	パラメータ	条件	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				単位ペースト量※ (l/m ³)	
					W	C	S	G		
1A-a	単位ペースト量	細骨材率一定	40	44.6	187	468	739	969	350	
1A-b					207	516	699	917	385	
1A-c					229	572	654	857	425	
1B-a		単位粗骨材量一定			44.6	187	468	739	969	350
1B-b					41.4	207	516	650		385
1B-c					37.4	229	572	548		425
1C-a		モルタルペースト			100	295	736	1166	0	543
1C-b					-	550	1375	0	0	1000
2-a		水セメント比			単位ペースト量一定	40	44.6	187	468	739
2-b	45		197	437						
2-c	50		205	410						

※単位ペースト量に空気量も含む

3. 実験1: 若材齢コンクリートの引張クリープに影響を与える配合要因

3.1 目的

本実験では、ペースト部分に着目した引張クリープ試験をコンクリート、モルタルおよびペーストを対象に行い、配合条件の違いが若材齢コンクリートの引張クリープに与える影響を検討し、配合要因を明確にすることを目的とした。

3.2 配合設計および試験条件

表-1に示方配合を示す。配合 1A-a, 1B-a および 2-a は同一配合であり、この配合を基本配合とした。シリーズ1は、水セメント比一定のもとで単位ペースト量を変化させた配合であり、細骨材率一定のシリーズ1A, 単位粗骨材量(単位モルタル量)一定のシリーズ1Bを設定した。さらに、ペースト部分が引張クリープに与える影響をより厳密に調べるため、基本配合のモルタル部分、ペースト部分と同一配合であるモルタルおよびペーストのシリーズ1Cを設定した。シリーズ2は、単位ペースト量一定のもとで水セメント比を変化させた配合である。

使用材料は、普通ポルトランドセメント、山砂(豊田市田初山産, $\gamma=2.55$, F.M=2.82), 砕石(春日井市外之原産, $G_{max}=20mm$, $\gamma=2.69$, F.M=6.81)である。また、混和剤に関しては、混和剤により各配合間においてペースト部分の性質に差が生ずることを避けるため、用いないこととした。

引張クリープ試験は、載荷材齢3日、応力強度比(載荷応力/載荷時の割裂強度)40%で行い、載荷期間は既報¹⁾に基づき5日とした。また、載荷応力は0.70から1.18N/mm²であった。

3.3 引張クリープ試験結果

(1) 単位ペースト量の影響

図-1にシリーズ1の、載荷期間5日における全応力に対するクリープひずみ ϵ_{cr} ($\times 10^{-6}$) (以下、クリープひずみと称す)と単位ペースト量 p (l/m³)との関係を示す。図より、応力強度比、水セメント比一定のもとでは、コンクリート、モルタルおよびペーストとシリーズ全体において、単位ペースト量が多くなるほど、クリープひずみは増加する傾向にあり、両者の間には次式で表される線形関係が成立することが明らかとなった。

$$\epsilon_{cr}=0.253p-66.41 \quad (315 \leq p \leq 1000) \quad (1)$$

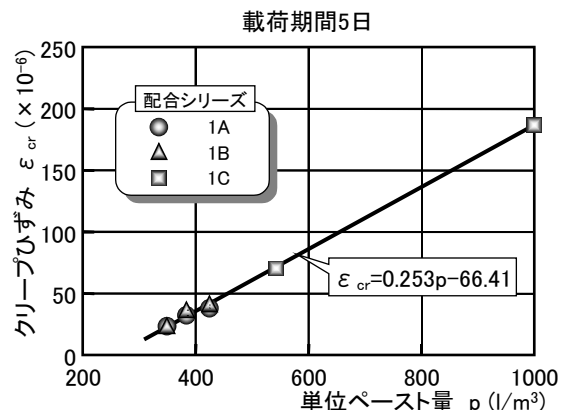


図-1 単位ペースト量の影響

(2) 単位骨材量の影響

単位骨材量は、相対的に単位ペースト量と関連していることから、式(1)より単位骨材量の影響に関して検討を行った。

単位骨材量を $a(l/m^3)$ とすると、

$$p+a=1000 \quad (2)$$

の関係が成り立つ。配合 1C-b のペーストでの載荷期間 5 日におけるクリープひずみが $186.89(\times 10^{-6})$ であることから、これと式(2)を用いて、式(1)は以下のように変形することができる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr} &= 0.187p + 0.066p - 66.41 \\ &= 0.187p - 0.066a \end{aligned} \quad (3)$$

これらの関係を基に骨材の拘束効果を図-2に示す。図より、単位骨材量が多くなるほど骨材部分がペースト部分のクリープを拘束する効果が大きいことがわかる。以上のことから、「クリープはペースト部分で発生し、骨材部分によって拘束される」という理論³⁾を定量的に評価できたと考えられる。

(3) 細骨材率の影響

図-1より、シリーズ 1B において、各配合で細骨材率が異なるにも関わらず線形関係が成立し、細骨材率一定のシリーズ 1A とクリープひずみの大きさが同程度であることから、クリープに対する細骨材率の影響は、単位ペースト量の影響と比較して小さいといえる。

(4) 水セメント比の影響

図-3にシリーズ 2 における、載荷期間 5 日のクリープひずみ $\varepsilon_{cr}(\times 10^{-6})$ と水セメント比 W/C(%) との関係を示す。図より、応力強度比、単位ペースト量一定のもとでは、水セメント比が大きくなるほど、クリープひずみは増加する傾向にあることがわかる。シリーズ 2 では、単位ペースト量一定であるため、水セメント比が大きくなるほど、単位水量は多くなるのに対し、単位セメント量は少なくなっている。このことから、水に対して反応するセメント量が減少し、コンクリート中の未反応水が増加したため、クリープひずみが増加したものと考えられる。

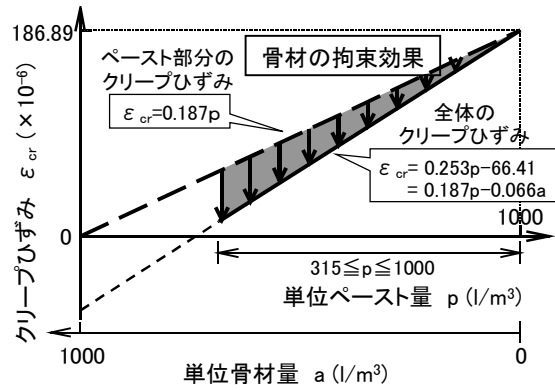


図-2 骨材部分の拘束効果

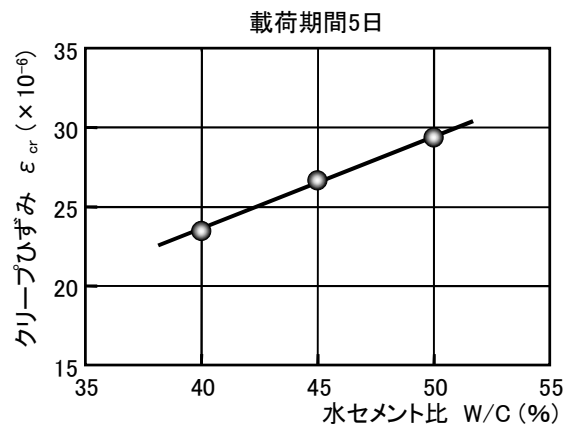


図-3 水セメント比の影響

4. 実験 2: 配合に起因する補正関数の構築

4.1 目的

実験 1 では、ペースト部分に着目することで引張クリープにおける配合の影響を考慮できることを明らかにした。本実験では、クリープ予測式に単位ペースト量と水セメント比の影響を精度良く組み込むための補正関数を構築することを目的とした。

4.2 配合設計および試験条件

実験 1 では、混和剤により各配合間においてペースト部分の性質に差が生ずることを避けるため、混和剤を使用しなかった。しかし、本実験では予測式の実用性を考慮し、混和剤を用いた AE コンクリートを対象とし、以下に示すような、実施工において一般的に用いられている配合の範囲において試験を行った。

表-2に示方配合を示す。水セメント比を 40, 47.5, 55% の 3 水準、単位水量を 162, 172,

表-2 配合表 (実験2)

配合名	Slump (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)						単位ペースト量※ (l/m ³)
					W	C	S	G	減水剤	AE剤	
3A-a	8.0 ±1.0	4.5 ±0.5	40	44.6	162	405	762	998	2.835	0.008	335.2
3A-b					172	430	741	972	1.935	0.011	353.1
3A-c					182	455	721	945	1.138	0.018	371.0
3B-a			47.5		162	341	785	1028	1.279	0.01	314.9
3B-b					172	362	766	1004	0.724	0.014	331.6
3B-c					182	383	747	979	0.230	0.023	348.3
3C-a			55		162	295	802	1050	1.031	0.007	300.2
3C-b					172	313	784	1027	0.407	0.016	316.0
3C-c					182	331	766	1003	0.000	0.023	331.7

※単位ペースト量に空気量も含む

182kg/m³の3水準設定し、これらを組み合わせた計9ケースについて試験を行った。また、細骨材率に関しては、実験1において、細骨材率の違いがクリープに与える影響は、単位ペースト量や水セメント比の影響に比べ十分小さいことが確認されているため、標準的な値である44.6%一定とした。目標スランプは8±1cm、目標空気量は4.5±0.5%とした。

使用材料は、碎石(瀬戸市下半田川産、G_{max}=20mm、γ=2.69、F.M=6.70)を除き、実験1と同様である。

引張クリープ試験は、載荷材齢3日、応力強度比20%(載荷応力は0.39から0.60N/mm²)で行った。載荷期間は基本的に5日としたが、配合3A-bおよび3B-bに関しては10日とした。

4.3 引張クリープ試験結果

(1) 単位ペースト量の影響

図-4に載荷期間が有効材齢²⁾(20℃を基準に温度の影響を考慮した材齢)2, 4, 6日のクリープひずみと単位ペースト量との関係を示す。

図より、水セメント比一定の場合、いずれの載荷期間においても両者の間に線形関係が成立することがわかる。各水セメント比の傾向を比較してみると、水セメント比が大きいほど両者の関係式の傾きが大きくなっており、これは水セメント比の違いがクリープに与える影響が大きいことを示している。また、同一水セメント比での載荷期間の違いによるクリープひずみの傾向(傾き)を比較してみると、載荷期間が進むにしたがって関係式の傾きが大きくなっている。これは、単位ペースト量の多い配合ほど、クリープひずみ速度が定常となるまでの時間が長いことを示している。

(2) 水セメント比の影響

図-5に各水セメント比において単位ペースト量331.6l/m³のときの、有効材齢1日から6日におけるクリープひずみと水セメント比の関係を示す。ここで、水セメント比40%および55%におけるクリープひずみの値は、図-4に示した単位ペースト量とクリープひずみの線形関係

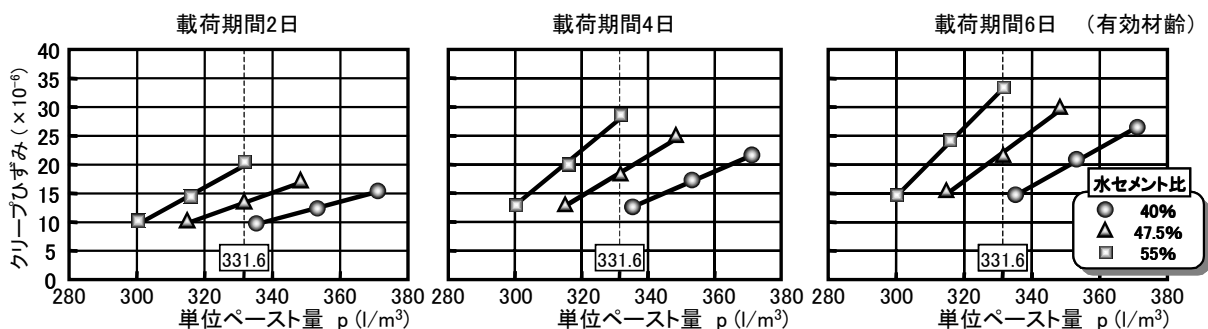


図-4 クリープひずみと単位ペースト量の関係

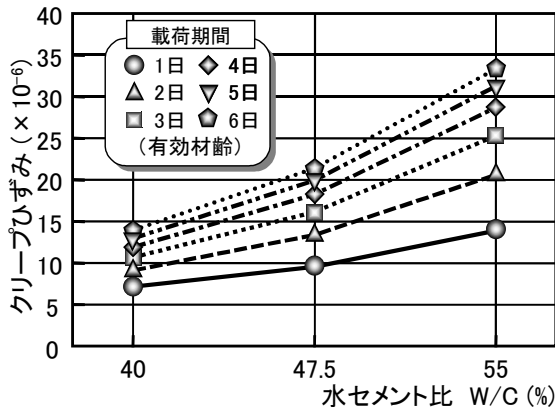


図-5 クリープひずみと水セメント比の関係
(単位ペースト量 331.6l/m³ のとき)

より換算したものである。図-5より、水セメント比が47.5%よりも大きい範囲と小さい範囲とでは水セメント比の増加に対するクリープひずみの増加の割合は異なり、水セメント比が47.5%よりも大きい範囲の方が大きくなっている。これは、水セメント比が大きいほど、ペーストの水和組織が脆弱で、多孔質な構造となるため、クリープの進行が増大したものと思われる。また、各載荷期間の傾向を比較してみると、有効材齢3日以降は水セメント比の違いによる増加傾向はほぼ一定との結果となった。

4.4 補正関数の構築

補正関数は、先に示したクリープひずみと単位ペースト量ならびに水セメント比との関係より求めた。基準となる配合は、単位ペースト量および水セメント比が全ケースの中で中央値となる配合 3B-b(p=331.6l/m³, W/C=47.5%)とし、その試験結果を基準値とした。

まず各配合のクリープひずみの値を基準とす

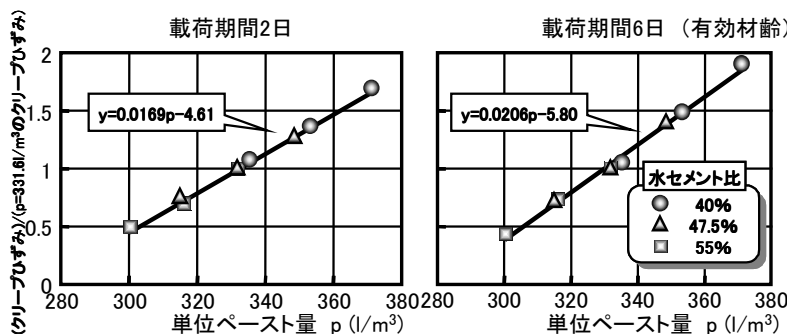


図-6 単位ペースト量に関する補正関数

る配合のクリープひずみで除して無次元化し、次に載荷期間ごとに得られた値から単位ペースト量および水セメント比の補正関数を構築する。クリープひずみは、得られた補正関数を基本クリープ式に乗ずることで求められる。クリープモデルには既報⁴⁾に基づき Voigt 関数を用いた5要素レオロジーモデルを適用した。式(4)に基本クリープ式を示す。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t_e) = & 1.051t_e + 3.986(1.0 - \exp(-148.14t_e)) \\ & + 11.71(1.0 - \exp(-0.484t_e)) \quad (4) \end{aligned}$$

t_e : 載荷期間(日:有効材齢)

(1) 単位ペースト量に関する補正関数

図-4で示したクリープひずみと単位ペースト量との関係を対象に、各水セメント比において単位ペースト量 331.6l/m³ を基準に無次元化した結果を図-6に示す。各材齢の傾きが補正関数を表す。ある単位ペースト量の値をもとに無次元化することで、単位ペースト量による比較が可能となり、いずれの載荷期間においても水セメント比が異なる全配合において単位ペースト量と無次元化したクリープひずみとの間に線形関係が成立することがわかる。図-7に補正関数の傾きの経時変化を示す。図より、載荷期間が大きくなるほど、傾きは大きくなっており、両者の間に対数の関係が成立する。式(5)に単位ペースト量に関する補正関数 F_p を示す。

$$\begin{aligned} F_p(p, t_e) = & (0.0042 \ln(t_e) + 0.0137) \\ & \times (p - 331.6) + 1.0 \quad (5) \end{aligned}$$

(2) 水セメント比に関する補正関数

補正関数は、水セメント比が47.5%を基準に場合分けし、一次関数の形で表す。図-8に単

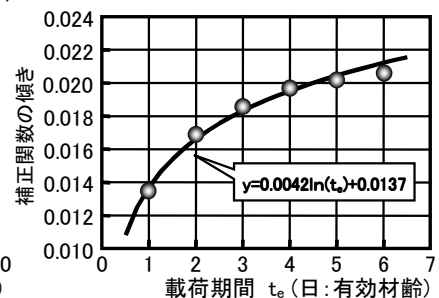


図-7 補正関数傾き経時変化

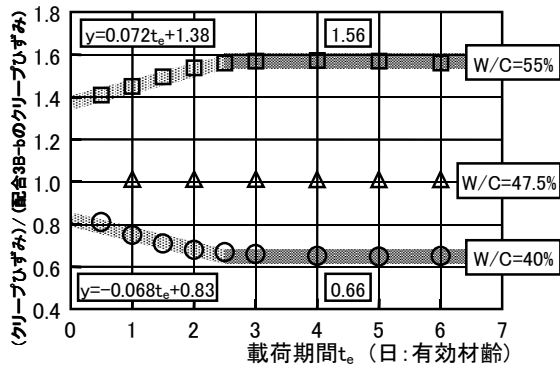


図-8 補正值経時変化

位ペースト量が 331.6l/m^3 、水セメント比が 40, 47.5, 55%のときのクリープひずみの値を水セメント比 47.5%の値で除して求めた補正值の経時変化を示す。図より、補正值は載荷期間約 2.5 日までは、線形的に変化するが、それ以降はほぼ一定の値となっている。式(6)に水セメント比に関する補正関数 $F_{W/C}$ を示す。

$$F_{W/C}(W/C) = A(W/C - 47.5) + 1.0 \quad (6)$$

A : 載荷期間 t_e に影響される補正関数

(a) $W/C \leq 47.5\%$ のとき

$$A = -(-0.068t_e - 0.17) / 7.5 \quad (t_e \leq 2.5)$$

$$A = 0.045 \quad (t_e \geq 2.5)$$

(b) $W/C \geq 47.5\%$ のとき

$$A = (0.072t_e + 0.38) / 7.5 \quad (t_e \leq 2.5)$$

$$A = 0.075 \quad (t_e \geq 2.5)$$

(3) 配合に関する補正関数の提案

以上をまとめて式(7)に配合要因を考慮したクリープ予測式を提案する。

$$\varepsilon_{cr}(t_e, p, W/C) = F_p(p, t_e) \cdot F_{W/C}(W/C) \cdot \varepsilon_{cr}(t_e) \quad (7)$$

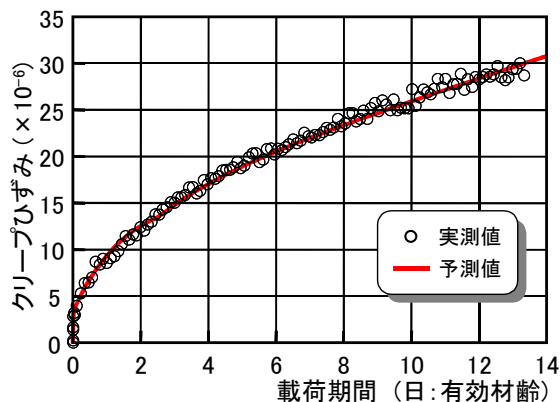


図-9 補正関数適用例 (配合 3A-b)

図-9に配合 3A-b ($p=353.1\text{ l/m}^3$, $W/C=40\%$) における実測値と式(7)による予測値との比較を示す。予測値は式(4)をもとに式(7)による補正を行って得られた値である。図より、両者の値は載荷期間が有効材齢 14 日程度まで良い一致を示しており、単位ペースト量と水セメント比に関する補正を行うことで配合の違いを考慮できることが認められた。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 応力強度比、水セメント比一定下では、単位ペースト量とクリープひずみとの間に線形関係が成立する。また、両者の関係を整理することで、クリープはペースト部分で発生し、骨材部分によって拘束されるという理論を定量的に評価することが可能である。
- (2) 応力強度比、単位ペースト量一定下では、水セメント比が大きくなるほどクリープひずみは増加する。
- (3) 若材齢コンクリートの引張クリープに影響を与える主配合要因には単位ペースト量と水セメント比が挙げられ、両者の影響を組み込んだ提案式により、配合を考慮した引張クリープの定量的な評価が可能となる。

参考文献

- 1) 入矢桂史郎ほか：若材齢コンクリートの圧縮クリープと引張クリープの比較に関する研究，土木学会論文集，No.599/V-40，pp.105-117，1998.8
- 2) 入矢桂史郎ほか：若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.201-213，1999.5
- 3) 清水昭之：コンクリートの引張クリープ，コンクリート工学，Vol.21/No.6，pp.4-13，1983.6
- 4) 平本昌生ほか：若材齢コンクリートのクリープの材齢および載荷応力依存性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.775-780，1997.7