

論文 微粉末系の高流動コンクリートの凝結および強度増進性状

権寧璣*1・金武漢*2・姜錫杓*3・朴宣圭*3

要旨：高炉スラグ微粉末、高炉セメントを用いた微粉末系の高流動コンクリートの凝結と、その後の強度増進性状を検討した。高流動コンクリートでは凝結遅延効果をもつ高性能AE減水剤を比較的多量に用いており、凝結遅延が懸念された。このため、低温域を含めてその特性を検討し、結果として高炉セメントを用いた高流動コンクリートにおいてある程度の凝結遅延が見られるものの、粉末度の高い高炉スラグ微粉末を用いた場合にはモルタルによる実験で得られたほどの大幅な凝結遅延はなく、実際のコンクリートでは実用的な問題が少ないことを示した。さらに、高流動コンクリートの強度増進の過程を記述する実験式を誘導し、その傾向を述べた。

キーワード：高流動コンクリート、凝結、強度増進、高炉スラグ微粉末

1. はじめに

近年、活発に研究が行われている微粉末系の高流動コンクリートは、高性能AE減水剤の使用量が多いこと、及び単位結合材量が大きく、使用する混和材の量も多いことを特徴として挙げることができる^{1),2),3)}。混和材として高炉スラグを使用する場合は、一般に凝結時間が長くなる傾向にあり、また、高性能AE減水剤を多量に使用する場合には、さらに凝結時間が遅れる。このため、初期材齢における圧縮強度の発現が遅れる可能性が高く、高流動コンクリートの強度増進の傾向が普通強度コンクリートまたは高強度コンクリートと比較して異なる可能性がある

(4),5),6),7)

本研究では、高流動コンクリートの凝結性状を検討し、さらに、その後の強度増進について積算温度方式を用いて圧縮強度増進曲線を誘導することを目的としている。

2. 実験計画および方法

2.1 使用材料およびコンク

リートの調合

セメントは、普通ポルトランドセメントと高炉セメントB種を用い、微粉末系の混和材として高炉スラグ微粉末6000、石灰石微粉末を用いた。骨材には、細骨材として鶴川産陸砂、粗骨材として常磐産砕石を使用し、水は水道水を使用した。高性能AE減水剤はアミノスルホン酸系、ナフタレン系、ポリカルボン酸系を用いた。また、無塩化・無アルカリタイプの防凍性剤も一部使用し、AE剤としてそれぞれの高性能AE減水剤に専用のAE剤、消泡剤を使用した。使用材料の物性を表1に示す。

表-1 使用材料の物性

	種類	仕様
セメント	普通ポルトランド	密度：3.16g/cm ³ ，比表面積：3320cm ² /g
	高炉セメントB種	密度：3.05g/cm ³ ，比表面積：3760cm ² /g
細骨材	陸砂	密度：2.68g/cm ³ ，FM：2.43，吸水率：1.17%
粗骨材	砕石	密度：2.64g/cm ³ ，FM：6.69，吸水率：2.82%
混和材	高炉スラグ微粉末	密度：2.90g/cm ³ ，比表面積：6080cm ² /g
	石灰石微粉末	密度：2.73g/cm ³ ，比表面積：5460cm ² /g
混和剤	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系
		アミノスルホン酸系
		ナフタレン系
	防凍性混和剤	亜硝酸化合物

* 1 大韓民国 双龍Engineering 安全技術部 工博 (正会員)

* 2 大韓民国 忠南大学校 建築工学科 教授 工博 (正会員)

* 3 大韓民国 忠南大学校大学院 建築工学科 博士課程

表-2 コンクリートの調合 (強度増進)

コンクリートの種類	高性能AE減水剤の種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)							混和剤		
				水	セメント		混和材		骨材		高性能AE減水剤 (%)	AE剤 (%)	防凍剤 (%)
					普通	高炉B	高炉スラグ	石灰微粉末	細骨材	粗骨材			
6A	アミノスルホン酸	35.9	53.1	165	207	-	253	-	906	789	2.0	0.004	-
6N	ナフタレン系	35.0	53.0	161	207	-	253	-	919	803	1.6	0.055	-
6P	ポリカルボン散系	33.7	53.0	155	207	-	253	-	919	803	1.4	0.007	-
SC	ポリカルボン散系	32.0	53.0	152	-	475	-	-	919	803	1.4	0.005	-
LB	ポリカルボン散系	32.6	53.1	155	-	332	-	143	909	792	1.4	0.006	-
SCA	ポリカルボン散系	32.0	53.0	152	-	475	-	-	919	803	1.4	0.005	1.3

高流動コンクリートの調合は、スランプフロー62~68cm, VF値20cm以上, 空気量4.5%を目標とした試練りにより定めた。同一水準のフローを得る調合は、シリーズによって幾分異なった。表2に強度増進の検討シリーズで用いた調合表を示す。

2.2 高流動コンクリートの凝結性状

凝結性状試験は表3に示すような5種類の高流動コンクリートと比較用の普通コンクリートについて行った。最初に20℃の条件で、これらのコンクリートのから粗骨材のみを除外したモルタルによる実験を行い、その後練り上がり温度10℃と20℃の条件でコンクリートとしての実験を行った。さらにモルタルの実験および10℃のコンクリートによる実験では表4に示したように、高炉セメントB種の高流動コンクリートについて凝結性状に及ぼす防凍性混和剤の効果を調べた。凝結試験は、ブロッカー貫入抵抗試験(JIS A 6204附属書)により行った。

2.3 高流動コンクリートの強度増進

実験に用いた高流動コンクリートは、結合材, 高性能AE減水剤

表-3 高流動コンクリートの種類・実験計画(凝結性状の検討)

記号	コンクリートの種類	水結合材比 (%)	高性能AE減水剤	空気量 (%)	混練および養生温度 (℃)	防凍性混和剤
OPC	比較用普通コンクリート	55.0	-	4.5	10	なし
6A	OPC+B6000高炉スラグ	35.9	アミノスルホン酸系			
6N		34.3	ナフタレン系			
6P		33.7	ポリカルボン酸系			
SC	高炉B種	32.0				
LB	高炉B種+石灰石粉末	32.6			20	

表-4 実験計画(防凍性混和剤の検討)

記号	コンクリートの種類	高性能AE減水剤	混練および養生温度 (℃)	防凍性混和剤 (l/c) *	目標空気量 (%)
SC	高炉B種のみの高流動コンクリート	ポリカルボン酸	10	0	4.5
Y1.0				1.0	
Y1.3				1.3	
Y1.6				1.6	

* 防凍性混和剤の使用量は、セメント100kgに対する容積 l/cement=100kg

表-5 実験計画(強度増進)

コンクリートの種類	記号	結合材	高性能AE減水剤	空気量 (%)	養生温度 (℃)	測定材齢 (D-D)
高流動コンクリート	6P	OPC+6000級高炉スラグ	ポリカルボン酸	4.5	10 20	40 90 120 210 420
	6N		ナフタレン			
	6A	微粉末	アミノスルホン酸			
	LB	高炉B種+石灰石粉末	ポリカルボン酸			
	SC	高炉B種	ポリカルボン酸			
高流動コンクリートの防凍性混和剤適用	SCA	高炉B種	ポリカルボン酸+耐寒剤			840 1560 2730
普通コンクリート	OPC	OPCのみ	-			

の組み合わせにより6種類とした。練り上がり温度を20℃とし、打込み後の養生温度を10、20℃の2水準とした。

供試体の養生方法は、強度増進過程を把握するため封緘養生とし、圧縮強度の測定材齢は、強度増進曲線の近似を考慮し、40 °D・Dから2730 °D・Dまでの範囲で積算温度の対数軸上で均等に分布するような材齢とした。実験計画を表5に示す。

混練は、凝結実験では強制練りミキサ(容量50L)を用いて6分練りとしたが、強度増進の実験では二軸水平強制練りミキサ(容量100L)による5分練りとし、練り温度はすべてのバッチとも20℃を目標とした。試験体はφ10×20 cmとし、所定の材齢の直前に脱型し、圧縮強度試験を実施した。

3. 実験結果および考察

3.1 微粉末系高流動コンクリートの凝結性状

高流動コンクリートから粗骨材のみを除外したモルタルによるプロクター試験を行った結果を図1に示す。図1によると、普通モルタルと比較して高流動モルタルで明瞭に凝結時間が遅延する傾向を見ることができる。

図2(1)は練混ぜを粗骨材を含めたコンクリートとして行い、その後ウェットスクリーニングで粗骨材を除外したモルタルによる結果である。当初からモルタルとして練り混ぜた場合と比較して、普通コンクリートでは凝結時間が幾分遅れる傾向となり、一方、高流動コンクリートの結果では凝結時間が早まる傾向となった。このため、高流動コンクリートをモルタル成分のみで練り混ぜた場合に見られた大幅な凝結の遅延は、コンクリートとした場合には見られず、普通コンクリートと高流動コンクリートの凝結時間の差は縮まる傾向であった。

図2(2)は、10℃で練り上げたコンクリートの凝結性状を示したもので、(1)と同様に普通コンクリートと高流動コンクリートの差は大きいものではなかった。しかし、一方では、10℃となることにより、高流動コンクリートの種類によって異なるもの、スランプフローは20℃の場合の90%から60%程度までに低下する結果となった。さらに、防凍性混和剤を添加した結果では、図2(3)に示したように凝結時間が促進された。低温によるスランプフローの低下は無添加の高流動コンクリートの場合と同様に見られるものの、モルタル成分のみの実験で見られた防凍剤の添加量の増加

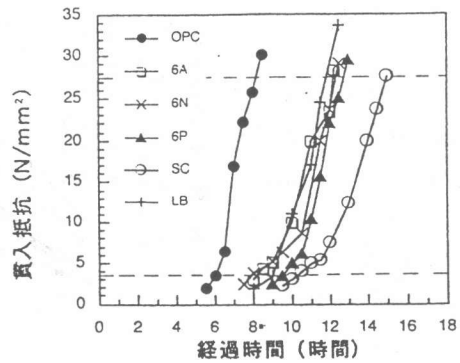
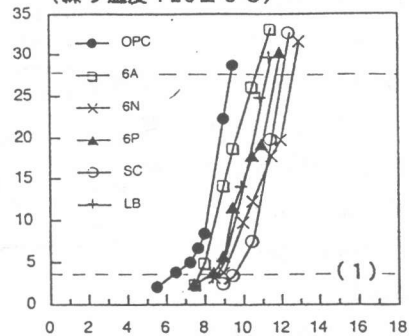
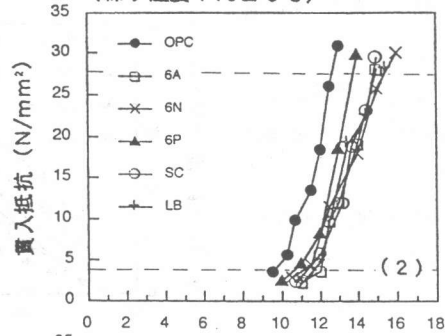


図-1 普通モルタルと高流動モルタルのプロクター実験結果

(練り温度：20±3℃)



(練り温度：10±3℃)



防凍性混和剤の添加

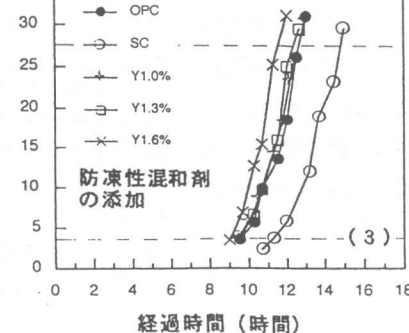


図-2 普通コンクリートと高流動コンクリートのプロクター実験結果

(ウェットスクリーニングをしたモルタルによる実験)

に伴うスランフフローの低下は見られなかった。

既往の研究²⁾においても、コンクリート温度が低下するにもなって高流動コンクリートの流動性の低下することが知られている。しかし、その程度はここで得られたほどの大幅なものではなく、またモルタルとしての実験の結果とコンクリートから採取したモルタルによる結果に大幅な相違のあることは指摘されていない。高流動コンクリートの凝結性状、特に温度依存性についてより研究を深める必要がある。

3. 2 微粉末系の高流動コンクリートの強度増進性状

(1) 高性能減水剤の種類ごとの圧縮強度発現

3種の高性能AE減水剤を使用し、混和材として高炉スラグ微粉末6000を用いた高流動コンクリートの圧縮強度試験の結果を、養生温度ごとに図3に示す。さらに、図4には、840 °D・D時の圧縮強度を100とした強度比を養生温度ごとに示す。これらの図には既往の文献^{3),4)}をもとに水セメント比55%の普通コンクリートと32%,37%の高強度コンクリートによる結果も併記

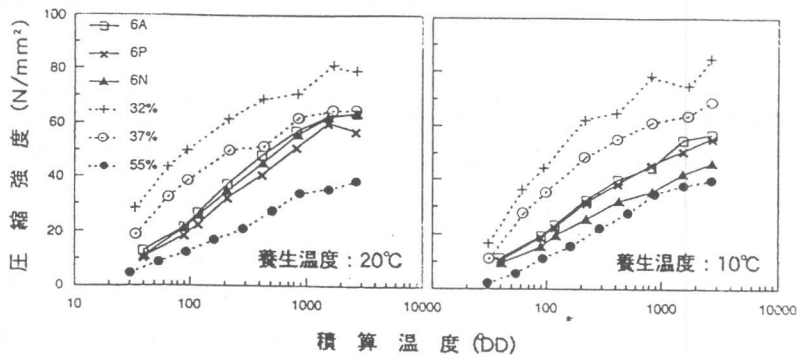


図-3 高性能AE減水剤の種類ごとの積算温度と圧縮強度の関係

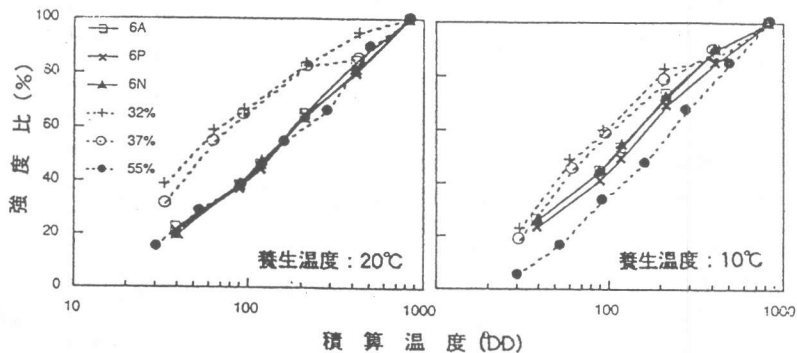


図-4 高性能AE減水剤の種類ごとの積算温度と強度比の関係

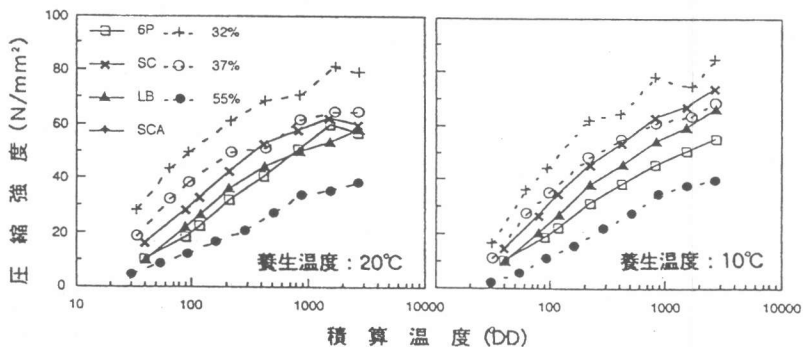


図-5 結合材種類ごとの積算温度と圧縮強度の関係

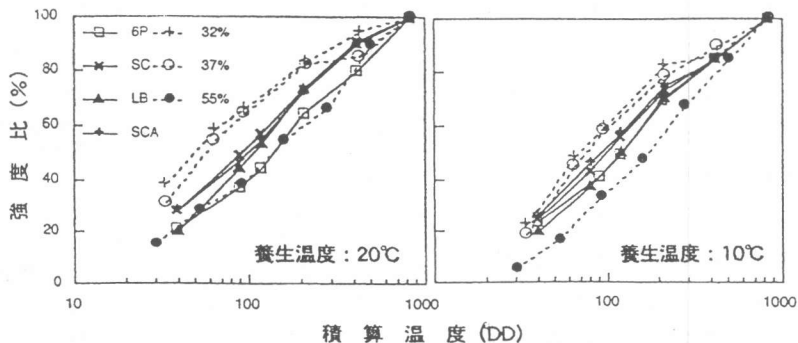


図-6 結合材種類ごとの積算温度と強度比の関係

した。

養生温度20℃では、高性能AE減水剤の種類に関係なく、いずれの高流動コンクリートも水セメント比55%の普通コンクリートの結果に比べ高強度であり、長期材齢では水セメント比37%の高強度コンクリートと同様な水準の圧縮強度の発現が認められた。

高強度コンクリートは、一般に若材齢の強度発現が急激であり、強度増進の傾向が普通コンクリートとは大きく異なっている。

図4によると結合材として高炉スラグ微粉末6000を混入した場合、高流動コンクリートの強度増進の割合は、高性能AE減水剤の種類に関係なく、水セメント比32%と37%の高強度コンクリートよりは低めであり、55%の普通コンクリートと類似な傾向となることが認められた。

一方、10℃では、高流動コンクリートの圧縮強度は、普通コンクリートよりは高く発現されているものの、高強度コンクリートと比べ強度の伸び率が低くなり、20℃の強度発現率とは異なる傾向となった。このことより、結合材として高炉スラグ微粉末を混入した高流動コンクリートの場合に、圧縮強度の発現率におよぼす高性能AE減水剤の影響は少なく、その傾向は、養生温度により異なることがわかる。

(2) 結合材種類ごとの圧縮強度発現

結合材の異なる高流動コンクリートの圧縮強度の試験結果を、養生温度ごとに図5に示す。さらに、840°D・D時を100とした強度比を図6に示す。養生温度20℃では、混和材の種類に関係なく、水セメント比55%の普通コンクリートに比べて、高強度であり、長期材齢での強度の増加も認められた。さらに、養生温度10℃でも、水セメント比37%の高強度コンクリートよりも強度が長期材齢で高

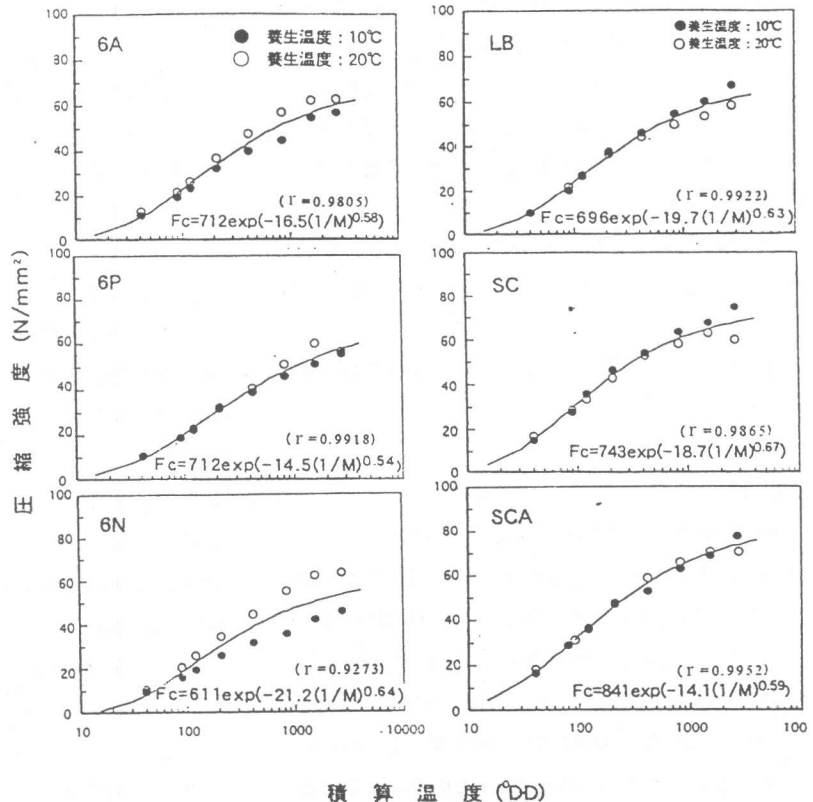


図-7 ゴンベルツ曲線による圧縮強度増進の近似

くなる傾向となった。結合材として高炉セメントのみを用いた高流動コンクリートが、結合材として高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートよりも圧縮強度が高くなる結果となっているが、その理由は不明である。

このことより、実験に用いた水結合材比35%前後の高流動コンクリートの強度発現率は、養生温度に関係なく、水セメント比55%の普通コンクリートよりは高く、水セメント比32%、37%の高強度コンクリートよりは低くなることがわかる。ただし、結合材として高炉スラグ微粉末を用いた場合では、養生温度20℃では普通コンクリートと同様な水準であった。

(3) ゴンベルツ曲線による高流動コンクリートの強度増進過程の記述

今回得られた高流動コンクリートの積算温度の対数値と圧縮強度の関係が既往の研究⁴⁾で適用されたゴンベルツ曲線の傾向に近いいため、この式を用いて検討を行った。

強度増進曲線式の解析は、非線形最小2乗法によって行った。式中の定数は各測定値から最小二乗原理のもとでマルカール法を用いたニュートンガウス法(非線形最小2乗法)により反復計算を行い決定した。この反復計算により得られた強度増進式を高性能AE減水剤の種類と結合材種別ごとに示したのが図7である。6Nを除いていずれのコンクリートの種類でも圧縮強度と積算温度の関係は、相関係数0.98以上であり、したがって、高流動コンクリートの強度増進過程は、高強度コンクリートと同様にゴンペルツ曲線を用いて精度よく近似できると考えられる。

4. まとめ

本研究で得られた結果は以下に要約される。

- 1) 高流動コンクリートでは、高炉スラグ微粉末の混入および高性能AE減水剤の多量使用により、普通コンクリートと比べ、凝結時間は幾分遅れるが、凝結遅延は、実用的にはそれほど問題となる程度ではないと判断できる。また、凝結遅延に関し、モルタルとしての実験の結果とコンクリートから採集したモルタルによる結果に大幅な相違が見られた。
- 2) 10℃で練り混ぜた場合においても、普通コンクリートと高流動コンクリートで凝結時間の差は少ないことから、凝結時間の温度依存性も実用的に障害となる程度ではないと判断される。しかし、一方で、高流動コンクリートの種類で差はあるものの、10℃となることにより高流動コンクリートのスランプフローが20℃の場合の90%から60%程度になる結果となった。
- 3) 低温環境における防凍性混和剤の混入は、高流動コンクリートの凝結遅延または、初期強度対策として有効な方法になると考えられる。
- 4) 高流動コンクリートの圧縮強度の発現は、養生温度に関係なく、水セメント比55%の普通コンクリートよりは早く、水セメント比37%の高強度コンクリートよりは遅い傾向である。
- 5) 高炉スラグ微粉末を用いた高流動コンクリートの強度増進過程は、ゴンペルツ曲線を用いた積算温度関数によって表される。

- 1) 権,千歩,鎌田, 微粉末系の高流動コンクリートの気泡組織と耐凍害性に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.16,No.1,1994,pp.207~212
- 2) 山川ら, 高流動コンクリートの諸性状に及ぼす温度の影響,日本建築学会・高流動コンクリート札幌シンポジウム,1994, pp.33~38
- 3) 三森,鎌田他, コンクリートの圧縮強度増進の傾向(5℃から40℃までの一定温度による実験),日本建築学会大会学術講演梗概集,1990
- 4) 吉野,鎌田他, 高強度コンクリートの圧縮強度増進性状に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,1992
- 5) Kim Moo-Han et al., An experimental study on the frost resistance of high-flowing concrete using granulated blast-furnace slag, proceeding of AIK, Vol 12, No 2, 1999. 10, pp 702~707
- 6) 川上正史ら,高炉スラグ超微粉末が高流動コンクリートのフレッシュ時の性状に及ぼす影響について,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.19,No.1,1997, pp.79~84
- 7) 三浦 尚ら, 寒冷地における高炉スラグ微粉末混和コンクリートの強度発現,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.19,No.1,1997,pp.247~252
- 8) 竹田 重三ら,封緘養生が高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響,日本建築学会大会学術講演梗概集,1998,pp.591~592
- 9) 酒井 健太ら,フライアッシュと高性能AE減水剤の相互作用に関する研究,日本建築学会大会学術講演梗概集,1998,pp.607~608

参考文献