

# 論文 骨材の性質および配合がコンクリートの充てん性に及ぼす影響に関する研究

吉野 公<sup>\*1</sup>・大西 利勝<sup>\*2</sup>・井上 正一<sup>\*3</sup>・黒田 保<sup>\*4</sup>

**要旨**：本研究は、ボックス型充てん試験装置に振動モータをとり付けたボックス型加振充てん装置で、微粉末を多く含む石灰石を用いて製造したコンクリートを対象として、使用骨材や配合がコンクリートの充てん性に及ぼす影響を検討した。その結果、普通骨材より実積率が大きく粒形のよい石灰石骨材を用いたコンクリートの充てん性がよいことを明らかにした。また、粗骨材容積、粉体量、モルタルの振動下での塑性粘度がコンクリートの充てん性に及ぼす影響を検討し、配合要因の中では、粉体量がコンクリートの充てん性との関連が強いことを明らかにした。

**キーワード**：ボックス型加振充てん装置、石灰石骨材、粉体量

## 1. はじめに

コンクリートに要求される適正なワーカビリティとは、振動締固めによって、コンクリートが材料分離することなく鋼材間を円滑に通過し、かぶり部や隅角部あるいはPC定着部などに密実に充てんできる性能である。ワーカビリティの良否は、振動締固めを加えた際の流動性と材料分離抵抗性との相互作用によって定まることが経験的に知られている。なお、土木学会の「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」によれば、材料分離抵抗性を評価する試験として、加振充てん装置を用いた間隙通過時間試験が提案されている。この試験で測定される充てん時間は、振動締固めに伴い鉄筋間隙をコンクリートが円滑に通過するか否かの目安となる指標と考えられ、流動性あるいは材料分離抵抗性に乏しいコンクリートは、鉄筋の流動障害部におけるブロッキングなどで充てん時間が長くなる。しかしながら、性能照査型の考え方を採り入れたコンクリート標準示方書[施工編]でも「ワーカビリティの照査は、構造物の構造条件や実際の施工条件を考慮した適切な試験などで確認することにより行うことを原則とする」と規定しているが、現状では、このワーカビリティはスランプによってのみ判断されている。

そこで、本研究は、高流動コンクリートで用いられるボックス型充てん試験装置に振動モータをとり付けたボックス型加振充てん装置(以下加振充てん装置)を試作し、この装置を用いた間隙通過試験を行い、コンクリートの充てん性を定量的に評価することを試みた。まず、試作した加振充てん装置と棒状のバイブレータをコンクリート中に挿入することにより加振させた場合の充てん

時間と振動加速度を、いくつかの配合に対して行い、比較検討した。その後、微粉末を多く含む石灰石を用いて製造したコンクリートを対象として、使用材料や配合がコンクリートの充てん性に及ぼす影響を検討した。鳥取大学では、石灰石は摩砕に弱く、運搬時に石灰石どうしがぶつかり合うことで粉体化しやすく、微粒分を多く含む場合があることから、微粒分を含む石灰石砕砂および石灰石碎石を単独に、あるいは併用した形でコンクリート用骨材に有効に利用する方法の検討を行ってきた<sup>1)</sup>。これに関連し、細骨材のみに石灰石砕砂を用いたコンクリート、粗骨材のみに石灰石碎石を用いたコンクリート、細・粗骨材ともに石灰石骨材を用いたコンクリートに対して、振動下における間隙通過試験を行った。なお、間隙通過性は単位粗骨材量とモルタルの粘性が影響することが指摘されており<sup>2)</sup>、本研究は、振動下でのモルタルの塑性粘度を測定すること、また、かなり単位粗骨材量が多い配合も対象としていることが特徴である。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

使用した骨材の種類とその性質を表-1に示す。使用した粗骨材の最大寸法は20mmである。なお、石灰石砕砂は次節に示す骨材の組合せにおいて、細骨材のみに石灰石砕砂を用いた場合(石灰石砕砂Ⅰ)と細・粗骨材ともに石灰石骨材を用いた場合(石灰石砕砂Ⅱ)で、搬入時における微粒分量が異なっている。また、セメントには高炉B種セメント(密度:3.04g/cm<sup>3</sup>)、混和剤にはリグニンスルホン酸系のAE減水剤とアルキルエーテル系AE助剤を使用した。微粒分量の調節に用いた石灰石

\*1 鳥取大学 大学院 工学研究科 准教授 工博 (正会員)

\*2 宇部興産株式会社 技術開発研究所 コンクリート研究グループリーダー 工修 (正会員)

\*3 鳥取大学 大学院 工学研究科 教授 工博 (正会員)

\*4 鳥取大学 大学院 工学研究科 准教授 工博 (正会員)

表-1 骨材の物理的性質試験結果

骨材の種類		絶乾密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	F.M.	粒形判定実積率 (%)	実積率 (%)	微粒分量 (%)
細骨材	普通砂	2.64	1.30	2.63	57.0	-	3.9
	石灰石砕砂 I	2.67	0.65	2.28	56.8	-	5.4
	石灰石砕砂 II	2.67	0.61	2.51	56.1	-	2.2
砕砂の JIS 規格		≧2.50	≦3.0	-	≧54	-	≦9.0
粗骨材	普通碎石	2.73	0.61	6.79	57.3	58.5	0.0
	石灰石碎石	2.67	0.55	6.41	59.7	60.9	2.6
	碎石の JIS 規格	≧2.50	≦3.0	-	≧56	-	≦5.0*

\*：粒形判定実積率が 58% 以上の場合

微粉末は、比表面積 5100cm<sup>2</sup>/g、密度 2.70g/cm<sup>3</sup>の市販品を用いた。なお、石灰石砕石と石灰石砕砂では、それに含まれる微粉末の比表面積が異なっており、石灰石砕石では 6700 cm<sup>2</sup>/g 程度、石灰石砕砂では 3300cm<sup>2</sup>/g 程度であり、微粒分量の調節に用いた石灰石微粉末はその中間の比表面積となっている。砕石の微粉末が細かくなっているのは、砕砂の微粒分はクラッシャーによる破碎工程で発生したものがほとんどであるのに対し、砕石のそれは輸送過程で骨材同士が磨砕されて発生する細かなものが多くなるためと推察される。

## 2.2 実験計画

表-2 に実験計画を示す。骨材の組合せとして、細・粗骨材ともに普通骨材を用いた普通コンクリート (N)、細骨材のみに石灰石砕砂を用いたコンクリート (LN)、粗骨材のみに石灰石砕石を用いたコンクリート (NL)、細・粗骨材ともに石灰石骨材を用いたコンクリート (LL) に対して、振動下における間隙通過試験を行った。また、水セメント比と石灰石に含まれる微粒分量を実験要因としてとりあげている。

なお、表-2 において LN, NL の後の数字は、それぞれの石灰石骨材に含まれる微粉末量を示している。また、LL については、細・粗骨材ともに搬入時の微粒分量を L○と表記し、細・粗骨材に含まれる微粒分量がそれぞれ JIS 規格の上限値 (細骨材：9%、粗骨材：5%) のものを L①、細・粗骨材に含まれる微粒分量がそれぞれ JIS 規格の上限値の 2 倍 (細骨材：18%、粗骨材：10%) のものを L②と表記している。

なお、コンクリートの配合条件は、スランプ 8.0±1.5cm、空気量 4.5±1.5%、細骨材率は W/C=55%において実験によって最適細骨材率をもとめ、W/C=45, 65%は土木学会の水セメント比による細骨材率の修正値とした<sup>1)</sup>。図-1 に W/C=55%における粉体量と細骨材率との関係を示す。石灰石微粒分量が多くなると、最適細骨材率はかなり小さくなり、粗骨材量の多い配合となっている。

図-2 に W/C=55%における粉体量と単位水量との関係を示す。粉体量の増加とともに単位水量は増加しているが、石灰石骨材が JIS の規格の 2 倍程度の微粒分量を

表-2 実験計画

使用骨材	W/C (%)
N	45, 55, 65
LN5.4, LN9, LN18	
L○, L①, L②	
NL2.6, NL7, NL12	55

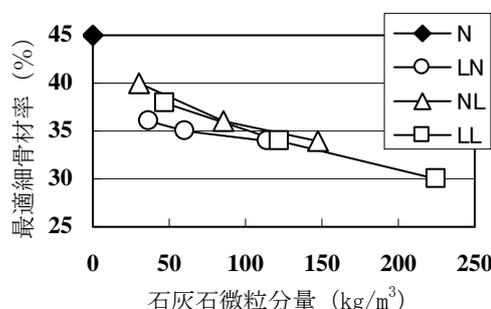


図-1 石灰石微粒分量と細骨材率との関係

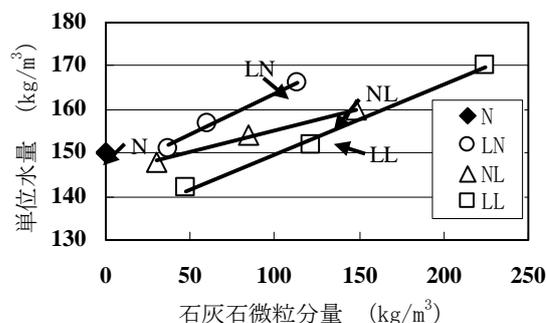


図-2 石灰石微粒分量と単位水量との関係

含んでいても、単位水量は 170 kg/m<sup>3</sup> 以下であり、石灰石微粉末は単位水量にあまり悪影響を与えない粉体といえる。なお、W/C=65%では、W/C=55%と同じ単位水量、W/C=45%では、W/C=55%に比べ 2~3 kg/m<sup>3</sup> 増加した。

## 2.3 実験方法

本実験で用いた加振充てん装置の概略を図-2 に示す。本装置は、高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過試験方法<sup>3)</sup>で規定されているボックス型容器の投入口背面に加振用モータを取り付けたものである。なお、流動障害は R2 である。

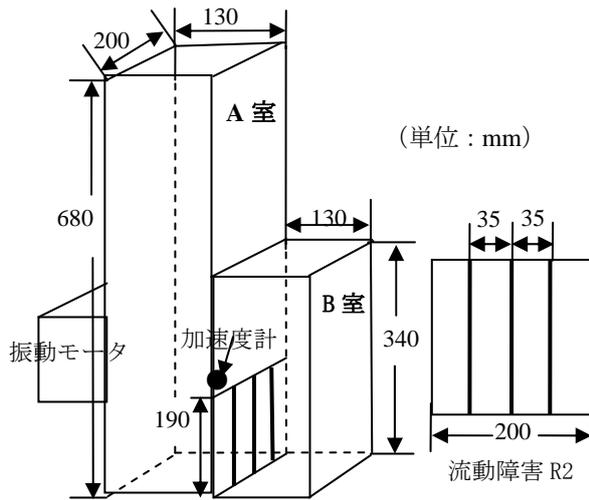


図-3 加振充てん装置の概略図

実験方法は、まず、充てん装置を支持台の上に設置し、上面が水平となるようにする。つぎに、仕切りゲートを閉じた状態で、電源をOFFのままハンドスコープなどを用いて容器のA室を満たすようコンクリート試料を流し込む。ここからモータの電源をONにし、同時にストップウォッチで時間の測定を開始する。このとき、A室に試料を満たすため、5秒経過までに試料がA室上面と一致するようコンクリートを追加し、5秒経過と同時に仕切りゲートを開く。コンクリートが流動障害を通過してB室に流動し、B室の充てん高さが18cm、21cm、24cm、27cm、30cmのときの経過時間を測定した。なお、実験は、50mmの発泡スチロール板の上に2mmのゴム板を敷き、その上加振充てん装置を設置して行った。

実際の施工では棒状バイブレータが用いられる。そこで、棒状バイブレータによる加振での実験(図-4)も行った。容器は加振充てん装置を使用し、投入口面にバイブレータを固定する蓋を作成してコンクリートを加振させた。加振充てん装置の場合と同様に振動開始から5秒経過までに試料がA室上面と一致するようコンクリートを追加し、測定を行っている。なお、加振充てん装置とバイブレータを挿入した場合との比較実験では、図-3に示す位置に加速度計をとり付け、加速度の測定も行った。振動モータおよびバイブレータ(振動部:径23mm、長さ556mm)の仕様を表-3に示す。振動モータは試験器の運搬性を考慮し軽量のものを採用した。

また、コンクリート試料をウェットスクリーニングしたモルタルに対して、振動下の塑性粘度を球引き上げ式粘度計によって測定した。コンクリートと同じ振動条件でのモルタルの塑性粘度を測定することを目的に、容器には加振充てん装置を用い、仕切り板を設置したA室の40cmの高さまでモルタルを満たし、振動モータをONにし、球が容器の底から5cmから15cmの間を移動すると

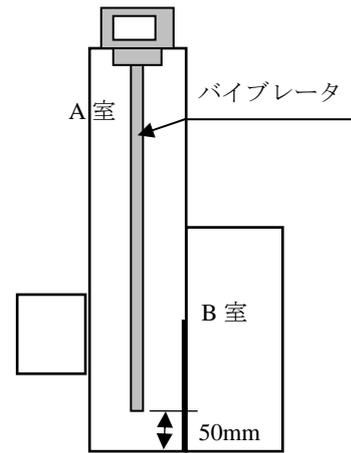


図-4 バイブレータによる充てん装置

表-3 振動モータの仕様

種類	出力 (W)	振動数 (VPM)	遠心力 (kN)	質量 (kg)
振動モータ	35	3450	0.21	6.2
バイブレータ	280	85		3.7

きの速度と力を測定し、塑性粘度を算出した。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 加振充てん装置の評価

図-5は試作した加振充てん装置とバイブレータを挿入した場合の充てん高さとの関係の一例を示したものである。図-5より、加振充てん装置はバイブレータを用いた場合より充てん時間が遅くなった。特に、充てん時間が遅い試料では、バイブレータを挿入した場合と加振充てん装置との差は広がった。

図-6はコンクリートが30cmの高さまで充てんする時間を、試験を行ったすべてのコンクリートで、バイブレータを挿入した場合と加振充てん装置で比較したものである。バイブレータを挿入した場合時間が60秒を超えるコンクリートでは60秒以降のわずかな増加で、加振充てん装置の時間が急激に増加する傾向がうかがえる。ま

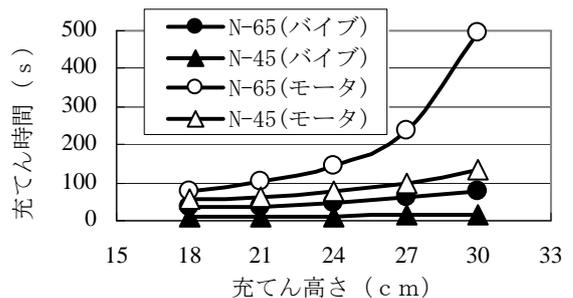


図-5 装置間の比較

た、バイブレータを挿入した場合にはモルタル先送りの材料分離は見られなかったが、加振充電装置では、充電時間が200秒を超える場合には、B室上部はほとんどモルタルとなっており、モルタル先行による分離が見られた。

加振充電装置とバイブレータを挿入した場合の振動加速度を図-3に示した位置に設置した加速度計で測定した結果、加振充電装置では、試料や充電高さによって多少異なるが、約10m/s<sup>2</sup>程度であるのに対し、バイブレータを挿入した場合は約30m/s<sup>2</sup>程度であった。バイブレータは出力の比較的小さなものであるが、それよりも加振充電装置の振動加速度は約1/3程度である。

### 3.2 骨材の種類や配合が間隙通過性に及ぼす影響

図-7, 8に普通骨材および石灰石粗・細骨材を用いたコンクリートの水セメント比が間隙通過性に及ぼす影響を示している。これらの図より、水セメント比が小さくなるにつれて、間隙通過性がよくなることが分かる。また、図-7, 8を見比べた場合、特に W/C=55, 65において、骨材の種類によって充電時間に差が出ている。

図-9は W/C=55%において骨材の種類の影響を見たものである。なお、石灰石骨材の微粒分量は搬入時のものである。図より、石灰石骨材を用いたコンクリートが普通骨材を用いたコンクリートよりも充電高さ30cmで充電時間が早くなっていることが分かる。

フレッシュコンクリートの間隙通過性は、高流動コンクリートに関して多くの研究<sup>4), 5)</sup>がなされている。それらをまとめると、間隙通過性に影響を及ぼす要因として、まず粗骨材絶対容積があげられる。これに関連し、同じ粗骨材絶対容積であっても、骨材の実積率が大きいほど間隙通過性はよい。また、モルタルの粘性が小さい場合には、粗骨材連行性が低くなり、粗骨材とモルタルの分離により間隙通過性が悪くなる。この分離抵抗性に対しては、土木学会の「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」では、セメントや混和材などの単位粉体量をその指標としている。

これを踏まえて考察すると、W/C=55, 65%においては単位粉体量が少ないために使用骨材の影響が大きく現れたと考えられ、石灰石を用いたコンクリートが普通骨材を用いたものより、間隙通過性がよいといえる。骨材の性質の差としては、まず粗骨材の実積率があげられる。表-1に示すように、石灰石碎石の実積率(60.9%)が普通碎石の実積率(58.5%)よりも大きい。また、粒形判定実積率も、石灰石碎石59.7%と普通碎石の57.3%よりも大きいことから粒形がよい骨材であることがわかる。一方、細骨材に関しては、粒形判定実積率は普通砂と石灰石砕砂とあまり変わらないが、石灰石砕砂の粗粒率F.M.が普通砂のそれよりも小さいことがあげられる。ま

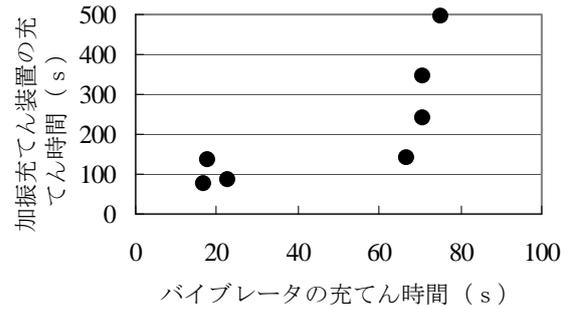


図-6 装置間の充電時間の関係

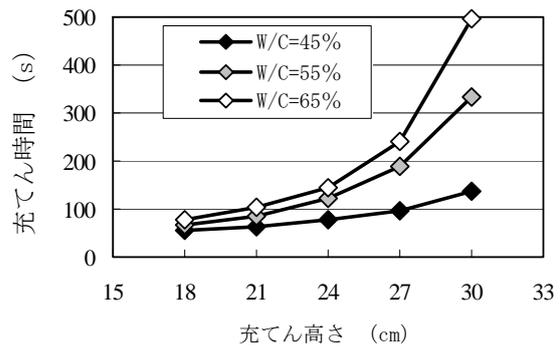


図-7 充電性に及ぼす W/C の影響 (N)

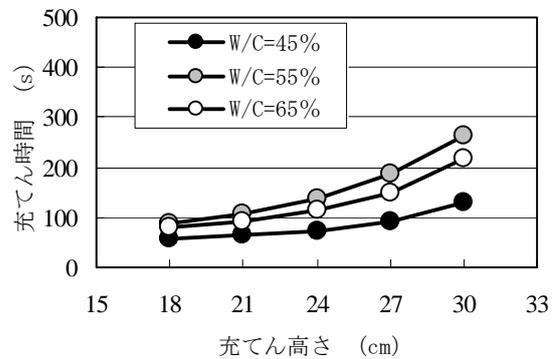


図-8 充電性に及ぼす W/C の影響 (LL)

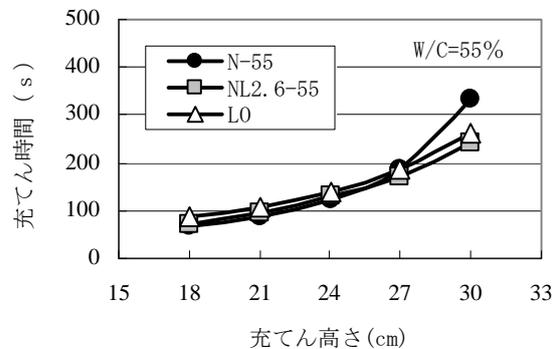


図-9 充電性に及ぼす使用骨材の影響

た、石灰石骨材を用いたほうが、骨材に含まれた微粉末により、全体の粉体量が多くなり、モルタルと粗骨材の

材料分離が抑制されたことも影響していると考えられる。

骨材に含まれる微粒分量が充てん時間に及ぼす影響を図-10, 11に示す。図より、搬入時の微粒分量の石灰石骨材を用いたコンクリートに比べ、石灰石微粒分量が多くなると充てん時間は早くなった。これは、単位粉体量が多くなり、それとともにモルタルと粗骨材の材料分離が抑制されたためと考えられる。しかし、微粒分を増量したものに関しては、微粒分量の多少による差はほとんど見られない。石灰石微粉末はそれを増量してもセメントや高炉スラグ微粉末にくらべ、コンクリートの粘性がそれほど大きくなりえないことが高流動コンクリートの研究で知られており、粉体系の高流動コンクリートの混和材として用いられている。このような石灰石微粉末の性質が、ある一定量以上の微粒分量で充てん性に影響を及ぼさなかったと考えられる。

以上の結果および土木学会の「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針(案)」から、配合面においては粉体量がコンクリートの充てん性に大きく影響することが推察できる。そこで、単位粉体量と充てん時間との関係を検討する。

図-12に、すべてのコンクリートについて、それらのコンクリート中の単位粉体量と充てん高さ30cmにおける充てん時間との関係を示す。図より、単位粉体量が300 kg/m<sup>3</sup>程度までは、単位粉体量が多くなるにつれて充てん時間が早くなり、単位粉体量が350kg/m<sup>3</sup>程度以上になると充てん時間はほぼ一定となることがわかる。土木学会コンクリート標準示方書施工編では、良好な充てん性を確保する観点から、本研究で用いた粗骨材の最大寸法20mmの場合には、単位粉体量を少なくとも270 kg/m<sup>3</sup>確保し、より望ましくは300 kg/m<sup>3</sup>以上とするのが推奨されるとしている。本研究で得られた結果は、これを裏付けるもので、300 kg/m<sup>3</sup>以上では、充てん時間の変化は少なく、モルタル先送りの分離現象も見られず、良好な充てん性が得られているといえる。ただし、粉体量は、コンクリートの流動性や材料分離抵抗性に対しては、質量ではなく容積で影響してくる<sup>6)</sup>。本研究で用いた石灰石微粉末とセメントでは密度が異なることから、本質的には粉体の絶対容積で評価する方がよいと考えられる。

図-13に、粉体の絶対容積と充てん高さ30cmにおける充てん時間との関係を示す。図より、単位粉体量と充てん時間との関係と同様の関係が得られ、粉体の絶対容積0.1m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>以上で良好な充てん性が得られるといえる。

粉体量の増加が充てん性の改善につながる事が分かったが、これは、粉体量の増加によってモルタルの塑性粘度が大きくなったことがその要因のひとつと考えられる。そこで、モルタルの塑性粘度のみるため、振動下で測定したモルタルの塑性粘度と充てん高さ30cmにお

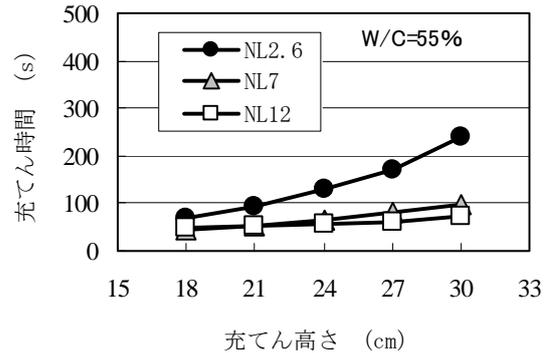


図-10 充てん性に及ぼす微粒分量の影響 (NL)

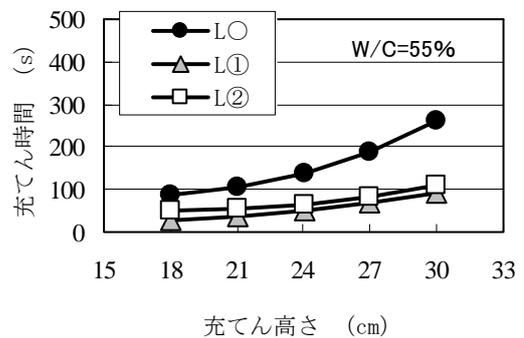


図-11 充てん性に及ぼす微粒分量の影響 (LL)

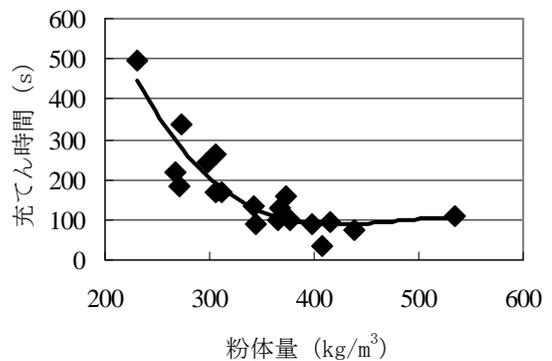


図-12 粉体量と充てん時間との関係

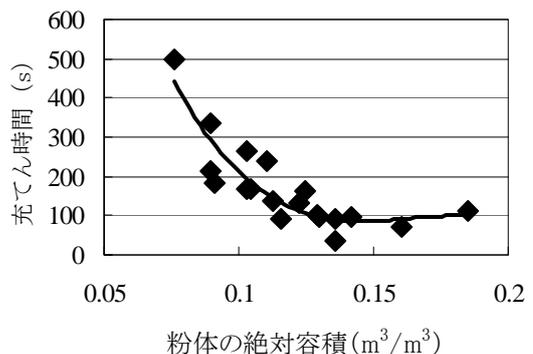


図-13 粉体の絶対容積と充てん時間との関係

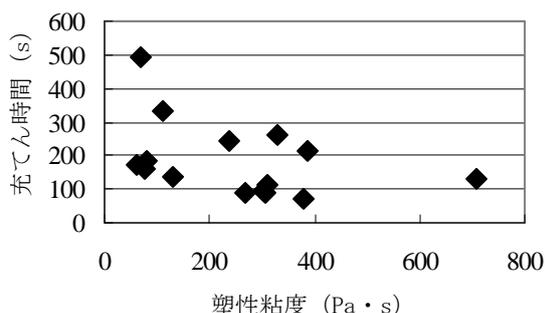


図-14 モルタルの塑性粘度と充てん時間との関係

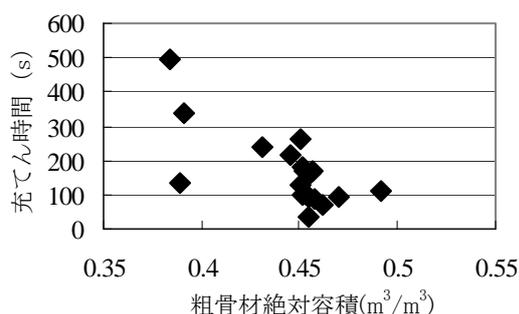


図-15 粗骨材絶対容積と充てん時間との関係

ける充てん時間との関係を検討した。図-14 はそれらの関係を示したものである。

図より、モルタルの塑性粘度が増加すると充てん時間が早くなる傾向にはあるが、粉体量と充てん時間との関係ほど明確な関係は認められなかった。

つぎに、コンクリート中の粗骨材容積が充てん性に及ぼす影響をみるために、コンクリート中の粗骨材絶対容積（石灰石砕石は微粒分量を除く）と充てん高さ 30cm における充てん時間との関係を検討した。その結果を図-15 に示す。コンクリートが間隙を通過する際の粗骨材による架橋も充てん時間を遅らせることとなる。粗骨材絶対容積が大きくなると流動障害部分で骨材の架橋が起こりやすくなり、充てん時間が遅くなると考えられるが、図-15 からわかるように、粗骨材絶対容積と充てん時間との間には明確な関係は見られなかった。また、粗骨材絶対容積 0.4 以上は石灰石骨材を用いた配合であり、粗骨材絶対容積 0.4 未満が粗・細骨材とも普通骨材を用いたものである。これは、石灰石骨材が微粒分を含むため、最適細骨材率が小さくなったためである。粉体が多く含まれた石灰石骨材を用いたコンクリートは普通骨材を用いたコンクリートよりも粗骨材絶対容積が大きくなっていくにもかかわらず充てん時間が遅くなる傾向は見られなかった。このことから、コンクリートを振動で充てんさせる場合には、粉体量や骨材の性質がより重要な要因となっていることがうかがえる。

#### 4. まとめ

本研究は、試作したボックス型加振充てん装置で、微粉末を多く含む石灰石を用いて製造したコンクリートを対象として、使用骨材や配合がコンクリートの充てん性に及ぼす影響を検討した。本研究の範囲内で明らかになったことを以下に示し、まとめとする。

- (1) 単位粉体量が少ない配合で、使用骨材の性質の影響が大きく現れ、通常の砕石、砕砂より、実積率が大きく、粒形のよい石灰石骨材を用いたコンクリートが普通骨材を用いたものより、間隙通過性がよい。
- (2) 本研究で行ったスランプ 8cm、粗骨材最大寸法 20mm の条件では、粉体として、石灰石微粉末による粉体量の増加はコンクリートの充てん性を良好にする。また、単位粉体量が 300 kg/m<sup>3</sup> 以上、粉体の絶対容積が 0.1 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 以上のコンクリートで良好な充てん性が得られる。
- (3) 振動下のモルタルの塑性粘度が増加するとコンクリートの充てん時間が早くなる傾向にはあるが、粉体量と充てん時間との関係ほど明確な関係は認められなかった。
- (4) 粗骨材絶対容積と充てん時間との間には明確な関係は見られなかった。

#### 参考文献

- 1) 大西利勝, 井上正一, 黒田 保: 微粒分が多い石灰石骨材を用いたコンクリートの配合と物性, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.143-148, 2011.7
- 2) 岸上裕哉, 橋本親典, 渡辺 健, 石丸啓輔: タンピング試験による変形性と加振ボックス充てん性試験による間隙通過性の相互関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.1247-1252, 2011.7
- 3) 土木学会: 高流動コンクリートの充てん装置を用いた間げき通過性試験方法(案), コンクリート標準示方書(規準編), pp.195-197, 2007
- 4) 藤原浩巳, 長滝重義, 大即信明, 堂園昭人: 高流動コンクリートの間隙通過性に関する研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.23-32, 1996.11
- 5) 谷川恭雄, 森 博嗣, 黒川善幸: 超流動コンクリートにおける骨材連行性に関するレオロジー的考察, 超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集, pp.79-84, 1993.5
- 6) 枝松良展, 山口昇三, 岡村 甫: モルタルの変形性を表す細骨材特性の定量化, 土木学会論文集, No.538, pp.37-46, 1996.5