

論文 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

西川隆之*1・橋本親典*2・山地功二*3・水口裕之*4

要旨：性能照査型の施工設計の構築を目的として、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(施工速度)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を開発した。本試験装置を用いて、29種類の異なるスランプを有するコンクリートの施工速度を求めた。その結果、従来のスランプ試験に変わる新しいコンシステンシー評価試験方法として、フレッシュコンクリートのコンシステンシーを、加速度・施工速度関係で統一できる可能性を示すことができた。

キーワード：加速度，施工速度，周波数，振幅，加振試験装置

1. はじめに

現在、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代表的な試験方法の1つに、スランプ試験が挙げられる。このスランプ試験は、実施工に用いられるコンクリートの品質管理用としては適しているが、施工性については何ら規定がされていない。つまり、施工現場における型枠内のコンクリートの締固めに対しては、現場の熟練した作業員の経験に頼らざるを得ないのが現状である。

したがって性能照査型の施工設計¹⁾をするには、コンクリートに必要な性能として施工速度²⁾と締固め方法の関係を明確にする必要がある。本研究では、実際、施工現場で所定の型枠にコンクリートを打込み、締固めする際に必要となってくる評価指標として施工速度と加速度に着目することにした。施工速度とは、所定の型枠にコンクリートをどのぐらいの時間で打込むことができるかという、施工能力を示す指標である。一方、加速度とは、所定の型枠に打込まれるコンクリートが充てんするために必要とする締固め能力、すなわち、充てんさせるコンクリ

ートに与える振動力と定義する。想定した型枠内にコンクリートを充てんさせる場合、施工速度を小さくするには、小さな加速度をコンクリートに与える必要がある。一方、施工速度を大きくするには、大きな加速度をコンクリートに与えることにより実現されるが、あまり大きな加速度を与えると、材料分離する。つまり、材料分離しない範囲で、加速度レベルを設定する。

図-1は、本研究で定義する加速度と施工速度の関係を示す概念図である。加速度とは、振動台のコンクリートに与えている外力の代表値であり、せん断応力に関連する物理量である。一方、施工速度は、変形速度の代表値であり、せん断ひずみ速度の積分値に関連する物理量である。一般に、加速度と施工速度は正の相関関

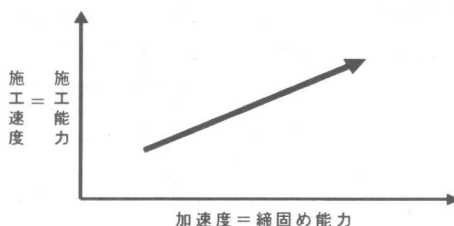


図-1 概念図

*1 (株) 森本組名古屋支店 工修 (正会員)

*2 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 日本興業(株) 開発部 工修 (正会員)

*4 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

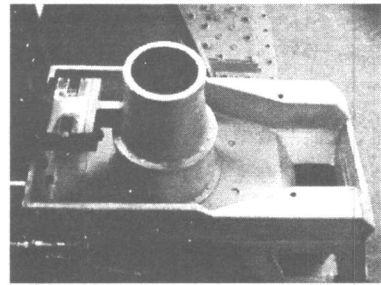
係があると考えられる。この加速度・施工速度関係は、フレッシュコンクリート自体が個別に有する特性である。従来のスランプによる施工設計では、同じ値のスランプを持つコンクリートに与える加速度が一定の場合でも、生じる施工速度が異なるコンクリートが存在していたが、この施工速度の違いは、実際施工するまでは明確にはわからなかった。これに対し、本加速度・施工速度関係を用いれば、あらゆるコンクリートが独自に持つ施工速度、施工能力を表現することができる。図-1の加速度・施工速度関係が求められれば、施工に必要とされる加速度、施工速度を満足するコンクリートのある範囲の自由度で選定することが可能になる。これにより、性能照査型の施工設計が可能になる。

本研究では、振動機器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テーブル上のコンクリートに与え、コンクリートが変形・流動する速度を定量的に評価する試験方法を提案する。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10G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(100G程度)ではない。

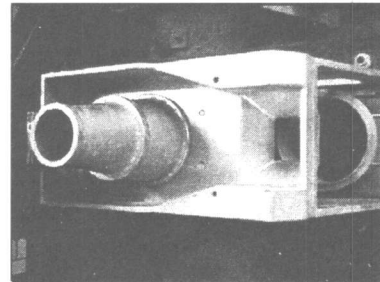
2. 加振試験装置

本研究で開発した加振試験装置を横上面方向と流出正面方向から撮影した外観を図-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プレートでは、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。これによって、スランプフローの領域から、高スランプ、低スランプの領域のコンクリートをすべて加速度と施工速度という指標で評

価することができるようになる。なお、試験台の寸法を図-3に示す。



横上面方向より撮影



流出正面方向より撮影

図-2 試験装置外観

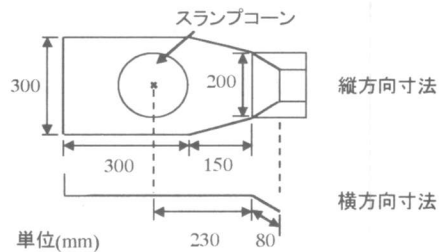


図-3 試験台の寸法

3. 試験方法

加振試験装置を用いた試験方法の概要を、図-4に示す。

- (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φ20cm×上面φ10cm×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, 振動数f)で加速度を与える。
- (3) コンクリートが排出斜面先端まで流動する時点までの流動時間tを計測する。

コンクリートは、振動により強制的に流動・

変形するため必ずしも台形錘底面の外縁部分が最初に排出斜面に達するとは限らない。台形錘底面中心から排出斜面先端までの最短距離31.0cmを流動距離とし、施工速度は、流動距離と流動時間 t から求めた。最大加速度 α_{max} は、試験台に作用する加速度の実効値とした。

本試験方法の原理は、自己充てんコンクリートの流動性能を、コンクリートに与える加速度が零、すなわち振動力を与えずに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いる。通常のコンクリートは、ある加速度を与えることによって、流動し締固めが行われる。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。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加速度を求めるといった試験と見なすことができる。

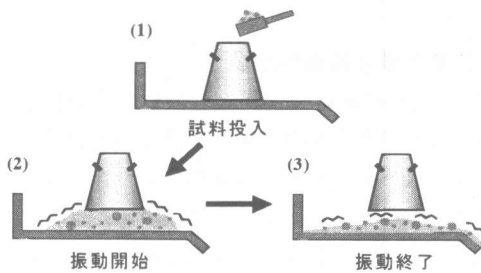


図-4 試験方法の説明図

4. 実験概要

4.1 使用材料および配合

使用材料は普通ポルトランドセメントを用い、フライアッシュは砂の一部に代替使用した。粗骨材は最大寸法が40mmおよび20mmのものを2種類、細骨材は川砂および海砂を一定の割合(7:3)で混合したものをを用いた。なお海砂は、粒度調整用として使用した。また、混和剤には高性能AE減水剤、空気量調整剤を使用した。

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-1、表-2にそれぞれ示す。

表-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 ³
細骨材	川砂：密度 2.63 g/cm ³ ，粗粒率 3.11 海砂：密度 2.58 g/cm ³ ，粗粒率 1.93
粗骨材	最大寸法 40mm，密度 2.63 g/cm ³ 最大寸法 25mm，密度 2.63 g/cm ³
混和材	IV種フライアッシュ：密度 2.17 g/cm ³ ，比表面積 2030cm ² /g
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤および AE 剤

4.2 加振条件

①～⑨の配合では、振動条件を(周波数:20Hz，振幅:1mm，加速度:28.39m/s²)，(周波数:30Hz，振幅:1mm，加速度:44.39m/s²)，(周波数:40Hz，振幅:1mm，加速度:90.84m/s²)の加速度が違う3振動条件とし加速度が流動に与える影響について検討した。さらに④～⑥の配合においては、上記の条件以外の、(周波数:20Hz，振幅:1.95mm，

表-2 配合表

配合番号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 W/C (%)	空気量 (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									
						水		セメント		細骨材		粗骨材		混和剤	
						W (kg)	C (kg)	FA (kg)	砂 (kg)	砂利 25-5 (kg)	砂利 40-20 (kg)	高性能 AE 減水剤 (kg)	AE 剤 (kg)		
①	40	17	66.4	4.5	40.7	154	232	64	695	794	340	1.392	0.121		
②						151	227	123	591	826	354	2.497	0.136		
③						150	225	182	510	838	359	2.925	0.144		
④	25	17	66.5	4.5	40.2	158	264	62	676	1122	0	1.584	0.158		
⑤						160	268	124	598	1117		2.144	0.161		
⑥						163	271	180	508	1130		2.981	0.163		
⑦						165	270	232	421	1149		4.05	0.173		
⑧						167		274	331	1181		3.78	0.173		
⑨						170		310	249	1214		5.4	0.194		

加速度: 44.99m/s^2 , (周波数: 40Hz, 振幅: 0.8mm, 加速度: 44.65m/s^2 , (周波数: 50Hz, 振幅: 0.55mm, 加速度: 44.79m/s^2)の加速度を一定とした3振動条件で実験し, 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る。

また, ①~⑦までの配合ではコンクリートを経時変化させ様々なスランブの時, ⑧~⑨の配合では, 練り混ぜ直後のスランブだけについて上記の振動条件を実施した。

4.3 フレッシュコンクリートの性状

表-3 に今回の実験で用いたフレッシュコンクリートの0, 30, 60分後におけるスランブおよびコンクリート温度, 空気量を示す。ここで配合番号④, ⑤, ⑥の上段は加速度が異なる3振動条件の場合であり, 下段は加速度が一定の場合である。

5. 実験結果および考察

5.1 加速度がコンクリートに与える影響

図-5は振動条件を振幅1mmで一定, 周波数を20Hz, 30Hzおよび40Hzとし, 加速度を変化させた場合の実測スランブと施工速度の関係を示す。

スランブと施工速度には, 正の相関関係が存在する。加速度によって, 概ね3種類の傾きを有する直線群に分類される。20Hz から30Hz,

30Hz から40Hzに増加するに従い, 直線の傾きが増加する。スランブが15cm前後までは, スランブの増加に従い施工速度はいずれの加速度でも増加する。しかし, 18cm以上のスランブでは, いずれの加速度においても施工速度はほぼ一定になる。つまり, 締固め方法から決定される加速度に関係なく, コンクリートの施工速度には, 限界値がある。

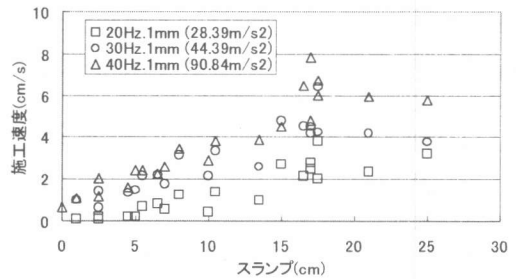


図-5 加速度レベルを変化させた場合のスランブと施工速度の関係

5.2 周波数と振幅の影響

加速度を 45m/s^2 で一定とし振幅と周波数を種々に変化させた場合のスランブと施工速度の関係を, 図-6に示す。若干のばらつきがあるものの, スランブと施工速度の実験値には, 直線の関係が認められる。加速度が同一レベルであれば, 周波数と振幅の大きさに関係なく, 施工速度は概ね同程度となる。

表-3 フレッシュコンクリートの性状

配合番号	0分			30分			60分		
	スランブ(cm)	コンクリート温度(°C)	空気量(%)	スランブ(cm)	コンクリート温度(°C)	空気量(%)	スランブ(cm)	コンクリート温度(°C)	空気量(%)
①	17.5	23.8	3.2	8.0	24.0	3.5	4.5	24.4	2.9
②	15.0	26.5	4.1	5.5	26.8	3.9	1.0	27.0	2.8
③	17.0	26.1	4.1	5.0	26.7	4.0	0.0	28.5	2.6
④	17.0	27.1	4.0	10.5	27.6	4.8	2.5	28.0	4.0
	16.5	27.2	3.9	10.0	27.5	4.5	3.0	27.5	3.5
⑤	17.5	23.0	4.3	7.0	23.5	3.2	—	—	—
	17.5	23.5	4.0	7.5	23.3	3.0	—	—	—
⑥	16.5	25.8	4.9	6.5	26.5	2.4	2.5	27.1	1.7
	16.5	25.5	4.5	6.5	26.0	2.8	2.5	27.0	2.0
⑦	25.0	21.2	4.2	13.5	21.4	4.3	—	—	—
⑧	10.0	21.6	4.5	—	—	—	—	—	—
⑨	21.0	21.0	3.5	—	—	—	—	—	—

一般に加速度は周波数と振幅によって表すことができる。本実験結果は、これを裏付けるものであり、加振装置全体のシステムの妥当性を示すものである。したがって、本試験装置では、締固めに必要な振動力を周波数や振幅別に評価しなくても加速度のみで評価することができる。

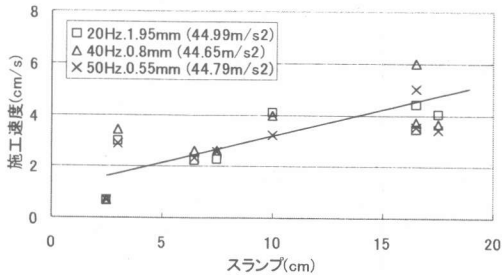


図-6 加速度レベルが一定の場合のスラブと施工速度の関係

5.3 加速度と施工速度の関係

図-7 は、スラブの違いによる加速度と施工速度の関係を示す。どのスラブにおいても加速度レベルが増加するに従い、施工速度が増大する。また、スラブが増加するに従い、施工速度の軸に対してこの直線が上昇する。

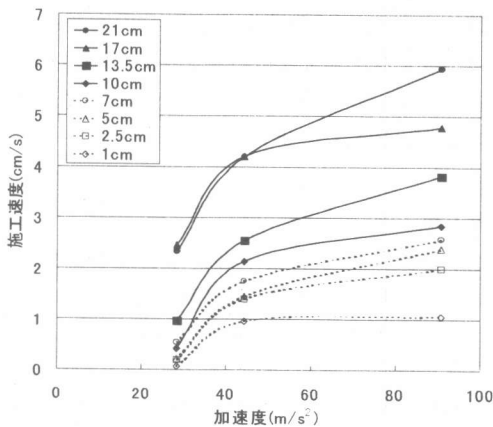


図-7 スラブの大きさの違いによる加速度と施工速度の関係

図-8 は、低スラブコンクリートと高スラブコンクリートの加速度と施工速度の関係を示す。スラブ 6.5cm 以下のコンクリートを低スラブコンクリート、スラブ 16.5cm 以上のコンクリートを高スラブコンクリートとする。

低スラブコンクリートの場合、曲線の傾きは小さい、つまり低スラブのコンクリートを施工に用いる場合、コンクリートを締固めるのに必要な加速度を変化させても施工速度にはあまり影響がない。一方、高スラブコンクリートの場合、曲線の傾きは大きい。高スラブのコンクリートを施工する場合、コンクリートを締固めする際に必要な加速度によって施工速度は大きく変化する。したがって、あまり大きな加速度をコンクリートに与えて締固めを行うと、コンクリート自体が材料分離を起こす可能性も考えられ、高スラブでは慎重な加速度の設定が必要となってくる。本振動実験においても、加速度 90m/s^2 では、低スラブコンクリートは材料分離を生じていないが、高スラブの場合は、材料分離が目視観察された。

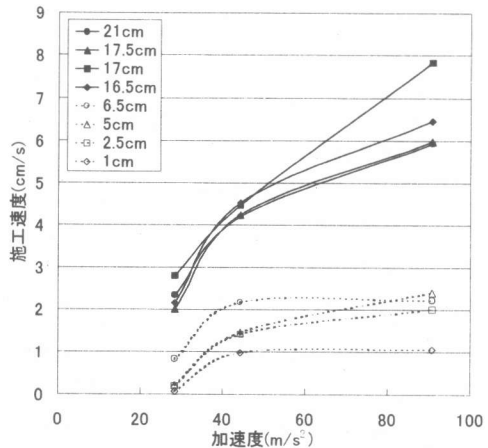


図-8 低スラブコンクリートと高スラブコンクリートの加速度と施工速度の関係

図-9 は、スラブ 3cm、10cm および 17cm の 3 種類の同一スラブにおける加速度と施工速度の関係を示す。どの同一スラブの場合でも加速度・施工速度関係は異なる。特にスラブが 17cm の場合はこの傾向が著しい。本加速度・施工速度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、従来のスラブでは評価することができなかった、同一スラブのコンクリートのコンシステンシーの違いを明確に表現することができる。

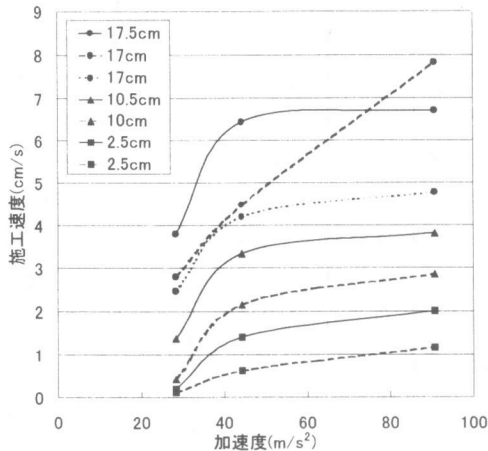


図-9 同一スラブの場合の
加速度と施工速度の関係

5.4 振動エネルギーによる評価

國府ら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振動エネルギーの式(1)により、評価を試みた³⁾。

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

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^2)

t: 振動時間(s)

図-10 はスラブと振動エネルギーの関係を示す。國府らの研究では同一コンシステンシーを有するコンクリートを変形させるに要する振動エネルギーは一定であるとされているが、本研究では同じスラブを持つコンクリートでも与える加速度が異なれば、振動エネルギーは一定の値を取っていないことが明らかになった。今回実験で用いた通常の有スラブコンクリートは、國府らが用いたコンクリート表面以外大きく変化しない超硬練りコンクリートとは異なり、振動することによって流動・変形していくため振動のモードが大きく異なる。このため、超硬練りコンクリートのコンシステンシー評価試験で國府らが提案された振動エネルギーの式をそのまま、通常の有スラブコンクリートの振動エネルギー式として用いることは困難であると考えられる。

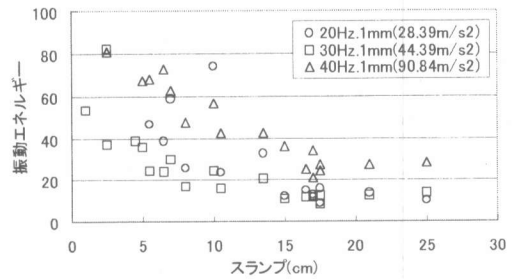


図-10 スラブと振動エネルギーの関係

6. 結論

本研究では、従来のスラブ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、加速度・施工速度関係を用いた。

その結果、加速度・施工速度関係を用いれば従来のスラブでは評価できない同一スラブのコンクリートのコンシステンシーの違いを明確に表現できる。スラブによるコンシステンシー評価試験にかわり、本加速度・施工速度関係を求めることができれば、施工設計に必要な情報を提供することができる。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金の基盤研究(B)(2)(課題番号：10555149，研究代表：橋本親典)に基づき実施されたものであることを付記いたします。

参考文献

- 1) 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
- 2) 山口悟，橋本親典，水口裕之，高島信博：鉄筋近傍を流れるフレッシュコンクリートの流動解析に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, 2000.6(投稿中)
- 3) 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