

論文 傾斜フロー試験によるコンクリートの粘性評価に関する研究

渡辺 有寿*1・藤原 浩巳*2・丸岡 正知*3・阿部 果林*4

要旨: スランプ 8~10cm 程度の中練り, 18cm 程度の軟練りコンクリートの配合設計において, 材料分離を起こさない範囲で, 良好なフィニッシュャビリティーやポンパビリティーといった施工性を得るためにコンクリートの粘性評価は重要であると考えられる。本研究では, 傾斜フロー試験を用いることにより, コンクリートの粘性に関わる性状を評価することが可能かを検討した。また, 傾斜フロー試験の結果より得られる流動先端速度とコンクリートの粘性の関係について, 余剰水膜厚理論を用いて考察した。その結果, 余剰水膜厚と, 流動先端速度には相関関係があり, 傾斜フロー試験によって簡易にコンクリートの粘性を評価できる可能性が見出された。

キーワード: 細骨材率, 実積率, 余剰水膜厚, 傾斜フロー試験, 塑性粘度

1. はじめに

近年のコンクリート材料技術の進歩から, コンクリートの配合が富配合になる傾向があり, それに伴い施工性の評価に関しても従来のスランプ試験以外で, より実際の施工性を反映した評価試験方法についての研究が活発化している。しかし, このような研究は高流動コンクリートに関するものが多く, それよりも流動性が小さなコンクリートに関してはスランプ試験またはスランプフロー試験に頼っているのが現状である。

そこで本研究ではスランプ 8~10cm 程度の中練りコンクリートを用いてスランプ一定の条件下で細骨材率(s/a)等の配合要因を変化させることでコンクリートのフレッシュ性状を変化させたものについて, 振動を加えた傾斜フロー試験¹⁾で主として粘性に関わる性状を評価することが可能かを検討した。また, 傾斜フロー試験の結果で得られる流動先端速度とコンクリートの粘性の関係について, 昨年度実施したスランプ 18cm 程度の軟練りコンクリートの結果¹⁾も併せて余剰水膜厚理論を用いて考察した。

2. 傾斜フロー試験の概要

図-1 に傾斜フロー装置を示す。所定の位置に

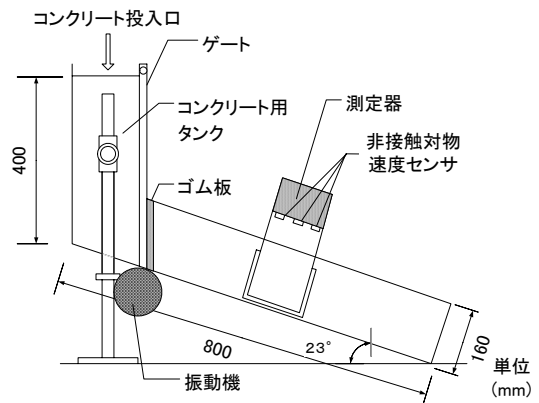


図-1 振動機付き傾斜フロー試験装置

速度測定器を設置し, タンク内にコンクリートを3層10回突きで詰め, 上面をならす。その後ゲートを開き, コンクリートの流動先端がセンサー間を通過する時の流入速度 v_1 (cm/s), 流出速度 v_2 (cm/s) を読み取り, 2つの平均値を流動先端速度(V)とした。なお, 傾斜角はこれまでの実験及び解析から 23° とした²⁾。

本研究における, スランプ 10cm 程度の中練りコンクリートにおいては, コンシステンシーが高くゲート開放後のコンクリートに流動が起こらない。そのため, タンク底部に振動機(振動数 47.5Hz)を取り付け, 振動条件下(10秒間)での流動先端速度を測定した。

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻 (正会員)

*2 宇都宮大学 工学部建設学科助教授 工博 (正会員)

*3 宇都宮大学 工学部建設学科助手 工修 (正会員)

*4 ニューテック(株) 工修 (正会員) -985-

表－1 中練りコンクリートの配合

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	SL (cm)	Air (%)
50	180	40.0 ～52.0	10±2.0	4.5±1.5
45		38.0 ～48.0		
40		32.0 ～46.0		

表－2 測定結果

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	SL (cm)	V (cm/sec)	Air (%)
50	180	40	8.5	1.50	3
		44	8.0	0.95	3.4
		46	8.0	1.70	3.5
		48	8.0	1.50	3.6
		52	9.0	1.18	3.9
45		36	10.0	1.35	3.2
		40	9.0	1.80	3.6
		44	9.5	1.35	4
		46	8.0	1.40	4.4
		48	8.0	0.95	4.1
40		32	8.0	0.90	3
		36	8.0	1.35	3.5
		40	8.0	1.20	4
		44	8.5	1.15	4
			46	8.0	0.90

三好らの研究から、振動がレオロジー定数に与える影響として、降伏値は低下するが塑性粘度にはあまり影響を与えない事が知られている³⁾。そのため、振動を与えても粘性評価には大きな影響がないと考えた。

3. 実験概要

3.1 概要

実験は配合の異なるスランプ 10cm 程度の中練りコンクリートを用いて、傾斜フロー試験における流動先端速度を測定した。

3.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(密度 3.16, 粉末度 3320cm²/g), 細骨材は川砂(表乾密度 2.56, 吸水率 3.01%, FM2.45, 実積率 62.00%), 粗骨材は砕石 5号(表乾密度 2.62, 吸水率 0.38%, FM6.45, 実積率 56.76%)及び 6号(表乾密度 2.62, 吸水率 0.49%, FM7.07, 実積率 54.93%)を 5:5 で混

表－3 軟練りコンクリートの配合(昨年度)

W/C (%)	W (kg/m ³)	s/a (%)	SL (cm)	SLF (mm)	Air (%)
50	180	44.0 ～52.0	18±2.5	-	4.5±1.5
40	180	40.0 ～50.0	-	450±50	
	175	44.0 ～48.0	-	550±50	
35	175	44.0 ～48.0	-	600±50	

合したものを使用した。練り混ぜ水には上水道水を用いた。また、混和剤として高性能 AE 減水剤(SP)にポリカルボン酸エーテル系のもの、AE 剤(AE)にアルキルアリルスルホン酸系界面活性剤を用いた。

3.3 配合条件

中練りコンクリートの配合条件を表－1に示す。配合要因として水セメント比(W/C), 単位水量(W), 単位セメント量(C)及びs/aを取り上げた。空気量(Air)は目標範囲内(4.5±1.5%)となるように AE 剤を用いて、スランプ(SL)は 10±2.0cm となるように高性能 AE 減水剤を用いて調節した。

3.4 試験項目

(1) スランプ試験

JISA1101-1998 に準拠した。

(2) 空気量試験

JISA1128-1999 に準拠した。

(3) 傾斜フロー試験

前述の試験方法にて行った。

3.5 実験結果及び考察

表－2及び図－2に実験結果を示す。これらの結果より、全ての配合で流動先端速度にピークが現れ、W/C=50%でs/a=46%, W/C=45%でs/a=40%, W/C=40%でs/a=36%にピークが生じた。また、同一s/aではセメント量が多いほど速度が低くなった。ここで、10秒間の振動は流動補助であり、全ての配合において材料分離は見られなかった。

これらの結果より、スランプ一定、すなわち降伏値が同じ場合でも流動先端速度に違いが生じてくることが分かった。

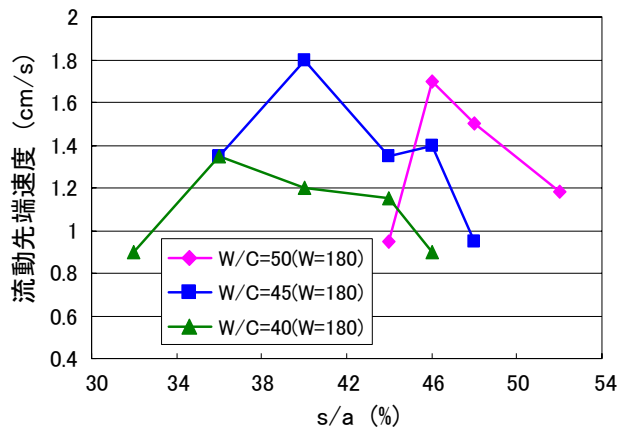


図-2 s/a と流動先端速度の関係(中練り)

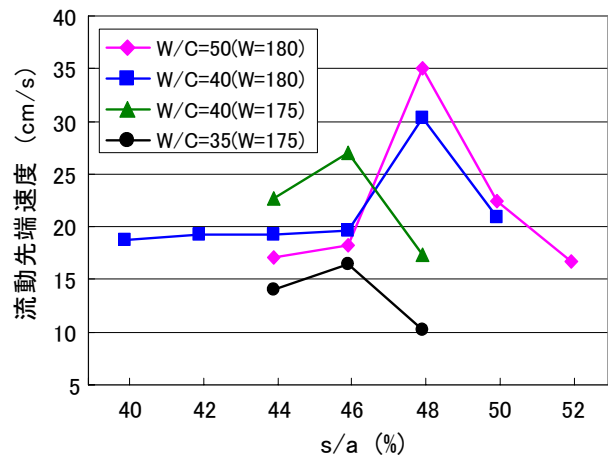


図-3 s/a と流動先端速度の関係(軟練り)

流動先端速度と塑性粘度には相関関係があることがこれまでの研究で明かされており¹⁾、流動先端速度がピークをとるときに塑性粘度が最小となると考えられる。

セメント量及び s/a の変化は、コンクリート中の固体相(粗骨材+細骨材+セメント)の充填率に変化をもたらすものである。この固体相の充填率の変化がコンクリートの粘性に変化をもたらし、これが流動先端速度に影響を与えたものと考えられる。

4. 余剰膜厚理論による検討

4.1 概要

コンクリートのレオロジー特性と配合の関係についての研究は盛んに行われており、主としてコンクリートの粘性と配合の関係には余剰モルタル膜厚⁴⁾及び余剰ペースト膜厚の考えが用いられ、モルタルの粘性評価には余剰ペースト膜厚⁵⁾、ペーストの粘性評価には余剰水膜厚と、それぞれ別個に検討されている。しかし、余剰ペースト膜厚理論はペーストの粘性が一定の条件下で成立するものであるが、ペーストの粘性は余剰水膜厚の影響を受けるとされている⁶⁾。

また、水膜厚はコンクリートレベルで考えた場合、セメントの表面積のみならず細骨材・粗骨材の表面積も併せると共に、これら3固形分の実積率も考えて求めるべきであると考えられる。

そこで、本研究ではコンクリートをセメント、

細骨材及び粗骨材の固体相と水の液体相に分け、コンクリート中の余剰水膜厚の算定を試みると共に、得られた結果と流動先端速度との関係について考察した。

なお、ここでは昨年度実施した軟練りコンクリートの結果(無振動での傾斜フロー試験結果)についても併せて検討を行った。表-3に軟練りコンクリートの配合条件を示す。また図-3に流動先端速度の測定結果を示す。

4.2 余剰水膜厚の算定

(1) 基本的な考え方

本研究では、骨材及びセメントを一体とした単位容積質量及び実積率試験結果からコンクリート中の余剰水を結合材と骨材の総表面積で除して余剰水膜厚を算出した。

(2) 使用材料

骨材及びセメントは3.2で示したものと同様のものをを用いた。なお、昨年度実施した軟練りコンクリートも同様の材料を用いたものである。

(3) 使用骨材の比表面積

(a) 粗骨材

粗骨材を絶乾状態にし、ふるい分けを行い5-10, 10-15, 15-20mmの各粒度範囲において、試料からランダムに10個ずつサンプルを採取した。1個ごとに長軸方向を基準とし、その面を横方向に90°回転させた面及び縦方向に90°回転させた面の3面をデジタルカメラで撮影した。その写真から画像解析ソフトを用いて表面積を求め、得られた3

面の表面積を平均し、それを4倍したものをその粗骨材の表面積とした。各範囲内で得られた10個の表面積を平均化することで、その範囲における1個あたりの表面積を求めた⁷⁾。

また、各範囲内での試料10個の質量を測定し、比重を用いて絶対体積を求め、平均した値を各範囲における1個あたりの絶対体積とした。求めた表面積と絶対体積から比表面積を求め、各粒度範囲における比表面積を表-4に示す。

(b) 細骨材

細骨材を絶乾状態とし、ランダムに試料を採取した。試料を直接スキャナに載せ、画像を撮影し、画像解析ソフトを用いて、最大径及び最小径を求めた。得られた最小径を用いて試料を、0-0.15, 0.15-0.3, 0.3-0.6, 0.6-1.2, 1.2-2.5, 2.5-5.0mmの各範囲に分類し、最大径と最小径の平均を直径とした。細骨材を球体と仮定し、この値から表面積及び体積を求め、これらの値を各範囲で平均し、それを範囲ごとの1個あたりの表面積、体積とした。このようにして得られた密度、体積及び表面積から比表面積を求めた⁸⁾。各比表面積を表-4に示す。

(c) セメント

粉末度 3320cm²/g のものを用いた。

(4) セメントと骨材の総表面積

各範囲内における骨材の比表面積と全質量を粒度分布を用いて配分し、比表面積と質量から骨材全体としての表面積を求めた。そして各配合におけるセメントの表面積を加え総表面積とした。得られた結果を表-5に示す。

(5) 実積率の測定

粗骨材と細骨材及び結合材が混合した状態での実積率を測定する方法は確立されていない。本研究では試行錯誤の結果、暫定的に次のような方法で求めることとした。

まず絶乾状態とした細骨材、粗骨材及びセメントを配合条件と同様の s/a でオムニミキサーに投入・攪拌する。次に混合した試料を最大容積 10ℓ の容器に入れる。容器の直径に合わせた蓋の上に重り (9.25kg/個) を 3 個載せ、テーブルバイブレー

表-4 各粒度範囲における比表面積

	ふるい目 (mm)	比表面積 (mm ² /g)
細骨材	0-0.15	2925.194
	0.15-0.3	3119.668
	0.3-0.6	1913.344
	0.6-1.2	969.045
	1.2-2.5	799.853
	2.5-5.0	611.199
粗骨材	05-10	333.497
	10-15	178.988
	15-20	149.990

ターで 200Hz, 4 分間振動をかける。試料の高さを 4 箇所測定し、その平均を用いて容積を計算する。その値を用いて JIS A1104-1993『骨材の単位容積質量及び実積率試験』に準じて実積率を求めた。本研究における試験範囲においては、この条件で最大かつ定常的な実積率が得られている。

(6) 余剰水膜厚の算定式

以上で得られた骨材及び結合材の総表面積、実積率を用い、以下に示す式(1)より余剰水膜厚(Fw)を計算した。

$$Fw = \frac{Aw - Vw}{S} \quad (1)$$

Aw : コンクリート中の全水量

Vw : 空隙を埋める水量

$$Vw = \text{容積} - (100 - \text{実積率})$$

S : 骨材及び結合材の総表面積

4.3 結果及び考察

(1) 余剰水膜厚

表-5に余剰水膜厚の計算結果を示す。また図-4、図-5に中練り、軟練りコンクリートにおける s/a と余剰水膜厚の関係を示す。

図より、全ての配合において s/a を変えることにより余剰水膜厚にピークが見られた。

中練りコンクリートにおいては、単位水量が 180kg/m³ で一定の場合、W/C=50%において s/a=46%, W/C=45%において s/a=40%, 及び W/C=40%において s/a=36%でそれぞれ余剰水膜厚が最大となった。また単位水量が一定であっても単位セメント量を増

表-5 配合及び計算結果

	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				Air (%)	SL (cm)	SLF (cm)	実積率 (%)	空隙率 (%)	余剰水量 (cm ³)	総表面積 (×10 ⁶ cm ²)	余剰水膜厚 (μm)					
			W	C	S	G													
軟	50	44	180	360	771	1007	4.2	20.0	380	81.3	18.7	9.718	8.324	0.01167					
		46			784	945	6.0	20.5	325	83.4	16.6	203.410	8.325	0.24435					
		48			849	944	3.6	20.0	410	85.7	14.3	346.945	8.325	0.41675					
		50			589	882	5.5	20.0	290	85.4	14.6	347.500	8.325	0.41741					
		52			899	852	5.1	19.5	275	85.0	15.0	313.800	8.326	0.37691					
		42			706	1001	4.0	-	455	82.7	17.3	127.196	10.403	0.12227					
	40	44		450	731	955	4.8	-	455	84.0	16.0	226.880	10.403	0.21808					
		46			764	921	4.8	-	448	84.9	15.1	295.110	10.404	0.28366					
		48			800	889	4.6	-	450	84.4	15.6	255.048	10.404	0.24515					
		50			832	854	4.7	-	420	83.8	16.2	210.726	10.404	0.20254					
		44			730	953	5.8	-	535	79.0	21.0	-207.830	10.115	-0.20548					
		46			776	935	4.7	-	520	84.0	16.0	184.680	10.115	0.18258					
	35	48		175	437.5	816	908	4.2	-	555	83.1	16.9	107.741	10.115	0.10651				
		44				500	739	966	3.0	-	605	78.3	21.7	-280.112	11.558	-0.24235			
		46					742	895	5.5	-	620	82.0	18.0	70.480	11.559	0.06098			
		48					790	878	4.3	-	605	82.0	18.0	52.660	11.559	0.04556			
		中					50	180	360	714	1099	3.0	8.5	-	79.7	20.3	-120.197	8.402	-0.14306
										44	780	1019	3.4	8.0	-	84.3	15.7	251.432	8.402
46	815		982	3.5	8.0					-	85.1	14.9	312.509	8.402	0.37193				
48	849		944	3.6	8.0	-				84.2	15.8	245.008	8.402	0.29159					
52	915		867	3.9	9.0	-				83.3	16.7	177.339	8.403	0.21105					
36	400		628	1146	3.2	10.0				-	78.1	21.9	-227.010	9.321	-0.24354				
40			694	1068	3.6	9.0	-		84.9	15.1	317.911	9.322	0.34105						
44			759	991	4.0	9.5	-		84.6	15.4	296.576	9.322	0.31815						
46			788	950	4.4	8.0	-		83.4	16.6	207.228	9.322	0.22230						
48			826	919	4.1	8.0	-		83.6	16.4	223.192	9.322	0.23942						
40			450	547	1193	3.0	8.0		-	80.7	19.3	27.116	10.471	0.02590					
	36			610	1114	3.5	8.0		-	83.6	16.4	250.416	10.471	0.23915					
	40			673	1036	4.0	8.0		-	83.3	16.7	228.274	10.471	0.21800					
	44			740	967	4.0	8.5		-	83.0	17.0	206.680	10.471	0.19737					
	46			773	931	4.1	8.0		-	81.9	18.1	124.406	10.472	0.11880					

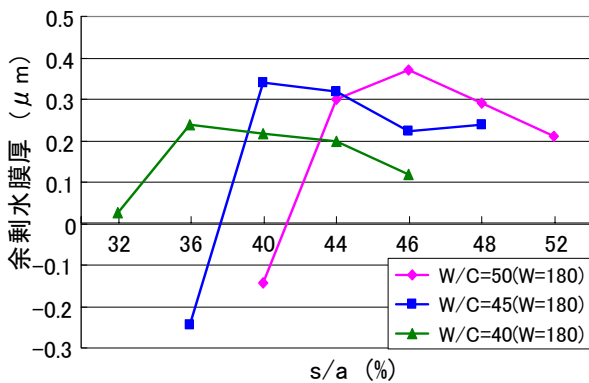


図-4 s/a と余剰水膜厚の関係(中練り)

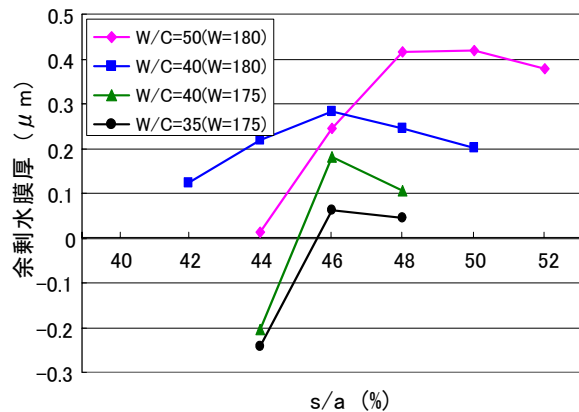


図-5 s/a と余剰水膜厚の関係(軟練り)

やすことにより、ピークを示す s/a が小さくなり、余剰水膜厚が薄くなる傾向となった。

軟練りコンクリートにおいては単位水量が 180 kg/m³ で一定の場合、W/C=50%において s/a=50%、W/C=40%においては s/a=46%でそれぞれ余剰水膜厚が最大となった。また、中練り同様に単位セメン

ト量を増やしたり単位水量を減じたりすることによりピークを示す s/a が小さくなり、余剰水膜厚が薄くなる傾向を示した。

また、中練り、軟練り両配合において、実積率が 80%を割ると余剰水膜厚がマイナスをとってしまった。これは本研究における実積率試験では、

満足の充填を得られなかったためと考えられる。したがって、空隙が大きいために空隙に取られる水量が多すぎたために余剰水量が少なくなったものであり、完全な充填状態を作り出すためには実積率測定方法の更なる検討が必要である。

4.4 流動先端速度と余剰水膜厚の関係

図-2及び図-4より、中練りコンクリートにおいても流動先端速度のピークを示す s/a と、余剰水膜厚から算出された s/a はおおよそ一致する結果となった。また図-3及び図-5より、軟練りコンクリートにおいて傾斜フローによって得られた流動先端速度のピークを示す s/a は、余剰水膜厚を用いて算出された s/a とおおよそ一致した。

これは、余剰水膜厚が大きいほどコンクリートの内部摩擦力を低下させ、塑性粘度を低下させるからであると考えられる。

以上の結果より、材料分離を起こさない範囲における、骨材及び結合材の空隙率より求めた余剰水膜厚のピークを示す s/a と傾斜フロー試験で得られた流動先端速度のピークを示す s/a は近い値をとる傾向があることが確認された。両者の関係を図-6に示す。図より、両者には相関関係があることが中練り、軟練り共に確認された。

したがって、実積率の試験方法など今後の研究課題が残っているが、傾斜フロー試験によって高流動コンクリート以下の流動性を有するコンクリートの粘性を評価することができる可能性が見出された。

5. まとめ

本研究では高流動コンクリートよりも流動性の小さい中練り・軟練りコンクリートにおいて傾斜フロー試験を用いることにより、コンクリートの粘性に関わる性状の変化を評価することが可能かを検討した。また、傾斜フロー試験の結果で得られる流動先端速度とコンクリートの粘性の関係について余剰水膜厚理論を用いて検討した。その結果、余剰水膜厚と流動先端速度には相関関係があり、傾斜フロー試験によって簡易にコンクリートの粘性を評価できる可能性が見出された。

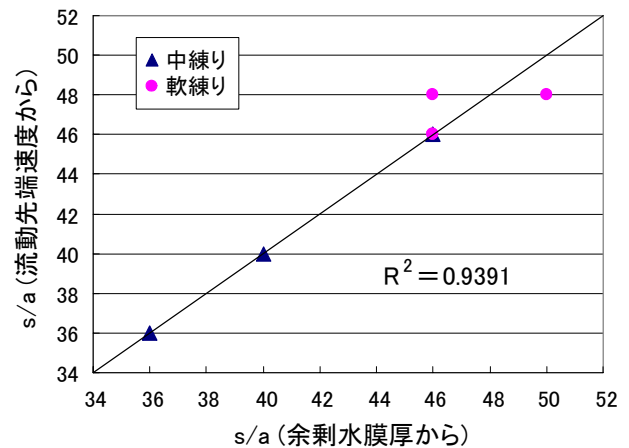


図-6 余剰水膜厚理論及び流動先端速度から得られる s/a の関係

参考文献

- 1) 阿部果林ほか：傾斜フロー試験によるコンクリートのフレッシュ性状評価に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 26，No. 1，pp1245-1250，2004
- 2) 藤原浩己ほか：準高流動コンクリートのワーカビリティ評価試験方法に関する研究，セメントコンクリート論文集，No. 56，pp590-595，2002
- 3) 三好征夫ほか：準高流動および高流動コンクリート中におけるモルタルのレオロジー特性に及ぼす振動の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 21，No. 2，pp499-50，1999
- 4) 吉野公ほか：コンクリートのレオロジー一定数に及ぼす使用材料の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 17，No. 1，pp581-585，1995
- 5) 吉野公ほか：モルタルのレオロジー一定数に及ぼす使用材料の性質の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 16，No. 1，pp461-466，1994
- 6) 宮野和樹ほか：セメントペーストのレオロジー特性に及ぼす調合要因の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp355-360，2000
- 7) 寺田謙一ほか：形状係数による粗骨材の比表面積の簡易測定法，日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)，A-1，pp. 549-550，1998.9
- 8) 加藤佳孝ほか：細骨材の量と比表面積が遷移帯形成に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 20，No. 2，pp775-780，1998