

## 論文 加振スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの コンシステンシー評価指標に関する検討

浦野真次\*1・橋本親典\*2・石丸啓輔\*3・水口裕之\*4

**要旨:**コンクリートを任意の振動条件で2次元的に変形・流動させることの可能な試験(加振スランプフロー試験)を用いて,振幅,周波数を種々に変化させて,スランプ4cm~20cm程度のプレーンコンクリートおよびAEコンクリートの50cmフロー到達時間(振動時間)を計測した。実験データを基に,振動条件と変形速度の関係について検討を行った結果,従来のスランプでは評価できなかった同一スランプのコンクリートのコンシステンシーの違いを表現することができることが明らかとなった。

**キーワード:**コンシステンシー, 加振スランプフロー試験, 加速度, 変形速度

### 1. はじめに

フレッシュコンクリートのコンシステンシーの分類は,一般的にそのスランプの値を前提として,硬練りコンクリート,普通コンクリート,高流動コンクリートなどに区別される<sup>1)</sup>。いずれのコンクリートに対しても,性能照査型の施工設計<sup>2)</sup>の構築のためには,コンシステンシーの指標を可能な限り統一的な物理量として,施工性の照査に適用が可能なものとするのが望ましい。スランプは,コンクリートの品質管理用としては適しているが,各種施工条件において打込みや締め固めを行う上で,施工の可否あるいは不具合の発生を判定するために十分な指標とはいえないと考えられる。

このような現状の中,土木学会コンシステンシー評価小委員会では,施工性能照査に適用が可能でかつ可能な限り統一的な指標の構築を目的として,加振スランプ試験によるフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価を提案している<sup>1)</sup>。加振スランプ試験は,バイブレータや型枠振動機によってコンクリートに与えられる加速度を想定し,任意の周波数と振幅を設定することが可能である振動テーブルを用いて,コンクリートが変形・流動する速度を定量的に計測する新しいコンシステンシー評価試験装置

である。ただし,提案された試験装置は,壁型枠やスラブ型枠を一方方向にコンクリートが流動・変形する状況を想定したものであった。しかし,現行のスランプ試験やスランプフロー試験では,コンクリートを二次元的に流動・変形させている。一方方向の流動・変形では,側壁の摩擦の影響を考慮する必要があり,コンクリート自体のコンシステンシー以外の影響要因を十分検討する必要がある。これに対し,振動テーブルを円盤状にした場合には,コンクリートの流動・変形は,側壁の影響を考慮する必要がない。実際の施工状況においても,必ずしも一方方向に卓越した流動・変形が多いとは限らない。スラブ型枠におけるコンクリートの打込みや,大規模なコンクリートの打込みでは,二次元的に流動・変形する。

そこで,本研究では,二次元的な流動・変形を想定して,フレッシュコンクリートに加振した際にスランプフローする状況を再現できる試験装置を試作し,コンシステンシーの測定について検討を行った。本試験装置を用いて,任意の周波数,振幅および加速度の振動を与え,4cm~20cm程度のプレーンコンクリートおよびAEコンクリートの50cmフロー到達振動時間を測定し,振動条件と変形速度の関係について検討を行った。

\*1 清水建設(株)技術研究所 土木研究開発部 工博(正会員)

\*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

\*3 徳島大学技官 工学部建設工学科 (正会員)

\*4 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

## 2. 加振試験装置

本研究で使用した加振スランプフロー試験装置による試験状況を図-1に示し、試験装置の形状・寸法を図-2に示す。本加振装置の特徴は、低振幅、低周波数領域である非常に小さな加速度を任意に発生させることができる点である。従来のテーブルパイプレータでは、低スランプの締固め用として開発されたために、モータの出力関係から高周波数領域しか振動させることができなかった。これに対して、本加振試験装置は、ダンパーによって加速度の大きさを自由に制御することができる。これにより、従来はスランプフローによってコンシステンシーを評価していた高流動コンクリートから、従来はスランプによってコンシステンシーを評価していた有スランプコンクリートのコンシステンシーを、加速度と変形という同じ指標で評価することを目的としている。

なお、本研究で対象とする加速度とは、1つの振動機器が締固めを行う領域のコンクリート全体が平均的に受ける加速度（最大で $9.8 \times 10 \text{m/s}^2$ 程度）を意味し、その振動機器とコンクリートが接する境界付近で発生する局所的な高加速度（ $9.8 \times 10^2 \text{m/s}^2$ 程度）ではない。

## 3. 試験方法

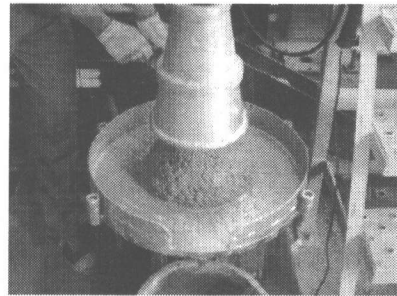
加振スランプフロー試験方法の概要は、以下のとおりである。

(1)コンクリートのスランプ試験方法（JIS A 1101）に準じた3層25回の詰め方で底面 $\phi 20\text{cm}$ ×上面 $\phi 10\text{cm}$ ×高さ30cmのスランプコーンを用いて台形錘にコンクリートを成形する。

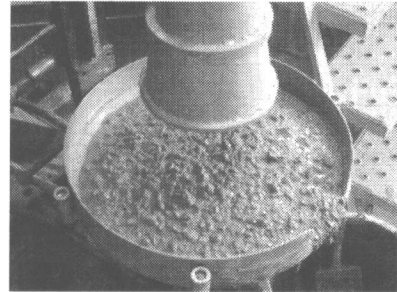
(2)スランプコーンをゆっくりと引き上げると同時に、このコンクリートに一定の振動条件（振幅A、周波数f）で振動を与える。

(3)コンクリートが振動テーブル側面まで流動した時点、すなわち50cmフロー到達振動時間t（秒）を計測する。

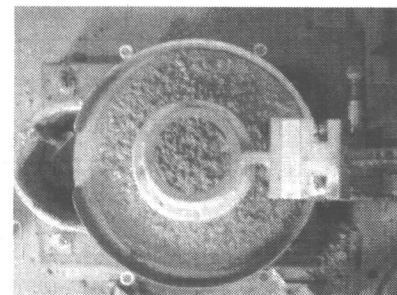
本試験方法は、コンクリートに与える振動が零の時、すなわち無振動の時に自己充てんコンクリートの締固めが行われるということを前提として、この状態を普通コンクリートでも再現することを目的と



流出口正面方向より撮影



正面より撮影した流動・変形状況



真上より撮影した流動・変形状況

図-1 加振スランプフロー試験による試験状況

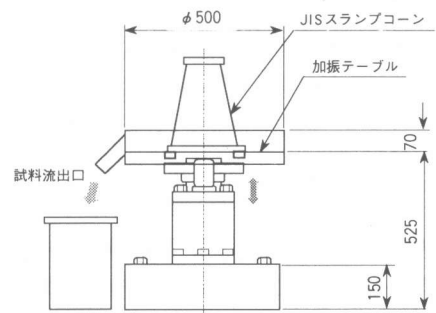


図-2 加振スランプフロー試験装置の形状・寸法

したものである。また、自己充てんコンクリートの変形速度は必ずしも一定ではなく、使用材料や配合によって変形速度は大きく変化する。通常のスラン

表一 1 使用材料

材 料	仕 様
セメント	普通ポルトランドセメント 密度3.15g/cm <sup>3</sup>
細骨材	徳島県那賀川産川砂, 表乾密度: 2.62g/cm <sup>3</sup> , F. M.=2.98
粗骨材	徳島県那賀川産玉碎石, 表乾密度: 2.64g/cm <sup>3</sup> , F. M.=6.67
混和剤	AE減水剤 (リグニン系)

表一 2 プレーンコンクリート(P)およびAEコンクリート(AE)の配合

配合 No.	粗骨材の最大寸法 (mm)	目標スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤 AE減水剤
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
P1	20	12	2	55	46	182	331	834	988	-
P2	20	18	2	55	46	188	342	825	975	-
AE1	20	12	6	55	46	155	281	836	992	C×0.25%
AE2	20	18	6	55	46	166	302	817	963	C×0.25%

プの範囲のコンクリートは、ある振動を与えることによって、流動し締固めが行われ、流動・締固めのし易さはコンクリートのコンシステンシーによって支配される。本試験は、自己充てんコンクリートのような流動性状を実現させるために必要な振動条件を求めるといふ試験と見なすことができる。

#### 4. 実験概要

##### 4.1 使用材料および配合

本振動実験に供したコンクリートの使用材料および配合を、表一1、表一2にそれぞれ示す。コンクリートは、プレーンコンクリートとAEコンクリートとし、それぞれ目標スランプを12および18cmとして合計4種類の配合を用いた。また、数種類のスランプのコンクリートに関して実験を行うため、各4種類のコンクリートを静置し、スランプを低下させた試料についても加振スランプフロー試験を行った。このとき、コンクリート表面からの水分の蒸発を防ぐため、練り板上でシートで覆い所定の時間静置した。

##### 4.2 加振条件

振動条件は、周波数を11~40Hzの間で変化させ、振幅を0.3~2.0mmの間で変化させた。このとき、振動テーブルの加速度は、周波数と振幅の組合せにより、20.0~50.0m/s<sup>2</sup>に変化した。周波数と振幅が流動に与える影響を調べた。なお、振動波形はすべて正弦波で一定であり、最大加速度  $\alpha_{max}$  は、加振テーブルに作用する加速度の最大値とし、加速度はテーブル裏側中心部分に取り付けた加速度計から求めた。加振テーブル上を流動するコンクリート全体が平均的に同じレベルの加速度を受けるために、加振テ

ブルの裏側に補剛桁を取り付け、加振テーブル全体を十分剛性のある構造にした。ただし、流動中のコンクリートに与えた加速度が平均的であっても、必ずしもコンクリート内部で伝達された加速度が平均的であるとは限らない。しかし、流動中のコンクリート内部の加速度を計測することは不可能であるため、本研究では、加振テーブル上の加速度とその上面のコンクリート内部の加速度は一致すると仮定した。

#### 5. 実験結果および考察

##### 5.1 50cm フロー到達時間および振動エネルギー

本研究で対象としたコンクリートは、いずれの振動条件の場合においても、ほぼ円形状にフローし、極端な材料分離は認められなかった。

コンクリートの配合をプレーンコンクリートP2の1種類として、製造直後および所定時間経過後のスランプの低下したコンクリートに対して任意の周波数、振幅および加速度の振動を与えた場合の50cmフロー到達時間(振動時間)を図一3に示す。1種類の配合で一定のスランプのコンクリートに対して振動条件を変化させると、当然のことながら、50cmフロー到達時間は変化することが確認された。

ここで西川ら<sup>3)</sup>と同様に、國府ら<sup>4)</sup>の超硬練りコンクリートのコンシステンシー評価試験で提案された式(1)に示す振動エネルギーによる評価を試みた。

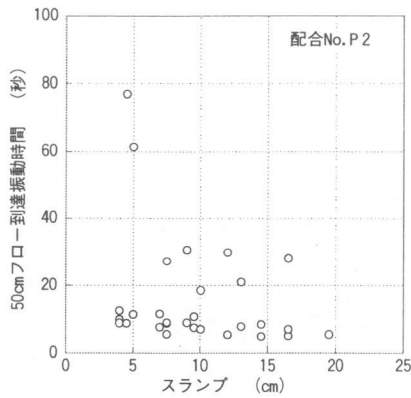
$$E/m=(\alpha_{max})^2/(4\pi f)\times t \quad (\text{J/リットル}) \quad (1)$$

m: 試料の単位容積質量(kg/リットル)

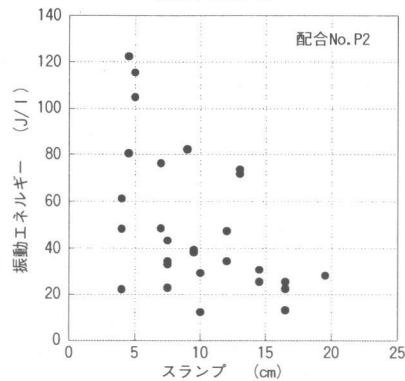
f: 周波数(Hz)

$\alpha_{max}$ : 最大加速度(m/s<sup>2</sup>)

t: 振動時間(s)

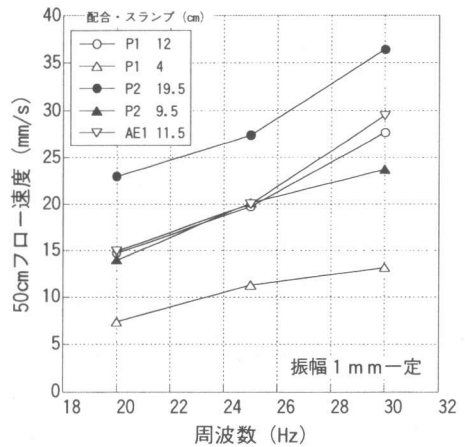


図—3 スランプと50cmフロー到達時間の関係  
(配合No. P2)



図—4 スランプと振動エネルギーの関係  
(配合No. P2)

式(1)により求めた振動エネルギーとスランプの関係を図—4に示す。1種類の配合で一定のスランプ、すなわち一定のコンシステンシーでも、振動エネルギーは一定の値を取らない結果となった。これは、本研究のように加振とともにコンクリートが比較的大きな変形を伴う場合、フレッシュコンクリートはせん断力を受けながら変形しており、この時の変形挙動を支配するコンクリートの粘性が振動条件とともに変化するため<sup>5)</sup>と考えられる。したがって、通常のスランプの範囲のコンクリートを振動させることによって大きく変形させるような場合には、超硬練りコンクリートと挙動が異なるため、式(1)に示す振動エネルギーを適用することは困難であると考えられる。本研究では、このような各種振動条件下でのフレッシュコンクリートのコンシステンシーの非線形性を考慮し、振動条件と変形速度の関係について検討を行うこととした。



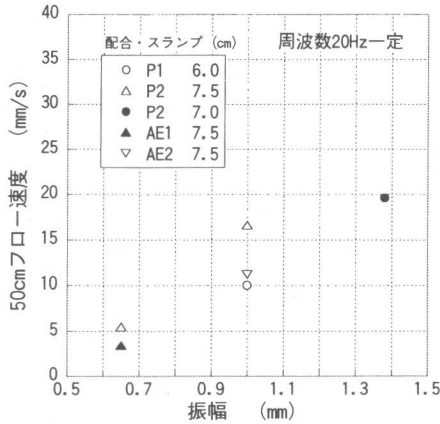
図—5 50cmフロー速度に及ぼす周波数の影響  
(振幅1.0mm一定)

## 5.2 周波数と振幅の影響

スランプが4～19.5cmの各配合のコンクリートに対して、振幅を1.0mmで一定とし周波数を20, 25, 30Hzに変化させた場合の50cmフロー速度を図—5に示す。ここに、50cmフロー速度は、コンクリート先端の移動距離(15cm)を50cmフロー到達時間(振動時間)で除したものであり、振動を受けたコンクリートの流動中の粘性や締め固め易さに関連した変形速度を示す指標である。いずれのスランプのコンクリートにおいても、周波数が大きくなるほど50cmフロー速度は大きくなる。ここで、配合No. P1のスランプ12cmと配合No. AE1のスランプ11.5cmのほぼ同一のものを比較すると、50cmフロー速度はいずれの周波数においても大きな差は認められない。したがって、振幅が一定の場合には、配合が変化してもスランプが一定であれば50cmフロー速度が変化しないと考えられる。

図—6は、スランプが6.0～7.5cmでほぼ一定の各配合のコンクリートに対して、周波数を20Hzで一定とし振幅を0.65, 1.0, 1.38mmに変化させた場合の50cmフロー速度を示す。スランプがほぼ同一であるにも関わらず、振幅が大きくなるほど50cmフロー速度は大きくなった。したがって、振幅が変化した場合には同一のスランプであっても50cmフロー速度が変化することが明らかとなった。

以上のことから、同一スランプあるいは同一配合であっても、50cmフロー速度は、周波数と振幅の両



図—6 50cmフロー速度に及ぼす振幅の影響 (周波数20Hz一定)

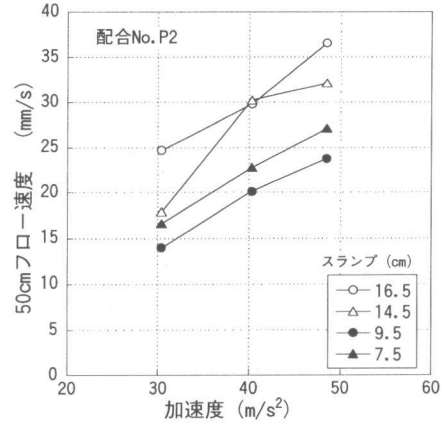
者の影響を受け変化することが分かった。そこで、周波数と振幅の両方の値から決定される加速度と、50cmフロー速度の関係を検討することとした。

### 5.3 加速度と50cmフロー速度の関係

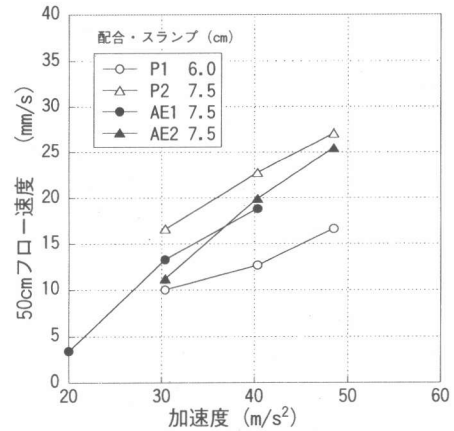
一般に、比較的軟らかいコンクリートの流動性は、ビンガムモデルで仮定され、せん断応力—せん断ひずみ速度関係によって表現される。本研究のように、フレッシュコンクリートに加速度を指標とする振動力を与え、振動を受けたコンクリートの流動中の粘性や締め易さに関連する指標である50cmフロー速度を関連付けて検討することは、せん断応力—せん断ひずみ速度関係を求めることと同様の意義があるものと考えられる。

配合P2における各スランブのコンクリートの場合の加速度と50cmフロー速度の関係を図—7に示す。コンクリートに与える加速度が大きいほど50cmフロー速度は大きくなる。また、各加速度では、スランブが大きいほど50cmフロー速度が大きくなる。同一の配合においては、スランブで表現されたコンクリートのコンシステンシーの大小は、加速度—50cmフロー速度の関係においても概ね変化しないものと考えられる。すなわち、同一配合で経過時間とともにコンクリートのスランブが低下した場合には、振動を受けたコンクリートの流動中の粘性や締め易さも低下するものと考えられる。

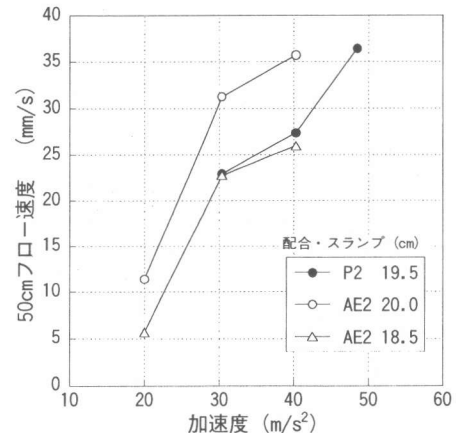
図—8にスランブが6.0~7.5cmではほぼ一定の各配合のコンクリートにおける加速度と50cmフロー速度



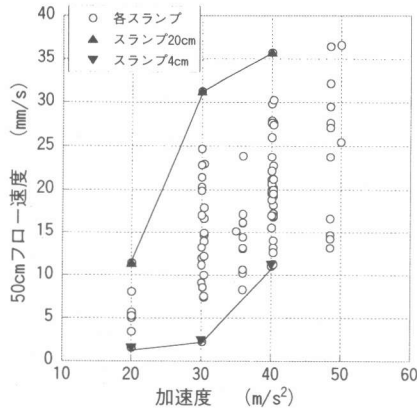
図—7 配合No. P2における加速度と50cmフロー速度の関係



図—8 スランブ7cm程度のコンクリートにおける加速度と50cmフロー速度の関係



図—9 スランブ19cm程度のコンクリートにおける加速度と50cmフロー速度の関係



図—10 各種スランプのコンクリートにおける  
加速度と50cmフロー速度の関係

の関係を示す。コンクリートに与える加速度が大きいほど50cmフロー速度は大きくなる傾向は、いずれの配合においても同様である。しかし、一定の加速度に対しては、スランプがほぼ同一であるにも関わらず、配合によって50cmフロー速度が変化している。これは、スランプがほぼ一定であっても、振動を受けたコンクリートの流動中の粘性や締固め易さが配合によって異なることを示していると考えられる。

図—9は、スランプが18.5～20.0cmではほぼ一定の各配合のコンクリートにおける加速度と50cmフロー速度の関係を示す。比較的大きなスランプの領域においても、加速度—50cmフロー速度の関係を検討することによりそのコンシステンシーの相違を明確にすることが可能となると考えられる。

以上のことから、本研究における加速度—50cmフロー速度の関係でフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価すれば、従来のスランプでは評価できなかった同一スランプのコンクリートのコンシステンシーの違いを表現することができる。

本実験において検討したコンクリートの加速度—50cmフロー速度の関係を図—10に示す。4cm～20cm程度のプレーンコンクリートおよびAEコンクリートの50cmフロー速度は、図に示すような傾向となった。今回対象としたコンクリート以外の配合のコンクリートを用いた場合、加速度—50cmフロー速度の関係にプロットされる範囲はさらに広範囲になると考えられる。今後は、さらに配合の範囲を広げてフレッ

シュコンクリートのコンシステンシーを測定するとともに、加速度と実際の施工の振動条件との関係、50cmフロー速度と実際の型枠内での流動および締固めの程度との関係について検討しなければならない。

## 6. 結論

本研究では、従来のスランプに変わる性能照査型の施工設計を考慮した、新しいフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法として、任意の振動条件で2次的に変形・流動させることの可能な加振スランプフロー試験を用いて、振動条件と変形速度の関係について検討を行った。その結果、加速度—50cmフロー速度の関係でフレッシュコンクリートのコンシステンシーを評価すれば、従来のスランプでは評価できなかった同一スランプのコンクリートのコンシステンシーの違いを表現することができることが明らかとなった。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、加振スランプフロー試験装置の製作に関して、カヤバ工業(株)岐阜南油機工場(現、カヤバエンジニアリングアンドサービス(株)技術顧問)の村田光氏のご協力を受けました。ここに付記し感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会編：フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題，土木学会，コンクリート技術シリーズNo.32, pp.1-40, 2000.7
- 2) コンクリート委員会示方書小委員会幹事会編：コンクリート標準示方書改定に関する中長期ビジョン「材料，施工WG 2.4.4フレッシュコンクリートの品質」，土木学会，コンクリート技術シリーズ，No.32, pp.22-25, 1999.9
- 3) 西川隆之，橋本親典，山地功二，水口裕之：加振装置を用いたフレッシュコンクリートのコンシステンシー評価試験方法の開発，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.2, pp.397-402, 2000.6
- 4) 超硬練りコンクリート研究委員会編：第3章超硬練りコンクリートに関する試験方法，(社)日本コンクリート工学協会，超硬練りコンクリート研究委員会報告書，pp.79-106, 1998.6
- 5) 水口裕之，田中淳一，田中伸幸：振動がフレッシュコンクリートのレオロジー定数に与える影響，セメント・コンクリート論文集，No.46, pp.368-373, 1992.5