

論文 粗骨材の寸法, 形状および混入量がフレッシュコンクリートの分離挙動に及ぼす影響

竹内 輝典*1・寺西 浩司*2・谷川 恭雄*3

要旨: 筆者らは, 粗骨材とモルタル間の分離の機構を解明するために, 球引上げ粘度計を球以外の物体や複数の物体を引き上げられるように改良し, その試験装置を用いて, コンクリート中の粗骨材が全体として分離する状況と, コンクリート中の一部の粗骨材が分離する状況をそれぞれ想定した実験を行った。そして, 分離が生じる限界の外力と分離が生じた場合における分離の進展速度を評価した。

キーワード: フレッシュコンクリート, 分離, 骨材寸法, 骨材形状, 粗骨材量

1. まえがき

コンクリートは, 密度, 寸法, 形状などの異なる素材で構成された複合材料である。そのため, 練混ぜ, 運搬, 打設, 締固めなどの作業中に, 素材間に分離が生じることはある程度避けられない。しかし, 分離の程度が著しい場合には, コンクリートは, 構成材料の分布が不均一な状態で硬化することになり, 結果的に, コンクリートに強度, 耐久性上の欠陥が生じてしまう。したがって, 良質なコンクリートを製造するには, 分離を抑制することが重要であり, そのためには, 分離の機構を解明することが必要と考えられる。

このような背景から, 本研究では, 粗骨材とモルタル間の分離に着目し, 分離を「粗骨材とマトリックスモルタルの間に作用する外力に伴う相対速度の発生」と定義して, 単純化された条件下で分離の基礎的な機構の解明を試みた。そのために, 球引上げ粘度計を球以外の物体や複数の物体を引き上げられるように改良した試験装置を用いて, 粗骨材に見立てた物体 (以下, 模擬粗骨材という) の移動速度と抵抗力の関係を測定し, 分離が生じる限界の外力と分離が生じた場合における分離の進展速度を評価した。

2. 実験概要

本研究では, 2つのシリーズの実験を行った。まず, 実験1では, 例えば, 静置時の粗骨材の沈降現象のような, マトリックスモルタル中を粗骨材が全体として移動する状況を想定した。そして, モルタルを試料とし, 模擬粗骨材の個数, 形状, 寸法を変化させた場合の実験を行った。次に, 実験2では, 例えば, 鉄筋間を粗骨材が通過する際に生じるような, コンクリート中の一部の粗骨材が分離する状況を想定した。そして, 粗骨材量を変化させたコンクリートを

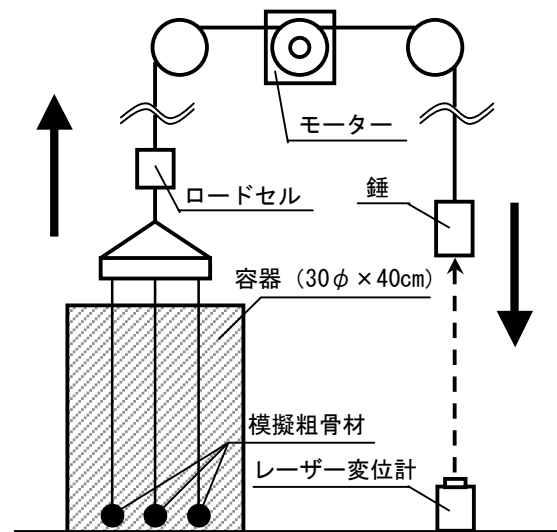


図-1 模擬粗骨材引上げ試験装置の概要

*1 名城大学大学院 理工学研究科 建築学専攻 (正会員)

*2 名城大学 理工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

*3 名城大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

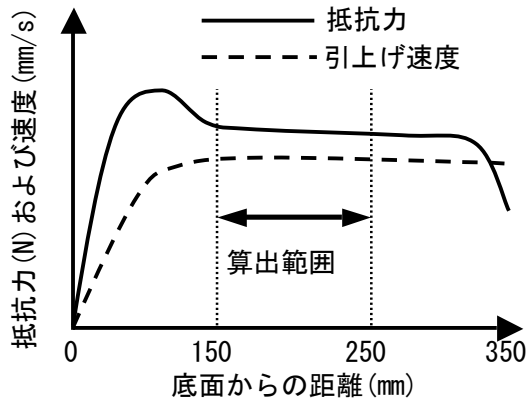


図-2 抵抗力および引上げ速度と底面からの距離の関係（模式図）

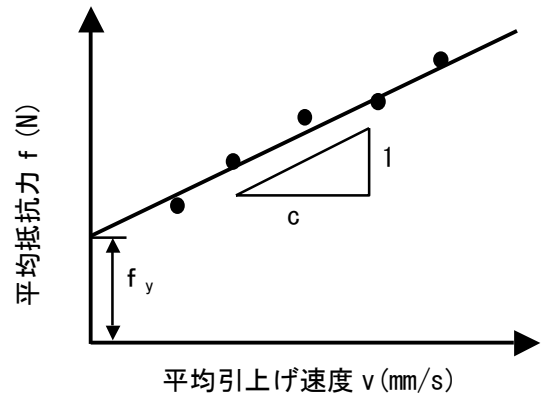


図-3 平均抵抗力と平均引上げ速度の関係（模式図）

試料として、球1個を模擬粗骨材とした場合の実験を行った（この場合は、模擬粗骨材を多数の粗骨材の中のひとつと見なした）。

2.1 模擬粗骨材引上げ試験

(1) 試験装置および評価値

図-1に、模擬粗骨材引上げ試験装置の概要を示す。この試験では、容器に詰めた試料中で模擬粗骨材を引き上げて、そのときの抵抗力および引上げ速度をロードセルおよびレーザー変位計により測定した。図-2に、抵抗力および引上げ速度と底面からの距離の関係を模式的に示す。引上げ初期には加速の影響が見られるため、本実験では、底面から150～250mmの範囲の値を平均抵抗力および平均引上げ速度とした。また、模擬粗骨材の平均引上げ速度は約13, 39, 65, 95, 146 mm/sの5段階に変化させた。そのときの平均抵抗力と平均引上げ速度の関係は、図-3に示すようにほぼ線形となることから、本研究では、同図における回帰直線の切片を分離限界値 f_y 、傾きの逆数を分離速度係数 c と定義した。この関係を次式に示す。

$$f = \frac{v}{c} + f_y \quad (1)$$

ここに、

f : 平均抵抗力 (N)

f_y : 分離限界値 (N)

c : 分離速度係数 (mm/N・s)

v : 平均引上げ速度 (mm/s)

ここで、上記のうちの分離限界値は、コンク

リートと粗骨材が分離する限界の外力を評価し、また、分離速度係数は、分離が生じた場合における分離の進展速度を評価するものである。なお、この試験で球1個を引き上げる場合、その装置は通常の球引上げ試験と同じになり、評価方法のみが異なることになる。また、以降の検討において、複数個の模擬粗骨材を取り扱う場合には、模擬粗骨材1個当たりの値を分離限界値および分離速度係数と考えることにする。

(2) 評価値のレオロジー的意味

仮に、マトリックスモルタル中に球状の模擬粗骨材が1個存在したとすると、分離限界値 f_y および分離速度係数 c は、式(1)、ビンガムモデルの構成則およびAnsley式¹⁾から、次式のように表すことができる。

$$f_y = 12\pi r^2 \tau_y \quad (2)$$

$$c = \frac{1}{6\pi r \eta} \quad (3)$$

ここに、

τ_y : 降伏値 (Pa)

η : 塑性粘度 (Pa・s)

r : 球の半径 (m)

上式から、分離限界値 f_y および分離速度係数 c は、マトリックスモルタルのレオロジー定数の他に、模擬粗骨材の寸法にも左右される値であることがわかる。実際の状況では、この他に、模擬粗骨材の形状や個数などにも影響されるものと考えられる。

表-1 使用材料 (実験1 および 2)

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント (密度:3.16g/cm ³)
細骨材	長良川産川砂(表乾密度:2.61g/cm ³ , F. M. :2.87)
粗骨材*	春日井産砕石(表乾密度:2.68g/cm ³ , 最大寸法:20mm)
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物
消泡剤	ポリアルキレングリコール誘導体

*実験2にて使用

表-2 モルタルの調合 (実験1)

水セメント比 (%)	絶対容積 (ℓ/m ³)			高性能AE減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
	水	セメント	細骨材		
30	268	282	450	1.0	0.01
45	323	227		-	

表-3 実験ケース

シリーズ	検討項目	形状	呼び寸法 D (mm)	引き上げる個数
1a	個数	球	20	1, 2, 3, 4, 5
1b	形状 および 寸法	球	20, 30	1
		円錐	20, 30, 40	
		立方体	20, 30	

2.2 モルタルを試料とした実験 (実験1)

実験1では、コンクリートの分離挙動に対する粗骨材の個数、形状および寸法の影響を検討するために、模擬粗骨材に対してこれらの要因を変化させ、2種類の調合のモルタルを試料として模擬粗骨材引き上げ試験を行った。表-1および表-2に、モルタルの使用材料および調合を示す。W/Cは、モルタル自身が分離しないように、比較的低い範囲で2水準に変化させた。なお、本実験では、モルタルに対してスランプフロー試験を行っており、その値は、W/C=30%で70cm程度、W/C=45%で45cm程度であった。

表-3に実験のケースを示す。実験1では、まず、粗骨材量の影響を検討するために、模擬粗骨材の個数を変化させた実験を行った(実験1a)。次に、模擬粗骨材の形状および寸法の影響を検討するための実験を行った(実験1b)。表-4に、実験1aにおける模擬粗骨材の配置方法を示す。また、図-4に、実験1bにおける模擬粗骨材の形状および寸法を示す。なお、

表-4 模擬粗骨材の配置方法

個数	1	2	3
配置方法			
個数	4	5	
配置方法			

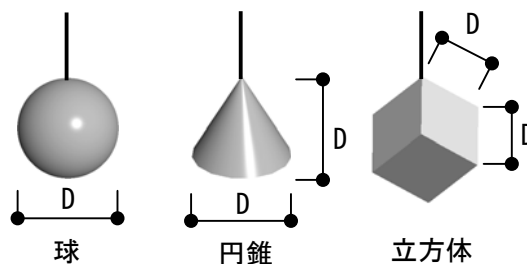


図-4 模擬粗骨材の形状および寸法

表-5 コンクリート中のモルタル成分の調合 (実験2)

水セメント比 (%)	絶対容積 (ℓ/m ³)			高性能AE減水剤 (C×%)	消泡剤 (C×%)
	水	セメント	細骨材		
30	304	321	375	1.2	0.01

模擬粗骨材はすべてアルミ製(密度:2.70g/cm³)とした。

2.3 コンクリートを試料とした実験 (実験2)

(1) 試料

実験2では、コンクリートの分離挙動に対する粗骨材量の影響を検討するため、コンクリートに占める粗骨材の体積割合(粗骨材体積比V_g)を実験要因とした。そして、表-5に示す調合のモルタルに対し、粗骨材体積比V_gが0, 15, 30, 32.5, 35, 37.5, 40 および 42.5%の8水準になるように粗骨材を混入したコンクリートを試料とした。その際、スランプは調整しなかった。

(2) 試験項目

模擬粗骨材引き上げ試験では、アルミ球1個を模擬粗骨材として引き上げた。その際、模擬粗骨材の直径は、コンクリートの粗骨材(砕石)の最大寸法に合わせて20mmとした。実験2では、この他に、スランプ試験および円筒貫入試験²⁾を行った。

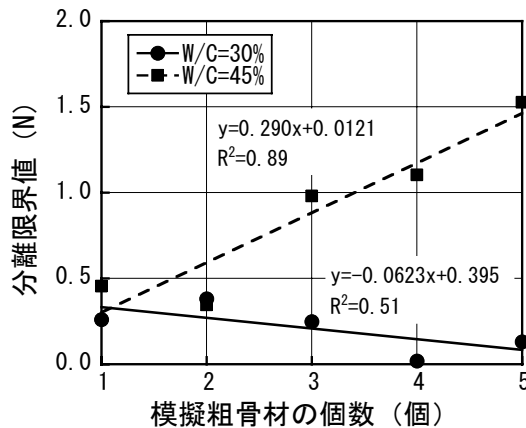


図-5 分離限界値と模擬粗骨材の個数の関係

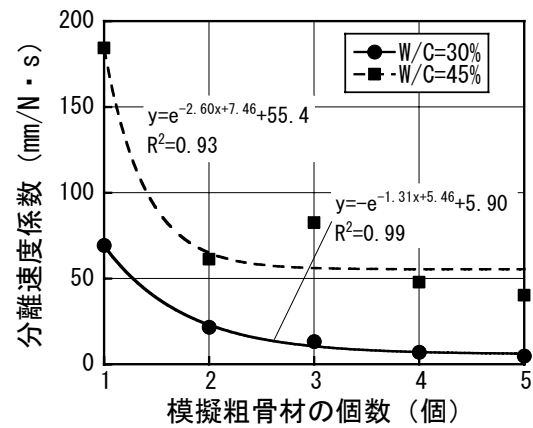


図-6 分離速度係数と模擬粗骨材の個数の関係

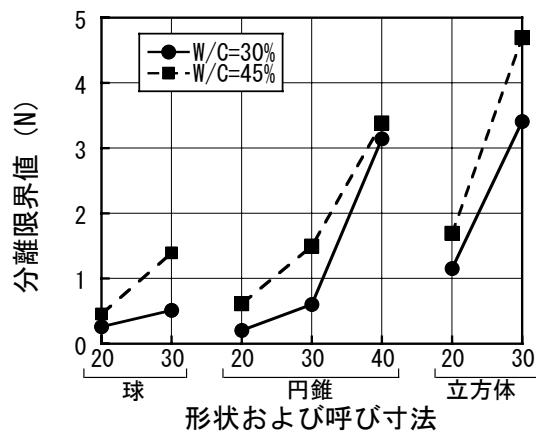


図-7 分離限界値に対する形状および寸法の影響

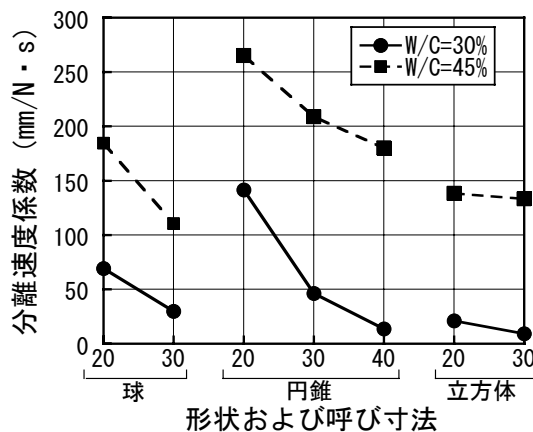


図-8 分離速度係数に対する形状および寸法の影響

3. 実験結果とその考察

3.1 粗骨材の個数, 形状および寸法の影響 (実験1)

(1) 粗骨材の個数の影響

図-5および図-6に、分離限界値および分離速度係数と模擬粗骨材の個数の関係を示す。両図における模擬粗骨材の個数が1個の場合に着目すると、分離限界値はW/Cにかかわらず同程度であり、分離速度係数はW/C=30%の方が小さい。すなわち、どちらの試料も分離の発生しにくさは同程度であるが、W/C=45%の方がW/C=30%に比べて分離の進展しやすい試料であるといえる。図-5によると、分離限界値に関しては、模擬粗骨材の個数が増えるほど、W/C=30%では、その値がやや小さくなるものの、ほとんど変化がなく、W/C=45%では値が大きくなっている。また、図-6によると、分離速度係数は、模擬粗骨材の個数が増えるほど小さく

なっている。これらのことは、コンクリート中の粗骨材量が多くなるほど、粗骨材の連行能力が高くなり、分離の発生および進展に対する抵抗性が高くなることを示しているものと考えられる。

(2) 粗骨材の形状および寸法の影響

図-7および図-8に、分離限界値および分離速度係数に対する模擬粗骨材の形状および寸法の影響を示す。両図によると、いずれの形状、寸法の場合も、W/C=30%とW/C=45%の場合の値の差は、図-5および図-6における模擬粗骨材が1個の場合の値の差と同程度である。このことから、試料のレオロジー特性は、粗骨材の形状や寸法に関係なく反映されるものと考えられる。

また、図-7および図-8によると、模擬粗骨材の形状が同じ場合、呼び寸法が大きいほど、分離限界値は大きくなり、分離速度係数は小さく

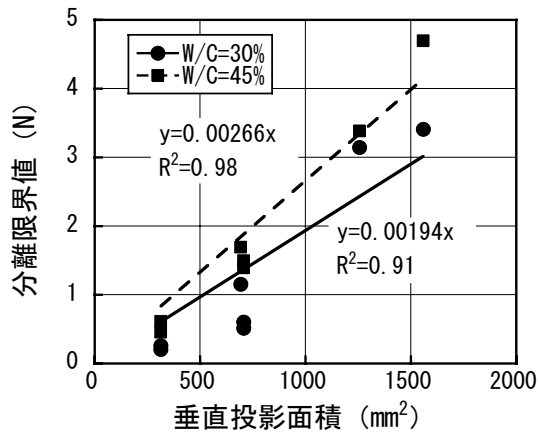


図-9 分離限界値と模擬粗骨材の垂直投影面積の関係

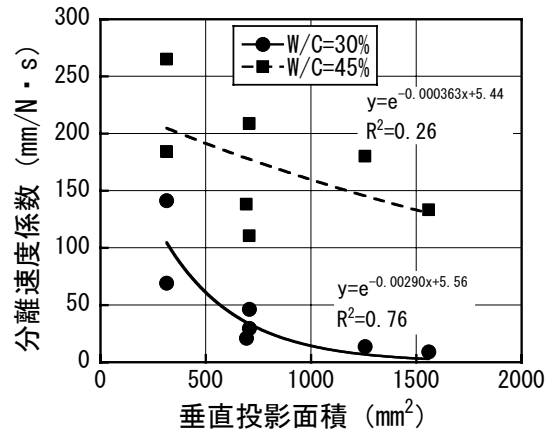


図-10 分離速度係数と模擬粗骨材の垂直投影面積の関係

くなっている。すなわち、粗骨材の寸法が大きい方が、分離が発生しにくく、かつ、進展しにくくなるものと考えられる。そこで、分離限界値および分離速度係数に対する模擬粗骨材の形状および寸法の影響を包括的に評価するために、模擬粗骨材を引上げ方向に対して垂直に投影した面の面積（垂直投影面積）を計算した。

図-9および図-10に、分離限界値および分離速度係数と垂直投影面積の関係を示す。図-9によると、分離限界値は、垂直投影面積が大きいほど大きくなっており、また、両者の関係は、模擬粗骨材の形状や寸法にかかわらず、W/Cごとにほぼ一つの直線で表される。すなわち、これらの影響は、マトリックスが同一であれば、垂直投影面積により包括的に評価できるものと考えられる。一方、図-10によると、いずれの試料においても、両者の相関は、分離限界値の場合ほど高くはなく、分離速度係数を垂直投影面積により評価することは難しいといえる。

なお、以上のことは、模擬粗骨材の形状が球である場合に、式(2)における分離限界値が球の投影面積 πr^2 の関数で表され、式(3)における分離速度係数がそのような関数では表されないことから、間接的に説明される。

3.2 コンクリート中の粗骨材量の影響（実験2）

図-11に、スランプと粗骨材体積比 V_g の関係を示す。同図によると、スランプは粗骨材体積比 V_g が大きいほど小さくなっている。なお、ス

ランプ試験の状況の目視観察によると、 $V_g=0\sim 32.5\%$ の試料では、粗骨材だけがスランプ板の中央部分に取り残されており、また、 $V_g=35\%$ の試料ではそれに近い状態であった。すなわち、スランプ試験の状況から判断される分離境界は、 $V_g=35\sim 37.5\%$ 付近であると考えられる。

図-12に、円筒貫入試験により得られた流入モルタル値と粗骨材体積比 V_g の関係を示す。同図より、粗骨材体積比 V_g が大きいほど流入モルタル値が直線的に減少し、分離抵抗性が向上していることがわかる。なお、円筒貫入試験では、流入モルタル値30mmが分離境界とされている²⁾。この値に対する粗骨材体積比 V_g を図中の回帰式から計算すると36.9%となり、スランプ試験から判断した分離境界の V_g と一致する。

図-13および図-14に、分離限界値および分離速度係数と粗骨材体積比 V_g の関係を示す。両図によると、粗骨材体積比 V_g が大きいほど、分離限界値は指数的に大きくなり、分離速度係数は小さくなっている。これらのことから、コンクリート中の一部の粗骨材が分離するような状況においても、コンクリートの粗骨材量が多くなるほど分離の発生および進展に対する抵抗性が向上するものと考えられる。なお、スランプおよび円筒貫入試験から判断される分離境界の粗骨材体積比（ $V_g=35\sim 37.5\%$ ）は、図-13における回帰曲線の立ち上がり部分に相当する。このことは、模擬粗骨材引上げ試験によって、

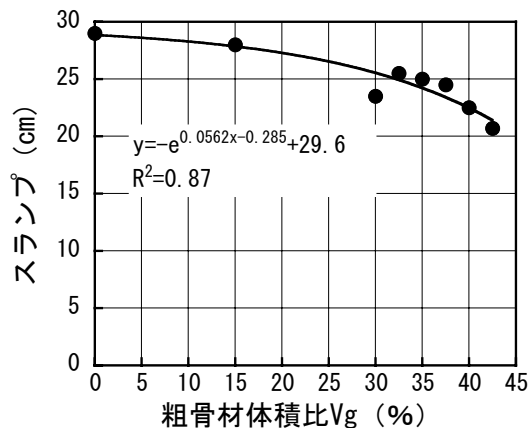


図-11 スランプと粗骨材体積比の関係

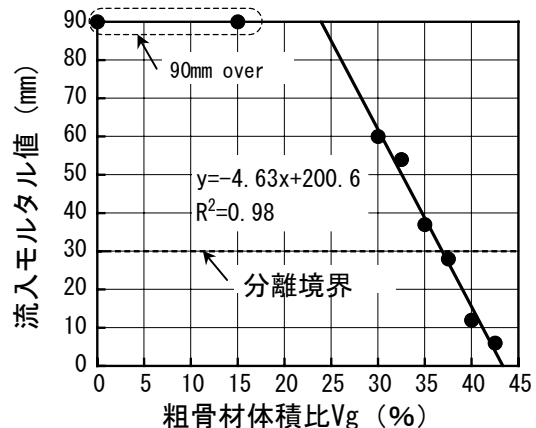


図-12 流入モルタル値と粗骨材体積比の関係

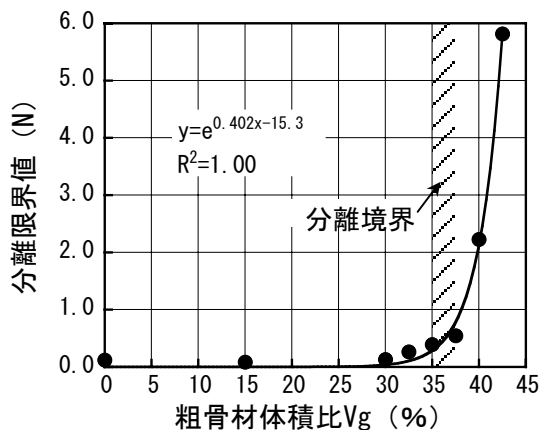


図-13 分離限界値と粗骨材体積比の関係

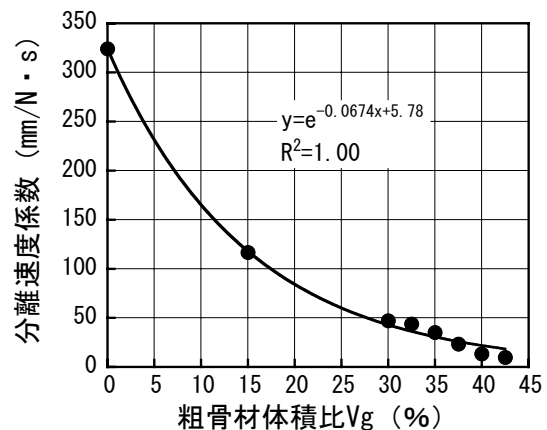


図-14 分離速度係数と粗骨材体積比の関係

コンクリートの分離境界を明確に把握できることを示しているものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、球引上げ粘度計を改良した試験装置を用いて、コンクリートの分離に対する粗骨材寸法、形状および混入量の影響を検討した。その結果から新たに得られた知見は、以下の通りである。

- (1) コンクリートは、粗骨材量が多くなるほど分離の発生および進展に対する抵抗性が高くなる。また、このことは、コンクリート中を粗骨材全体が分離する場合に対しても、一部の粗骨材だけが分離する場合に対しても共通していえる。
- (2) 分離の発生に対する粗骨材の形状および寸法の影響は、粗骨材の進行方向に対する垂直投影面積によって包括的に評価できる。
- (3) スランプ試験と円筒貫入試験から判断され

る分離境界は一致する。また、その境界は、模擬粗骨材引上げ試験においても特徴的な傾向として現れる。

謝辞

本研究の実施に際し、名城大学学生・竹内辰徳君、宇佐美裕之君および本慎也君の助力を得た。また、本研究費の一部は、平成15年度日本学術振興会科学研究費補助金・基盤研究(C2)によった。ここに付記して謝意を表す。

引用文献

- 1) Ansley, R. W. : Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic, AIChE Jour., Vol. 13, No. 6, pp. 1993-1996, 1967.
- 2) 日本建築学会: 高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, pp. 136-140, 1997. 1