

論文 高流動コンクリートの間隙通過性の簡易評価手法

黒川 善幸^{*1}・谷川 恭雄^{*2}・金 和中^{*3}・寺西 浩司^{*4}

要旨：フレッシュコンクリートの間隙通過性に関して、そのメカニズムと影響要因を整理した。間隙通過性は、材料性質である流動性と間隙条件の関数で表されるが、間隙条件の悪化にともなって減少する。間隙通過性の改善には試料の流動性を改善することと、間隙条件による低下を抑制することの2種類のアプローチがある。本研究では、リング貫入試験を用いて、外力や間隙条件が高流動コンクリートの間隙通過性に及ぼす影響について検討した。その結果、マトリックスモルタルのレオロジー性質および粗骨材体積濃度が間隙通過性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。

キーワード：高流動コンクリート、間隙通過性、粗骨材連行性、リング貫入試験

1. まえがき

近年、コンクリート工事における施工性を改善する目的で、高い流動性を付与された高流動コンクリートが開発・実用化されつつある。その開発過程は、実験室レベルでの試験結果を蓄積することによる調合決定手法の確立が先行しているが、各種のコンシステンシー試験によって測定・観察される流動性状から、実際の施工条件下の型枠内における充填性を適確に予測することはきわめて難しく、最終的な充填性の確認には実大実験が必要となるのが実状である。これは、流動性の中でも、比較的単純な条件下における変形能力を把握する品質管理試験は確立されているが、実施工に近い、より複雑な条件下における流動性は、試験装置が必然的に複雑になることもあり、簡便な測定は困難であることに起因している[1], [2], [3]。特に、現場における高流動コンクリートの品質管理に適切な試験方法は確立されていない。

フレッシュコンクリートの充填性とは、変形抵抗性、材料分離抵抗性、粗骨材連行性などの材料性質の総称である流動性に加えて、各種施工条件を考慮した総合的な性状である[2]。高流動コンクリートには、省振動下で高く確実な充填性が要求されるため、間隙を通過する能力を打設前に確認・把握する試験の重要性が認識されつつあり、変形抵抗性のみの従来の評価方法では対応できない。

筆者らは既に、フレッシュコンクリートの間隙通過性を比較的簡便に測定することのできる試験装置として、リング貫入試験を提案した[4]。本報では、間隙通過性のメカニズムに関する考察を行うとともに、高流動コンクリートを用いて、外力や間隙条件を変化させたリング貫入試験装置を用いた実験を行い、間隙通過性に与える各種要因に関する情報を整理する。

*1 名古屋大学助手 工学部建築学科、工修（正会員）

*2 名古屋大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

*3 慶北大学校助教授 工科大学建築工学科、工博（正会員）

*4 前田建設工業（株）技術研究所建築材料施工研究室、工博（正会員）

2. 間隙条件と間隙通過性

2.1 間隙条件

通常、コンクリート打設時には、型枠内に鉄筋をはじめとする流動に対する障害物が配置されている（図-1参照）。間隙は、これらの境界の単独または複数の境界から構成される。また、実際には、間隙は多数連続して存在し、相互に影響する。

これらの境界面では、その材質によってすべり抵抗特性が変化するが、高流動コンクリートのように比較的降伏値が小さく付着力の大きい試料では、境界面におけるせん断すべりよりも試料の変形が卓越するため、境界面に生じるすべりはほとんど無視できるものと考えられる。

2.2 間隙通過流動のメカニズム

間隙が狭くなっている場所を通過する試料は、流線が湾曲し、局部的に流速が早くなる。図-2に間隙を通過する試料の流動状況を模式的に示す。図中の流線の間隔が狭いほど流速分布の勾配が大きい。図-2 (a), (b) に示すように、全体の巨視的な流速が同程度の場合、モルタルのような均質体とみなせる流体では狭い間隙の方が局部的な流速が早くなる。せん断ひずみ速度の増加は、粘性抵抗の増加につながるため、逆に、全体の流速も制限されることを意味する。

一方、フレッシュコンクリートを粗骨材とマトリックスモルタルからなる固液2相系材料と考えると、固体である骨材は塑性変形をしないことから、流動する領域が減少するため、全体系としてのみかけの流動抵抗が増大する。間隙における流動は図-2 (c), (d) のようになり、いずれも流速勾配が局所的に大きくなり流線は乱れる。この傾向は、間隙が狭いほど顕著になり、閉塞を引き起こす原因となる。さらに、粗骨材はマトリックスモルタルの流動により運搬される形となり、間隙通過流動はマトリックスモルタルの粗骨材連行性の影響を受ける。

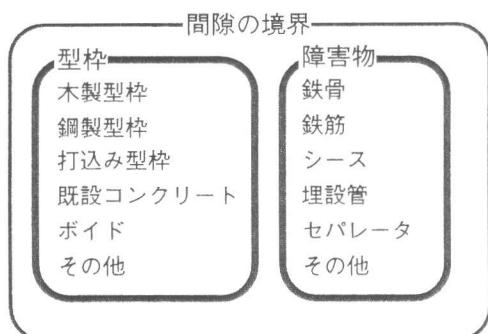


図-1 間隙を構成する境界

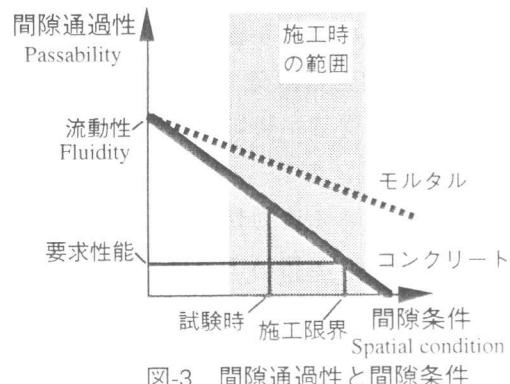
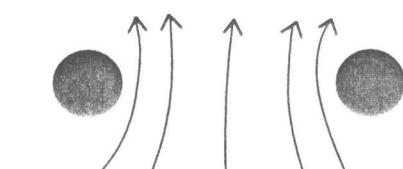
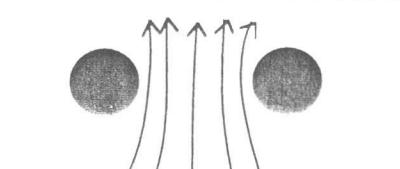


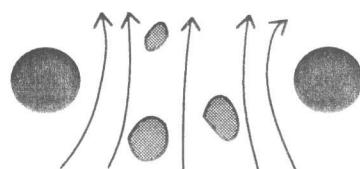
図-3 間隙通過性と間隙条件



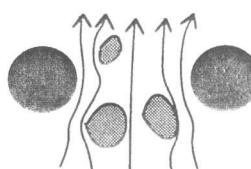
(a) 比較的広い間隙を通過するモルタル



(b) 比較的狭い間隙を通過するモルタル



(c) 比較的広い間隙を通過するコンクリート



(d) 比較的狭い間隙を通過するコンクリート

図-2 間隙を通過する試料

2.3 間隙通過性

間隙通過性は、試料の流動性のみならず、型枠、配筋などの施工上の諸条件に左右される。図-3は、間隙通過性と間隙条件の関係を模式的に表したものである。同図に示すように、流動性を材料性質に限定した場合、間隙通過性は間隙条件の悪化により減少する。この減少の度合いは、2.2節で述べた理由から、巨視的には同じ流動性を持つ場合でも、モルタルよりもコンクリートの方が大きい。現在までに間隙通過性および間隙条件ともに、厳密な定量化は行われていないため、同図は絶対的な座標では示すことができない。試験時には一定の間隙条件下で測定しているのに対し、施工時には間隙条件は広い範囲で分布している。したがって、試験時には、最もクリティカルな条件下で測定を行うことが望ましい。一方、ある間隙条件の範囲内で必要な間隙通過性を確保するためには、流動性を高めることと、間隙条件による低減係数（図-3中の直線の勾配）を抑えることの2種の対応が使用材料に対して行われることになる。

ちなみに、ポンプ圧送性やホッパー打設性なども、限定された条件下における間隙通過性として取り扱うことができる。

3. リング貫入試験による簡易評価手法

リング貫入試験は、高流動コンクリートの現場における品質の簡易評価を目的として開発された[3], [4]。本試験の1回目の沈下速度 ($Rv1$: 以下、初回沈下速度) は、フレッシュコンクリート全体系としての間隙通過性を示し、収束沈下速度 (4回目の貫入でほぼ収束するため $Rv4$ を用いる) はマトリックスモルタルの間隙通過性を示す。また、初回沈下速度と収束沈下速度の比 ($Rv1/Rv4$: 以下、沈下速度比) は、間隙通過時に粗骨材とマトリックスモルタルの分離のしやすさを表す指標であり、これが小さいと粗骨材連行性が高いと評価できる[4]。

3.1 実験の概要

写真-1および図-4に使用したリング貫入試験装置とその形状・寸法および重量を示す。リング部には $\phi 6\text{mm}$ の丸鋼を使用した[5]。

また、同一試料に対して、攪拌することなくリングの貫入を4回繰り返し、リングが試料表面から10cmの深さまで沈下する時間を毎回測定し、沈下速度 Rv をそれぞれ求めた。

実験に用いた高流動コンクリートの基本調合を表-1に示す。結合材は普通ポルトランドセメントに比表面積 $6000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を混合した2成分系である。また、混和剤として、ポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用い、一部にセルロース系増粘剤を使用した[6]。

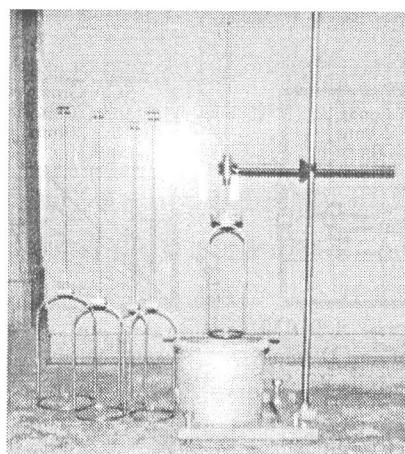


写真-1 リング貫入試験

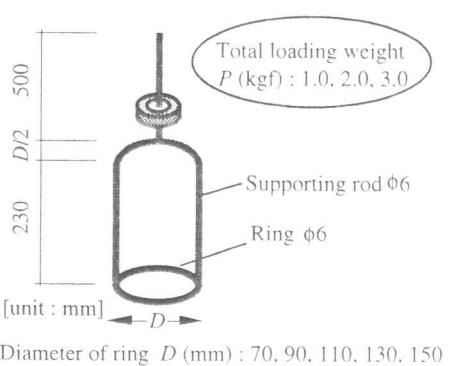


図-4 実験装置の形状・寸法および重量

表-1 実験に用いたコンクリートの基本調合

Series	W/B	W	C	Sg	S	G	SCA	HAE/B	Gmax	air
S	0.333	170	255	255	848	800	0.300	---	0.019	20, 10
C							--			4.0

[Notes] W/B: Water binder ratio, B=C+Sg, W: Water (kg/m^3), C: Cement (kg/m^3), Sg: Ground granulated blast-furnace slag (kg/m^3), S: Fine aggregate (kg/m^3), G: Coarse aggregate (kg/m^3), SCA: Segregation control agent (kg/m^3), HAE: High-range water reducing AE agent, Gmax: Maximum size of gravel (mm), air: Air content (%).

.2 結果とその考察

図-5にリング直径 D 、載荷荷重 P および沈下速度 R_{v1} および R_{v4} から求めたせん断応力 τ およびせん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ の関係を示す[4]。1回目および4回目の貫入結果は、リング直径および載荷重の変化に対して、ほぼ直線上に分布している。大きな沈下速度の範囲では、ひずみ速度がや小さく測定されているが、これは、本試験方法の適用限界に近いと考えられる。また、図から明らかなように、4回目の貫入時の結果は、1回目と比較して、せん断応力切片である降伏値と、直線の逆勾配である塑性粘度の減少が顕著である。これは、貫入の繰返しによって、リングの軌道に粗骨材が存在しなくなり、局所的に軟度が増加し、粘度が減少すること[4]を示している。

次に、載荷荷重をリング内部の断面積で除して載荷応力とし、さらに、沈下速度 R_v が応力と形の関係にあると仮定し、本実験の標準的な載荷応力である 2kPa 時の沈下速度を各リング直径ごとに算出した。図-6に、同一応力下での沈下速度 R_v とリング直径 D の関係を示す。初回沈下速度 R_{v1} および収束沈下速度 R_{v4} は、リング直径が増加するにしたがって増加する傾向にある。この結果から、前掲の図-2および図-3に示した傾向を定量化することができる。図-6(c)に示す同一応力下における沈下速度比 R_{v1}/R_{v4} とリング直径 D の関係から明らかなように、沈下速度

度比は、リングの直径の影響を受けない。

図-6をまとめ、同一応力下における初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の関係を図-7に示す。図中の同一記号は、リング直径が 70-150mm の範

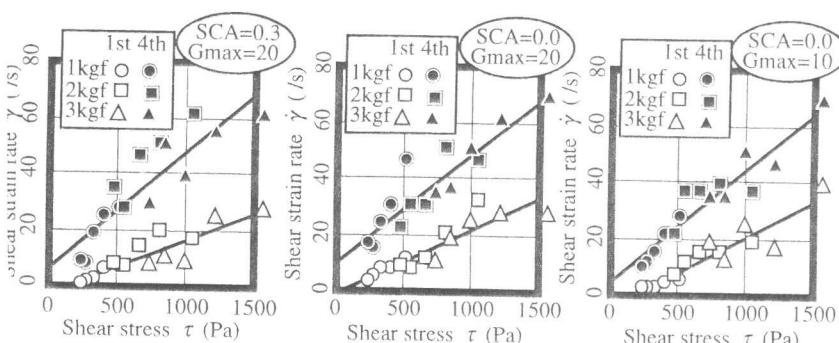
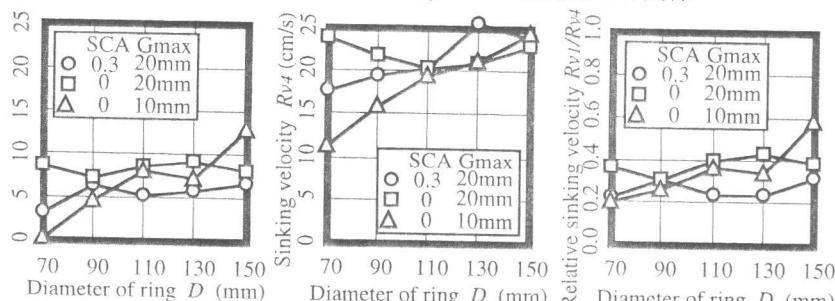


図-5 せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ とせん断応力 τ の関係



(a) 初回沈下速度 R_{v1} (b) 収束沈下速度 R_{v4} (c) 沈下速度比 R_{v1}/R_{v4}

図-6 同一応力下 (2kPa) での沈下速度 R_v とリング直径 D の関係

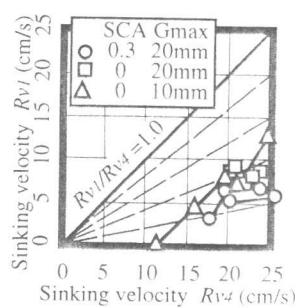


図-7 同一応力下での初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の関係

図の結果である。粗骨材最大寸法 Gmax が 20mm の試料の測定値は、ほぼ同一領域に分布し、リングの直径の影響がこの範囲では小さいのに対し、粗骨材最大寸法が 10mm の試料では、リング直径によって、沈下速度 R_v の測定値が大きく変化するため、沈下速度比 R_{v1}/R_{v4} の変化も大きい。これは、粗骨材のサイズに比較して、リング直径の変化量が相対的に大きくなるためである。

図-8 は、基準調合に対して粗骨材量を外割りで増減させた場合の沈下速度 R_v の変化を示す。初回沈下速度 R_{v1} と沈下速度比 R_{v1}/R_{v4} は、ともに粗骨材量が多くなるにつれて直線的に減少する。これは、2.2 節で述べたようなメカニズムにより、間隙通過性は悪化するが、粗骨材連行性は大きくなることを示す（図-2 参照）。また、粗骨材量が限界値より大きくなると、リングの沈下量が 10cm よりも小さくなり、試料が間隙を通過せず、みかけの降伏値の増加によって閉塞する。一方、分離低減剤を添加した試料の両評価値は無添加の試料に比べて小さく、粘性の増大は、間隙通過性を小さく、粗骨材連行性を大きくすることがわかる。

図-9 に、初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の関係を示す。図中には、初回沈下速度 R_{v1} および沈下速度比 R_{v1}/R_{v4} を、粗骨材量に対して直線で回帰した場合の曲線を併示した。図から明らかなように、収束沈下速度 R_{v4} がある程度大きくなると、初回沈下速度 R_{v1} は急激に増加し、間隙通過性が損なわれる。

3.3 間隙通過性と沈下速度の関係

図-10 は、初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の関係を模式的に示したものである。図中のトーンで示した領域は、間隙通過性および粗骨材連行性がともに良好な理想的な領域である。高流動コンク

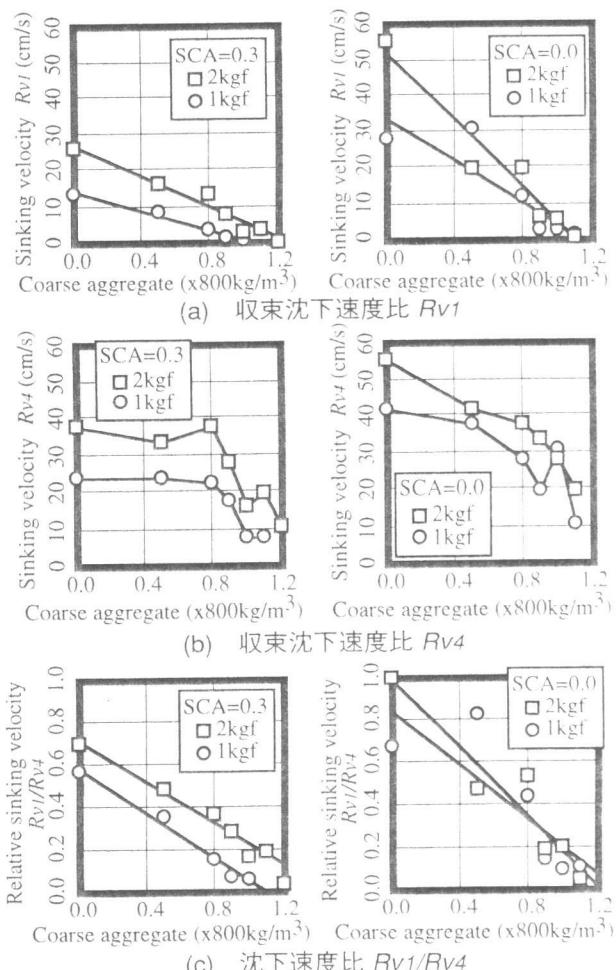


図-8 沈下速度 R_v と粗骨材量の関係

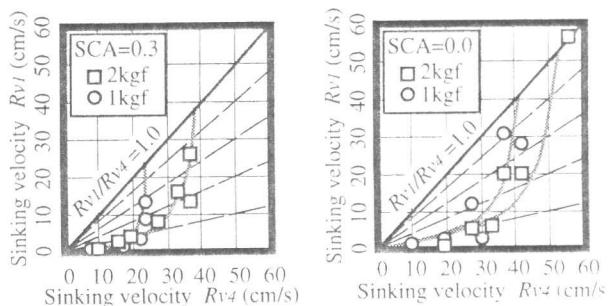


図-9 初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の関係

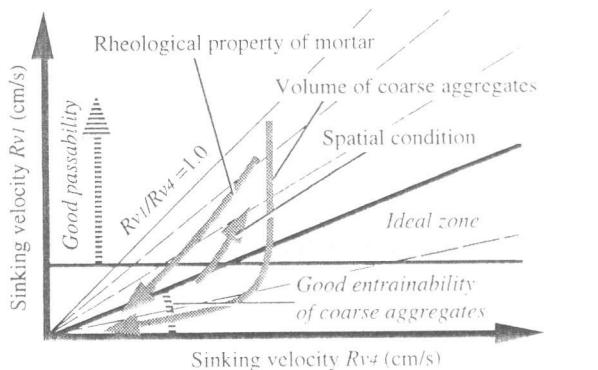


図-10 間隙通過性と粗骨材連行性の評価指標に与える諸要因の影響

リートでは、材料分離を抑制する目的で、モルタルの粘性を増加させるが、このような場合、図中の左下方向に移動する。また、粗骨材量が増加すると、粗骨材連行性は高くなるが、みかけの降伏値の増大とともに、間隙通過性は急激に低下し、さらに増大させると図中の左下の領域に移動する。

以上のような傾向が、リング貫入試験から観察されるが、前掲の図-3に示すように、間隙通過性はさらに総合的な観点から定量化を行う必要があるものと考えられる。

4.まとめ

本研究では、フレッシュコンクリートの間隙通過性に関して、その影響要因を整理した。間隙通過性は、材料性質である流動性と間隙条件の関数であるが、間隙条件の悪化にともなって減少する。間隙通過性の改善には、試料の流動性を改善することと、間隙条件による低下傾向を抑制することの2種類のアプローチがある。

また、高流動コンクリートを試料として、リング貫入試験を行い、間隙通過性の簡易評価を試みた。本実験によって得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) 間隙通過性は、今後総合的な定量化が必要であるが、リング貫入試験の初回沈下速度 R_{v1} と収束沈下速度 R_{v4} の比（沈下速度比： R_{v1}/R_{v4} ）によって比較的簡単に評価することができ、初回沈下速度 R_{v1} が大きいほど間隙通過性が高く、沈下速度比 R_{v1}/R_{v4} が小さいほど粗骨材連行性が良好であると判断できる。
- 2) マトリックスモルタルのレオロジー性質および粗骨材体積濃度が、コンクリート全体系としての間隙通過性および粗骨材連行性の指標に及ぼす影響は大きい。

[謝辞]

本研究の遂行にあたり、名古屋大学・森博嗣助教授のご教示を得た。また、実験に際し名古屋大学大学院・若林信太郎君の助力を得た。なお、本研究費の一部は、平成6年度文部省科学研究費補助金・試験研究(A)（研究代表者：東京大学・岡村甫教授）ならびに日本板硝子材料工学助成会研究助成金によった。付記して謝意を表する。

[引用文献]

- 1) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(I), pp.1-144, 1993.5
- 2) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.1-138, 1994.5
- 3) 谷川恭雄他：高流動コンクリートの各種コンシステンシー評価試験方法に関する研究（その1～その13），日本建築学会大会学術講演梗概集（東海），A, pp.479-504, 1994.9
- 4) 寺西浩司・渡辺健治・黒川善幸・森博嗣・谷川恭雄：リング貫入試験による高流動コンクリートの間隙通過性評価，超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会, pp.1-8, 1994.5
- 5) 若林信太郎・谷川恭雄・森博嗣・黒川善幸・寺西浩司：高流動コンクリートの間隙通過性の評価方法に関する研究，日本建築学会東海支部研究報告集, No.33, pp.105-108, 1995.2
- 6) 山川勉・早川和良：高流動コンクリート用増粘剤の基礎的性状について，コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.325-330, 1992.6.