

論文 締固め完了エネルギーによる同一スランブコンクリートの施工性評価

梁 俊*1・丸屋 剛*2・坂本 淳*3・宇治公隆*4

要旨: コンクリートの締固めのしやすさはコンクリートの施工性に大きく影響する。本研究では、産地が相違する粗骨材と細骨材を用い、スランブ 8, 12, 15cm のコンクリートをそれぞれ 3 種類ずつ取り上げ、配合が相違する同一スランブのコンクリートの締固め特性に関して検討した。はじめに、締固め完了エネルギーを用いてフレッシュコンクリートの締固め特性を評価する妥当性に関して検討した。次にフレッシュコンクリートの配合が相違すればスランブが同じコンクリートであっても、締固め完了エネルギーが必ずしも同じであると言えないことから、コンクリートの締固め特性も相違する可能性があることを明らかにした。

キーワード: スランブ, 締固め完了エネルギー, 締固め特性, 初期締固め度

1. はじめに

従来、フレッシュコンクリートのコンシステンシーの評価はスランブ試験によって行われ、施工に適するコンシステンシーの標準値が示されているが¹⁾、この方法では必ずしもコンクリートの施工性を適切に評価することができないため、コンクリートの施工性に対する定量的評価が困難な場合もある。

これまでにも、コンクリートの施工性を定量的に評価するため、骨材の粒度分布の影響、加速度の大小やスランブの変化による検討など、数多くの研究が行われている^{2)~6)}。

コンクリートの施工性において締固め性能は、施工の良否に及ぼす影響が極めて大きい。國府らは、超硬練りコンクリートの配合要因および使用細骨材の変化による締固め性状を試験し、締固めしやすい配合の選定方法について検討しているが³⁾、通常の硬練りコンクリートまでは言及していない。コンクリートの締固めは、振動機により励起される振動エネルギーによってフレッシュコンクリートが内部摩擦抵抗に打ち勝ち、変形を生じる現象である。宇治、梁らは、これまでに、コンクリートのフレッシュ性状が通常の硬練りコンクリート（スランブ 5cm~15cm 程度）の締固め性に与える影響を締固めエネルギーの観点から定量的に評価することを目的とし、超硬練りコンクリートの評価手法をもとに、スランブ 5cm~15cm 程度のコンクリートの変形挙動を評価できる室内試験方法を提案している⁴⁾。

本研究では、この室内試験方法を用い、産地の相違する粗骨材と細骨材を用い、スランブ 8, 12, 15cm のコンクリートをそれぞれ 3 種類ずつ取り上げ、配合が相違す

る同一スランブのコンクリートの締固め特性に関して検討した。はじめに、締固め完了エネルギーを用いてフレッシュコンクリートの締固め特性を評価する妥当性に関して検討した。次にフレッシュコンクリートの配合が相違すればスランブが同じコンクリートでも、締固め完了エネルギーが必ずしも同じであるとは限らないことから、コンクリートの締固め特性も相違する可能性があることを明らかにするとともに、その原因に関して検討した。また、締固め関数の初期締固め度から解析でコンクリートのスランブを求めることにより、実測スランブの誤差を確認した。

2. 試験装置

本研究で用いた試験装置を図-1 に示す。逆回転偏心モータ 2 台を備え、一定振幅により振動する振動台(写真左)、データを記録するためのコンピュータ(写真右)、振動台の振動数を変化させて加速度を調節するための制御盤(写真中央)の 3 点から構成されている。本加振装置は、振幅一定であるが、振動数は可変で、これにより加速度を変化させるようになっている⁴⁾。

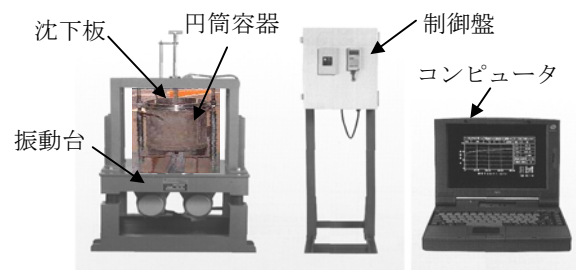


図-1 締固め装置及び容器の設置

*1 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 副主任研究員 博士 (工学) (正会員)
 *2 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主席研究員 博士 (工学) (正会員)
 *3 大成建設 (株) 技術センター 土木技術研究所 土木構工法研究室 主任研究員 修士 (工学) (正会員)
 *4 首都大学東京 大学院都市環境科学研究科 教授 博士 (工学) (正会員)

3. 締固め性の評価方法

コンクリートの締固め性は、コンクリートのコンシステンシーに応じた締固め前における型枠中のコンクリートの見掛けのかさ密度から、コンクリートの配合の理論密度に至る変形の容易さを表すものと考えることができる。そこで、締固めの程度は、円筒容器中の試料の最も高い部分を高さとする円筒体積に対するコンクリート試料の真の体積の比として捉え、これを締固め度 γ と定義する。締固め度 γ は式(1)により表すことができる⁵⁾。

$$\gamma = H_0/h \times 100 = (m/\rho)/A/h \times 100 \quad (1)$$

ここに、 γ ：締固め度(%)、 H_0 ：配合から計算される単位容積質量まで締め固められた時の試料の高さ(mm)、 h ：任意の締固め時間における試料の高さ(mm)、 m ：試料の質量(kg)、 ρ ：配合から計算される試料の単位容積質量(kg/L)、 A ：円筒容器の底面積(mm²)

変形進行曲線を式(2)に示す。なお、式中の各係数は図-2の模式図に対応する。

$$\gamma = C_i + (C_f - C_i)[1 - \exp(-bE^d)] \quad (2)$$

ここに、 γ ：締固めエネルギー E におけるコンクリートの締固め度(%)、 C_i ：初期締固め度(%)、 C_f ：締固めエネルギーを無限大とした時の達成可能な締固め度(%) (硬練りコンクリートの場合は必ず締固めることができるので、 C_f は100%と考えてよい)、 b 、 d ：実験定数
一方、締固めエネルギーは式(3)により求めることができる⁵⁾。

$$E_t = \rho \alpha_{max}^2 t / 4\pi^2 f \quad (3)$$

ここに、 E_t ： t 秒間にコンクリートが受ける締固めエネルギー(J/L)、 t ：振動時間(s)、 α_{max} ：最大加速度(m/s²)、

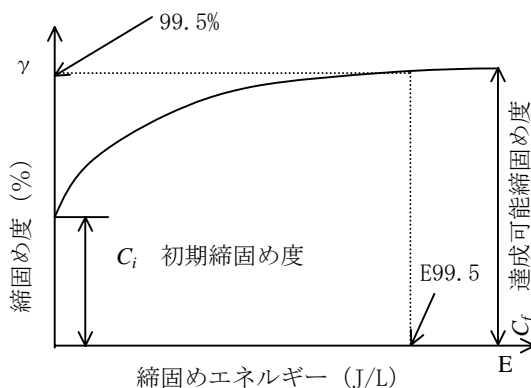


図-2 変形進行曲線の模式図

f ：振動数(s⁻¹)、 ρ ：配合から計算される試料の単位容積質量(kg/L)

本研究では、締固めを終了してもよいとされる締固め度を、締固めが十分になされたと見なしてよい99.5%と設定し、締固め度99.5%までに与えられたエネルギーを締固め完了エネルギー(E99.5%)と定義した⁴⁾。なお、加速度が大きいほど、スランプを生じるようなコンクリートの締固め完了時間は短くなり、その判断による誤差の影響が大きくなる可能性がある。そこで、本研究では、振動数35Hz、締固め加速度1.0 G (9.8m/s²)として実験を行った⁴⁾。

4. 使用材料およびコンクリートの配合

使用材料を表-1に示す。粗骨材には川砂利と砕石を使用した。細骨材としては川砂、2種類の砕砂および山砂を使用した。本実験では、まず、川砂利と川砂を用いスランプ12cmの配合を求めた。その結果、川砂利と川砂の配合は、単位水量152kg/m³、細骨材率41%であった。単位水量と細骨材率を調整しスランプが8、15cmの配合を求めた。川砂利と川砂で出来た配合をグループIとした。同じように、砕石と2種類の砕砂および山砂の混合砂(S2:S3:S4=55:20:25)を使用したグループIIの配合を求めた。また、グループIIの配合中の砂を同体積の2種類の砕砂の混合砂(S2:S3=55:45)で入れ替えてグループIIIの配合とした。スランプを8、12、15cmにするため、グループIIIでは細骨材率と混和剤の量を調整した。なお、グループIとグループIIは表-1の材料を使用し

表-1 使用材料

種類	品質
セメント (C)	普通ポルトランドセメント： 密度 3.16g/cm ³ ，比表面積 3370cm ² /g
細骨材	S ₁ 天竜川産川砂：表乾密度 2.63g/cm ³ ， 吸水率 1.35%，粗粒率 2.75
	S ₂ 厚木飯山地先産砕砂：表乾密度 2.58g/cm ³ ， 吸水率 2.54%，粗粒率 3.04
	S ₃ 大船渡市産石灰砕砂：表乾密度 2.67g/cm ³ ， 吸水率 1.85%，粗粒率 3.43
	S ₄ 富津産山砂：表乾密度 2.60g/cm ³ ， 吸水率 1.38%，粗粒率 1.50
粗骨材	G ₁ 天竜川産川砂利：表乾密度 2.65g/cm ³ ， 粗粒率 7.31，実積率 65.0%
	G ₂ 大船渡市産砕石：表乾密度 2.69g/cm ³ ， 粗粒率 6.48，実積率 59.8%
混和(Ad)	AE減水剤(標準型)，AE剤

表-2 コンクリートの配合

配合 No.	区分		W/C (%)	s/a (%)	目標スランプ (cm)	単位量 (kg/m ³)								AE 減水剤 C×%	AE 剤 C×%
						W	C	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	G ₁	G ₂		
1	グループ I	G ₁ +S ₁	55.4	41.0	8	148	267	781	-	-	-	1129	-	0.25	0.1
2			55.4	41.0	12	152	274	776	-	-	-	1118	-	0.25	0.1
3			55.4	41.4	15	155	280	771	-	-	-	1110	-	0.25	0.1
4	グループ II	G ₂ +S ₂ +S ₃ +S ₄ (S ₂ :S ₃ :S ₄ =55:20:25)	57.0	41.0	8	168	295	-	408	148	185	-	1100	0.25	0.3
5			57.0	41.0	12	173	304	-	402	146	183	-	1100	0.25	0.4
6			57.0	41.0	15	178	312	-	398	145	181	-	1076	0.25	0.3
7	グループ III	G ₂ +S ₂ +S ₃ (S ₂ :S ₃ =55:45)	57.0	44.5	8	169	297	-	444	363	-	-	1033	0.375	0.2
8			57.0	44.5	12	173	304	-	440	360	-	-	1025	0.375	0.3
9			57.0	45.0	15	178	312	-	440	360	-	-	1011	0.375	0.3

ている生コンプラントの配合に近い配合である。表-2に各配合を示す。実際に使用している配合をもととしたため、W/C、s/aはグループごとに相違する。

5. 実験結果及び考察

5.1 締固め関数および締固め完了エネルギー

スランプ 8, 12 および 15cm のコンクリートの振動時間の増加にともなう締固め度の変化を測定し、それに基づき求めた締固め関数を図-3の締固め曲線で示す。9種類の配合すべてについて相関係数は99%以上であり、締固め関数は実測値を良好に近似していた。

同図より、コンクリートのスランプが小さくなることもない、任意の締固めエネルギーにおける締固め度が小さくなるのがわかる。なお、同一スランプであっても配合の相違により締固め曲線は相違しており、締固め度が99.5%に達する締固めエネルギーも相違する。

コンクリートのスランプはサンプリング、スランプコーンを引き上げるのに要する時間や、試験者不足等の試験条件によって誤差が発生する。これにより、施工に使用されたコンクリートの実際の誤差は土木学会「コンクリート標準示方書」で決められたフレッシュコンクリートの許容誤差範囲±2.5cmを越える可能性が存在する。締固め関数の初期締固め度C_iを式(1)中のγに代入することにより、締固め関数からコンクリート試料の初期高さhを求め、初期のスランプ((300-h)/10)を計算することができる。前記の試験条件によるスランプの誤差が締固め度に与える影響は、コンクリート試料に振動を与えた初期の短い時間に集中するので、実測した締固め度の変化を締固め関数で近似することによりその誤差を取り除くことができる。したがって、締固め関数の初期締固め度C_iから求めたスランプは、コンクリートの真のスランプに近いので締固め関数の初期締固め度C_iを用いてコンクリートのスランプ測定値を確認することがで

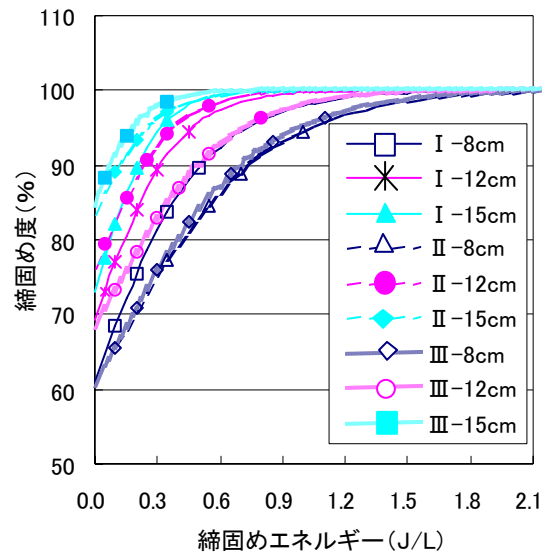


図-3 締固め曲線

表-3 締固め曲線および締固め完了エネルギー

配合 No.	スランプ (cm)			初期締固め度 C _i	E99.5 (J/L)	
	目標	実測	解析			
1	グループ I	8	7.6	9.0	57.25	1.45
		12	10.0	11.9	66.03	0.95
		15	14.1	12.7	68.58	0.65
4	グループ II	8	9.7	9.7	58.25	1.1
		12	12.0	13.8	73.53	0.85
		15	15.8	15.1	79.82	0.65
7	グループ III	8	9.5	9.3	57.02	1.85
		12	11.7	12.1	66.44	1.4
		15	16.3	14.9	78.52	0.55

きる。本研究での実測スランブと解析上のスランブを表-3に示す。

5.2 締固め完了エネルギーとコンクリートの締固め特性

本研究では各配合に対して振動台の上でスランブ試験を行い、各配合の締固め完了エネルギーの半分に相当する振動エネルギーを与えて振動後のスランブとスランブフローを測定した。コンクリート試料に与えるエネルギーを締固め完了エネルギーの半分にしたのはスランブフローがスランブ板の範囲を越えないようにするためである。加振後の試料の形をスランブとスランブフローを用いて比較することで、締固め完了エネルギーによってフレッシュコンクリートの締固め特性を検討する評価方法の妥当性に関して検討を行った。一例として、グループⅢに対する実験結果を図-4に示す。

グループⅢのコンクリートの実測スランブはそれぞれ9.5, 11.7, 16.3cmであり、締固め完了エネルギーはそれぞれ1.85, 1.4, 0.55 J/Lである。初期状態から終局状態まで、同様の变形割合を示すという前提に立ち、スランブ試験後のコンクリート試料に、それぞれの締固め完了エネルギーの半分である0.93, 0.70, 0.28 J/Lのエネルギーを与えることにした。その結果、コンクリート資料のスランブはそれぞれコンクリート試料のスランブはそれぞれ23.3, 23.1, 22.5cmに、スランブフローは43.3, 40.2, 37.8cmになった。同様に、各配合に対して行った計測結果を表-4および図-5に示す。図-5からわかるように、スランブが相違する各配合のコンクリート試料に締固め完了エネルギーの半分を与えることにより、ばらつきはあるがスランブおよびスランブフローが概ね一致するようになっていることがわかる。これは、同じスランブのコンクリートであってもある形状まで変形させるための締固めエネルギーが相違していることを示す。所定のエネルギーを加えることでフレッシュ性状が相違するコンクリートを同一形状にできることを明らかにしたことは、締固め完了エネルギーを用いてフレッシュコンクリートの締固め特性を評価できる可能性があることを示している。

5.3 同一スランブコンクリートの締固め特性の相違

本研究では、締固め完了エネルギーという指標を用いることによって、配合が相違する同一スランブコンクリートの締固め特性に関して検討を行った。各配合のフレッシュコンクリートの締固め完了エネルギーを表-3に、スランブと締固め完了エネルギーの関係を図-6に示す。

ペースト膜厚理論^{5,6)}によると骨材の粒形は骨材同士の噛合せに大きな影響を与えるため、コンクリートの締固め完了エネルギーにも大きな影響を及ぼす⁷⁾。図-6が

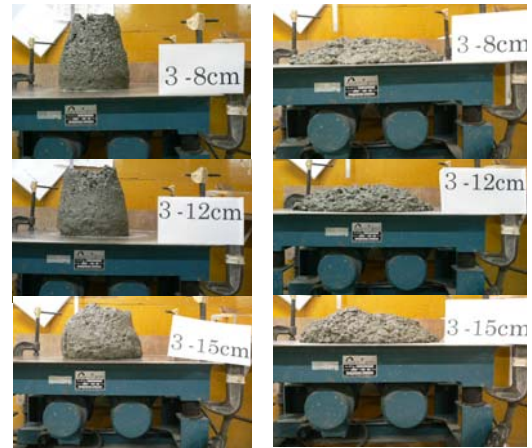


図-4 施工性の確認試験

表-4 加振前後のスランブおよびスランブフロー

目標スランブ (cm)	スランブ (cm)	スランブ (cm)		スランブフロー (cm)	
		加振前	加振後	加振前	加振後
グループ I	8	7.6	22.0	21.15	41.5
	12	10.0	21.9	21.9	37.7
	15	14.1	23.0	27.1	40.6
グループ II	8	9.7	23.2	22.3	40.0
	12	12.0	23.1	23.7	40.4
	15	15.8	23.0	28.6	40.1
グループ III	8	9.5	23.3	21.3	43.3
	12	11.7	23.1	21.7	40.2
	15	16.3	22.5	25.0	37.8

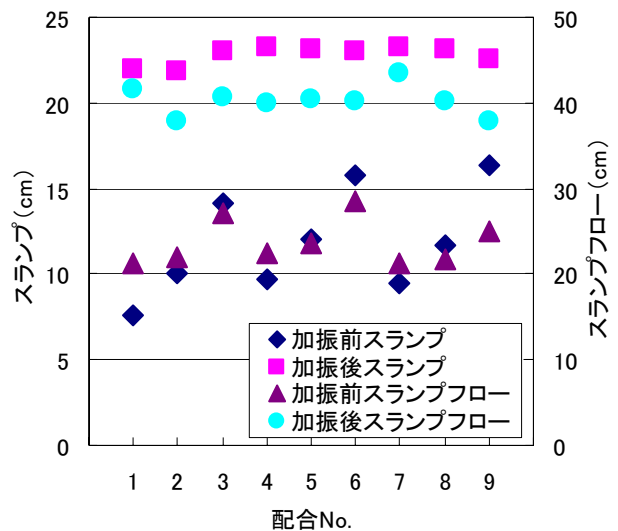


図-5 加振前後のスランブおよびスランブフロー

示すように、グループ I とグループ II のデータはほぼ同じ近似直線上にある。川砂利と川砂を使用したグループ I の配合と砕石と混合砂 (2 種類の砕砂, 山砂) を使用したグループ II の配合は使用した骨材が明らかに相違するが、同一スランブのコンクリートは同じ締固め完了

エネルギーとなっている。なお、グループⅢのデータはグループⅠおよびグループⅡと違う近似線により示されている。すなわち、グループⅢは碎石と砕砂（2種類の砕砂）を使用した配合であるにも拘わらずグループⅡの配合に比べて同一スランブのコンクリートの締固め完了エネルギーが大きくなっており、このことはグループⅡとグループⅢで締固め特性が相違していることを示している。

図-7に各グループのコンクリートに使用した細骨材の粒度分布を示す。グループⅡのコンクリートに使用した細骨材はグループⅠの細骨材と粒度分布がほぼ一致しているがグループⅢのコンクリートに使用した細骨材はグループⅠおよびグループⅡのコンクリートに使用した細骨材と粒度分布が相違して粗くなっている。本研究の結果から、グループⅢのコンクリートがグループⅠ及びグループⅡのコンクリートと同スランブになっても締固めエネルギー、すなわち、締固め特性が相違するようになった主な原因は細骨材の粒度分布や細骨材率など配合条件の相違であると考えられる。

6. まとめ

配合が相違する同一スランブのフレッシュコンクリートの締固め特性について実験的に検討した結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 同一スランブのフレッシュコンクリートであっても配合が相違すれば締固めエネルギーと締固め度の関係を示す締固め曲線が必ずしも同じであるとはかぎらない。
- (2) 締固め曲線で締固めエネルギーがゼロである時の締固め度、すなわち初期締固め度により、コンクリートのスランブの誤差を確認できる。
- (3) 所定のエネルギーを加えることでフレッシュ性状が相違するコンクリートを同一形状にできることを明らかにしたことは、締固め完了エネルギーを用いてフレッシュコンクリートの締固め特性を評価できる可能性があることを示している。
- (4) 同じスランブのフレッシュコンクリートであっても細骨材の粒度分布や細骨材率など配合条件が相違すれば、ある形状まで変形するのに必要な締固めエネルギーが相違することがあるので締固め特性が必ずしも同じであるとは言えない。

参考文献

- 1) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書[施工編]
- 2) 桜井邦昭, 近松 竜一, 入矢 桂史郎, 十河 茂幸：フレッシュコンクリートの変形特性に及ぼす骨材の粒度構

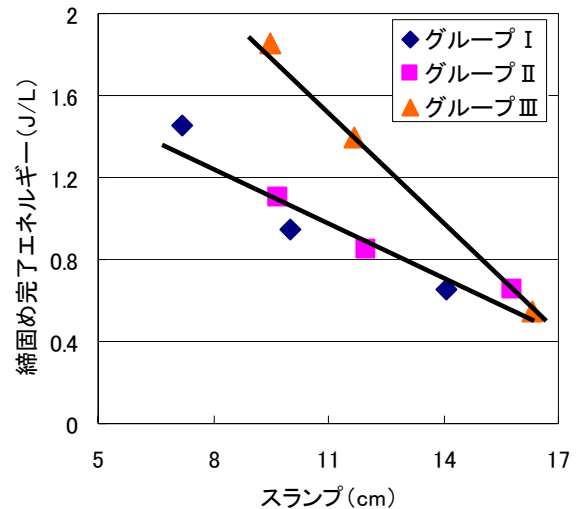


図-6 スランブと締固め完了エネルギーの関係

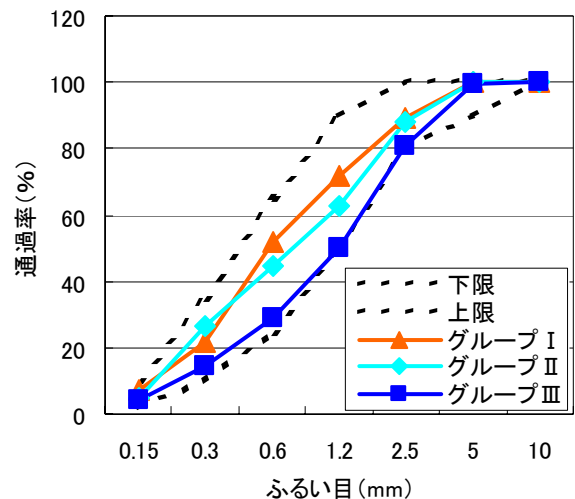


図-7 細骨材の粒度分布

成の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 89-94, 2006. 7

- 3) 國府勝郎, 上野敦：締固め仕事量の評価に基づく超硬練りコンクリートの配合設計, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 109-118, 1996. 2
- 4) 梁俊, 國府勝郎, 宇治公隆, 上野敦：フレッシュコンクリートの締固め性試験法に関する研究, 土木学会論文集 Vol. 62, No. 2, pp. 416-427, 2006. 6
- 5) 松下博通, 田中邦博, 近田孝夫：砕砂コンクリートの細骨材率に関する考察, セメント技術年報, No. 42, pp. 88-91, 1988
- 6) 岩崎訓明：コンクリート配合の原点, セメント・コンクリート, No. 564, pp. 20-27, Feb. 1994
- 7) 梁俊, 宇治公隆, 國府勝郎, 上野敦：粗骨材の実積率がフレッシュコンクリートの締固め性に与える影響, コンクリート工学論文集, Vol. 16, No. 3, pp. 11-19, Sep. 2005

