

論文 棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリートの振動締固めにおける挙動とその評価

岡本 寛昭*1・鈴木 立人*2

要旨: 棒状バイブレータを用いたフレッシュコンクリートの振動締固め問題に、バイブレータの原動機に現れる負荷トルクを測定して、その挙動や性質を明らかにする手法について述べている。フレッシュコンクリートの負荷トルク特性に関する力学的概念、実験による振動締固め挙動の把握とその評価、および本手法の応用例について基礎的検討を行っている。本手法によって振動締固めの挙動を追跡することができるとともに、コンシステンシー評価や締固め作業における施工管理に適用できることを示している。

キーワード: フレッシュコンクリート, 負荷トルク, 仕事率, コンシステンシー, 施工

1. 序文

最近、社会的問題を惹起しているコンクリート構造物の劣化は、施工段階におけるコンクリートの締固め作業の適否に深い関わりがあると指摘されている。締固め作業を適切に行うことがいかに重要であるかは論を待たない。通常、コンクリートの締固めには、内部棒状バイブレータを使用することが原則である^{1),2)}。しかし、施工上、必要となるバイブレータの性能と振動締固めレベルの関係は、現在、十分な解明が進んでいない³⁾。

内部棒状バイブレータは、機械力学的に見ると、回転機械であり、その性能を左右するのは負荷トルク×角速度の出力特性である。この観点から、フレッシュコンクリートの振動締固め問題は、バイブレータの回転運動量によって評価することができると考えられる。すなわち、振動締固めをバイブレータの原動機に生じる負荷トルクによって追求する手法である。

本研究は、内部棒状バイブレータによるフレッシュコンクリートの振動締固め挙動をバイブレータの負荷トルク特性によって評価する目的で、次の項目について基礎的な検討を行った。

- (1) バイブレータの負荷トルク特性に関する力学的基本概念の把握
- (2) 負荷トルク特性から振動締固め挙動の評価
- (3) 負荷トルク特性のコンシステンシー評価および施工管理への適用

2. 内部バイブレータの構造

内部棒状バイブレータは、偏心重錘を回転軸を中心に回転させることによって発生する遠心力により振動を作り出す回転機械である。原動機の種類別に電動型、油圧型および圧縮空気型がある。電動型原動機を上部に装備したバイブレータの内部構造を Fig.1 に示す。振動波は、振動体に垂直な面内で同心円状に伝播すると考えられる。

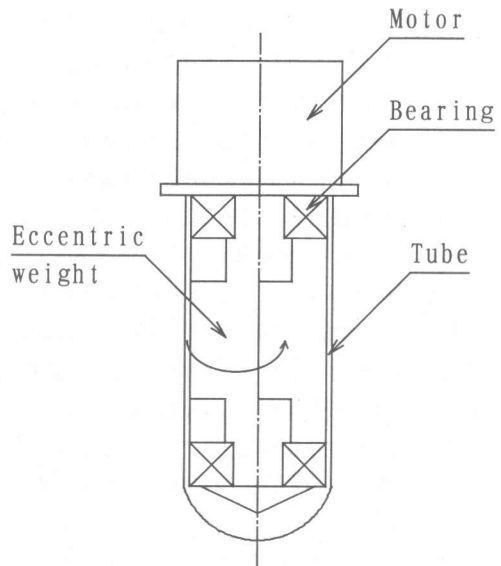


Fig.1 Structure of internal vibrator

*1 舞鶴工業高等専門学校教授 建設システム工学科 工博 (正会員)

*2 舞鶴工業高等専門学校助手 機械工学科 工修

パイプレータの性能は、原動機のトルク-角速度の関係、すなわち出力特性曲線によって決められる。Fig.2 に原動機の出力特性曲線を示す。AC 電源モータの場合には曲線変化を呈し、DC 電源モータの場合には直線変化を示す特性がある。一般に、出力トルクが角速度に対して単調に減少する範囲で使用される。

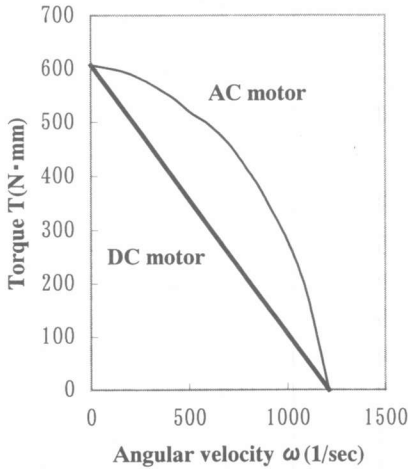


Fig.2 Power characteristics curves of motor

3. 負荷トルク特性に関する力学的基本概念

フレッシュコンクリートの締固めに内部棒状パイプレータを用いる際の力学的な基本概念について述べる。一般論としてフレッシュコンクリートに対する負荷トルクと角速度の関係は、Fig.3 に示すようなビンガム流動体であることが知られている。

Fig.2 で示される原動機の出力特性と Fig.3 で示されるフレッシュコンクリートの負荷トルクを重ね書きすると Fig.4 が得られる。両者の交点 Q は、原動機からパイプレータへ動力伝達される T_Q とそれに対応する角速度 ω_Q を決定する。これは、原動機の出力特性曲線に対して、フレッシュコンクリートを締固める時の消費動力が存在することを示している。

パイプレータを回転運動として捉えると、その振動によってコンクリートに与えられる仕事率は、式(1)に示すとおり負荷トルクと角速度の積で表される。

$$W = T_r \cdot \omega_r \quad (1)$$

ここに、 W : コンクリートに与えられる仕事率 ($N \cdot mm/s$)、 T_r : パイプレータの負荷トルク ($N \cdot mm$)、 ω_r : 負荷トルク T_r における角速度 ($1/s$)

次に、コンクリートに与えられる総エネルギーは、式(1)の仕事率を時間で積分することによって得られる。すなわち、次式で求められる。

$$E = \int_{t_0}^{t_1} W dt \quad (2)$$

ここに、 E : コンクリートに与えられる総エネルギー ($N \cdot mm$)、 t : 時間 (s)、 t_0 : 振動開始時間 (s)、 t_1 : 振動終了時間 (s)

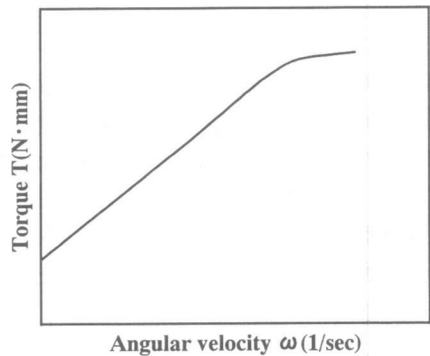


Fig.3 Vibration characteristics of fresh concrete

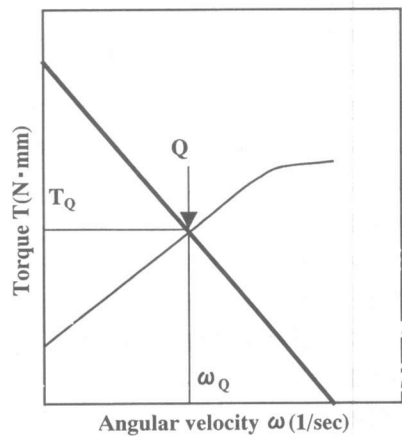


Fig.4 Load torque of vibrator

4. フレッシュコンクリートの負荷トルク

4.1 実験装置および実験方法

内部棒状パイプレータを用いてフレッシュコンクリートの振動締め中における負荷トルクを測定する実験装置を Fig.5 および Fig.6 に示す。

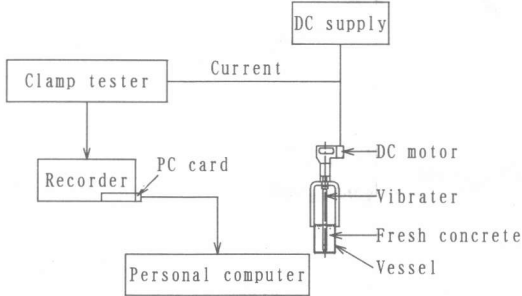


Fig.5 Apparatus of compaction test by vibrator

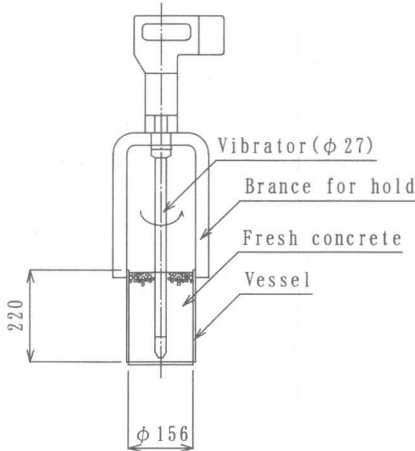
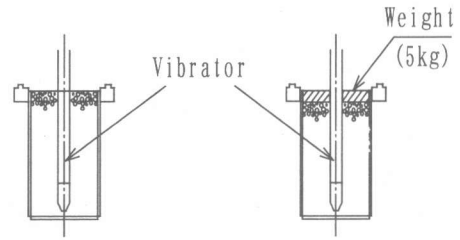


Fig.6 Vibrator and vessel

パイプレータは Fig.2 に示す出力特性曲線を有する DC モータを原動機にし、振動体が直径 27mm、長さ 461mm のものを用いた。境界条件を一定にするため、直径 156mm、高さ 220mm の容器にコンクリートを投入した。初期条件を一定にするため、3層に分け各層を 25 回棒突きした。測定方法は、空中でパイプレータを起動させ、次に容器中のコンクリートに振動させながら挿入し、負荷トルクの時刻歴変化を測定した。本実験では、重りによる締め効果の影響を調べるため、容器中の試料上面に置いた重り(5kg)の有無について実験を行った。Fig.7 にその様式を示す。実験では負荷トルクを 200ms ステップで自動計測し、パソコン



(a) with no weight (b) with weight

Fig.7 Weight on fresh concrete

コンでデータ処理を行った。本実験に用いたコンクリートの配合は、Table1 に示すとおりであり、そのコンシステンシーはスランプ 0.5cm、2.0cm、3.5cm および 8.5cm の比較的硬練りのコンクリートである。AE 減水剤を使用し標準空気量は 4% である。練り上がり温度は 15~20℃ である。

Table 1 Mix proportion used in this experiment

W/C(%)	s/a(%)	W(kg)	Slump(cm)
46	41	148	0.5
46	42	153	2.0
46	42	160	3.5
60	49	169	8.5

4.2 負荷トルク特性

スランプ 2.0cm について、負荷トルクの時刻歴変化を Fig.8 に示す。

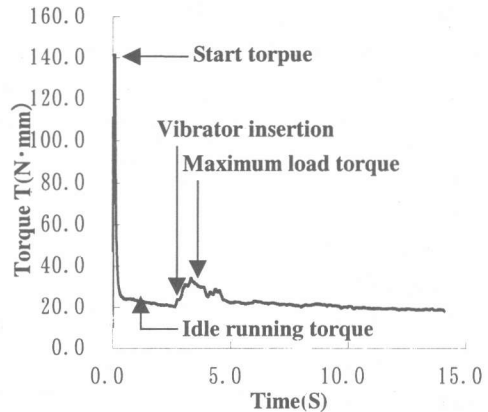


Fig.8 Time-history of load torque for slump 2.0cm

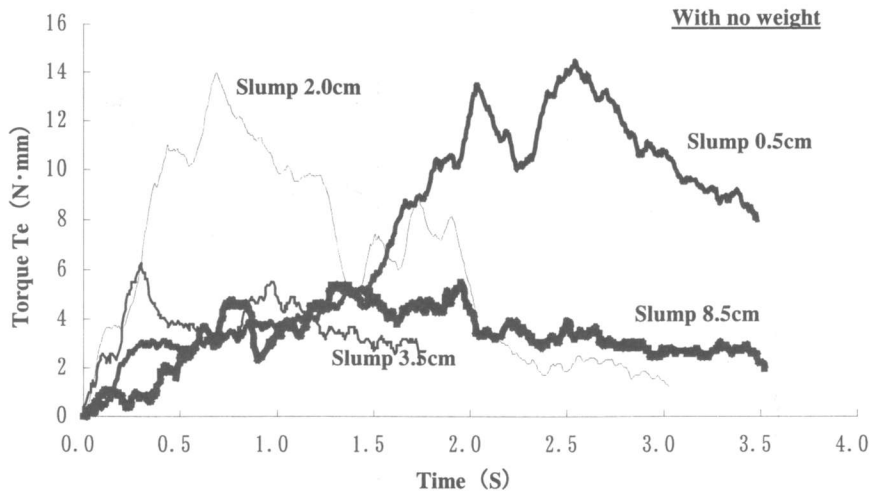


Fig.9 Effective torque

まず起動時に大きなトルクが発生後、急激に低下し、空転時トルクを得る。起動トルクは、装置上発生するトルクである。次に、パイプレータをコンクリート中に挿入後のトルクについて述べる。最大負荷トルクが生じた後、徐々にトルクの漸減を示した。最大トルク付近で、コンクリート上面の沈下が観測された。ここでは骨材の再配列が起きているものと思われる。トルク漸減域で脱泡現象が見られた。最終的には、負荷トルクは、空転時トルクに近接すると考えられる。スランプ 0.5cm, 2.0cm, 3.5cm および 8.5cm の場合についても同様の傾向が見られた。

Fig.9 にスランプ 0.5cm, 2.0cm, 3.5cm および 8.5cm の実験結果を有効負荷トルクで表す。有効負荷トルクとは、負荷トルクから空転時トルクを差し引いた値である。硬練りになるほど有効負荷トルクが大きくなり、かつ曲線の形状が険しくなる傾向を示した。

4.3 挙動把握

本実験の観察結果からパイプレータによる振動締固めにおける挙動について考察すると、Fig.10 に示す模式図が得られる。締固め過程は2段階に分けられると考えられる。第1段階では、セメントペーストが液状化し骨材粒子の配列移動が行われ、水平状に置かれた骨材粒子は垂直状

に変わろうとし、最大負荷トルクが生じる。ここではコンクリートとパイプレータが密着した状態となり、パイプレータへの負荷が最大となる。これが初期沈下の段階である。第2段階では、コンクリート中の気泡（主にエントラップドエア）が上方に移動し脱泡が起こる。パイプレータの近傍には液状化したセメントペースト層が形成され、材料分離を起こす。ここでは、コンクリートとパイプレータの密着度が減少する。これにより振動波の伝達が落ち負荷トルクの低下を招くと考えられる。ここで、表面の沈下が収まり安定となり、空転時トルクに近づく。この段階を長く持続すると材料分離が生じる。

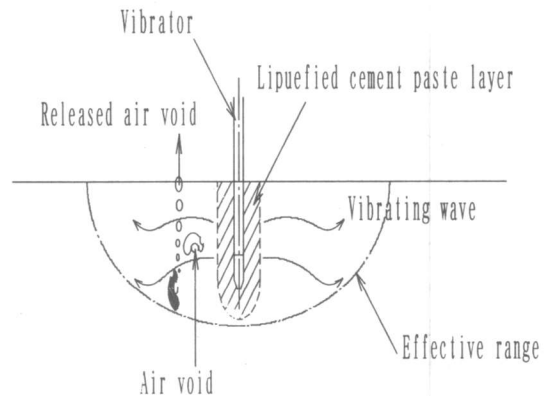


Fig.10 Aspect of fresh concrete under vibration

5. 応用例

5.1 コンシステンシー評価への適用

コンクリートのコンシステンシーの評価は、一般に、内外を問わずスランプ試験によって行われている。スランプ試験は簡便な試験であるがその物理的意味が不明確であると指摘されている。一方、硬練りコンクリートのコンシステンシー評価法として振動台式コンシステンシー試験が規定されているが、試験装置が大型で操作方法が簡便でない。これまで多くの新しいコンシステンシーの評価法が提案されてきたが^{4),5)}、しかし、これらは測定装置や手順が複雑で現場への適用が難しいものが多いといわれている。

そこで、フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価へ本手法の適用を試みる。本実験で得られた有効負荷トルクのピーク値を求め、これと既存の代表的なコンシステンシー評価法であるスランプとの関係を図示したものが、Fig.11 である。

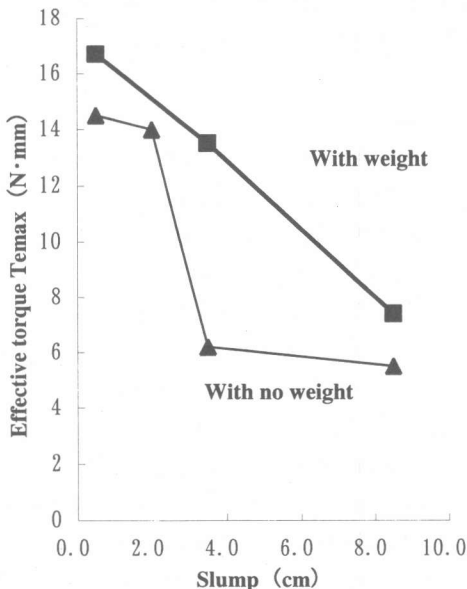


Fig.11 Relationship between effective torque and slump

これより、スランプが小さいほど有効負荷トルクは大きくなり、また、重りありの方は有効負荷トルクが大きくなる結果を得た。これは、重りの存在によって振動力が高まることを示している。また、スランプとの相関は強いことが明らかとなっ

た。

Fig.12 は、式(1)より求めた仕事率とスランプの関係を表す。この図より、スランプと仕事率は、重りなしおよび重りありともに、スランプが小さくなるほど仕事率が直線的に大きくなる結果を示した。

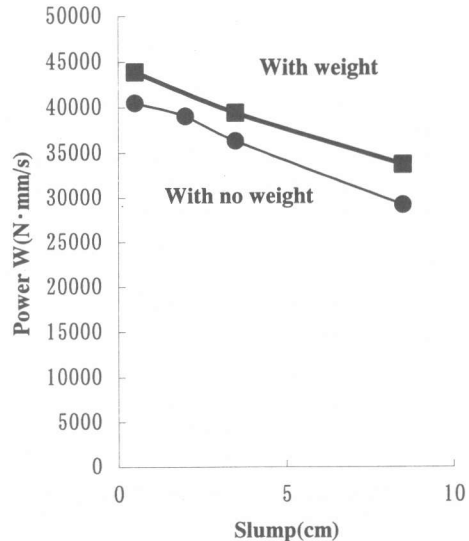


Fig.12 Relationship between power and slump

ここではスランプ 0.5cm~8.5cm の範囲で、本手法を用いたコンシステンシーの評価について検討した。その結果、負荷トルクにより硬練りコンクリートのコンシステンシーを評価できる可能性があることを示した。今後、材料、配合、試験条件などの影響についてさらに究明する必要がある。

5.2 施工管理への応用

コンクリートの振動締固め作業の管理は、作業員の目視に委ねられているのが現状であり、今後の建設雇用状況を考慮すると、適切な振動締固め状態を実現することは難しい。

ここではこれを改善するために、本研究で着目したパイプレータの負荷トルク測定を実際の施工管理に応用できるシステムを提案する。これは、振動締固め度を負荷トルクを観測することによって客観的にモニタリングする方法である。こゝで提案したモニタリングシステムを Fig.13 に示す。

観測された負荷トルクが推奨値に達すると締固め作業を完了するシステムである。

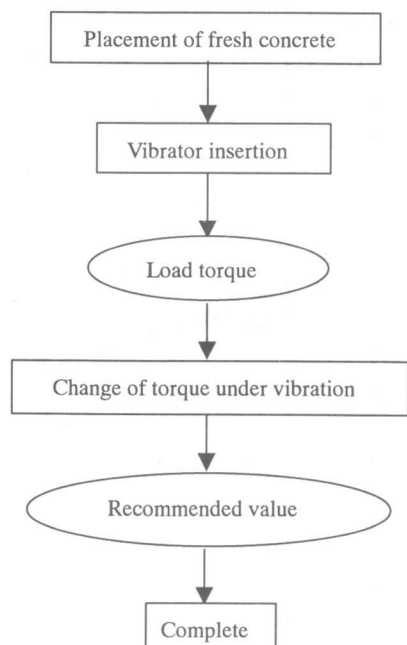


Fig.13 Monitoring system on compaction by vibrator

6. 結論

本研究は、内部棒状バイブレータによるフレッシュコンクリートの振動締固め挙動をバイブレータの負荷トルク特性によって評価する目的で行ったが、次の結論が得られた。

- (1) 負荷トルクの経時変化については、バイブレータをコンクリートに挿入直後に最大負荷トルクが発生し、その後の振動の継続とともに漸減する様相を示した。最大負荷トルクから空転時トルクを差し引いた有効負荷トルクによって評価すると、硬練りほどその値が大きく、曲線の形状が険しくなる傾向を示した。容器中のフレッシュコンクリート上に載せた重りは、振動力を高める効果が認められた。
- (2) バイブレータによる締固め挙動の観察において、セメントペーストの液状化と骨材粒子の配列移動が行われる第1段階と、脱泡現象と

バイブレータ付近のセメントペーストの液状化形成を呈する第2段階があることを確認した。

- (3) フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価へ本手法の適用を検討した結果、コンシステンシーをバイブレータの最大負荷トルクによって表せる可能性があることを示した。最大負荷トルクとスランプは、良好な相関関係があることが判明した。
- (4) 本研究で着目したバイブレータの負荷トルクを施工現場でモニタリングする方法によって適切な振動締固め度を把握できるモニタリングシステムを提案した。

なお、本研究は、フレッシュコンクリートの振動締固め過程で生じるバイブレータの負荷トルク特性に関する基礎的な検討を行ったが、今後実用化に向けた諸課題に取り組む予定である。

謝辞：本研究の実施にあたりエクセン（株）の協力を受けた。実験には本校学生 酒井章君の協力を得た。ここに、記して謝意を表します。

参考文献：

- 1) 土木学会：平成 8 年制定コンクリート標準示方書[施工編]，pp.91-93，1996.3
- 2) 日本建築学会：建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5，pp.248-249，1997.1
- 3) 村田二郎：コンクリート振動機の知識，コンクリート工学，Vol.33，No.8，pp.26-34，1995.8
- 4) 例えば，F. de Larrard T., Sedran C., Hu C., Sziitkar J.C., Joly M. and Derkx F. : Evolution of the Workability of Superplasticised Concrete: Assessment with the BTRHEOM. Rheometer, Production Methods and Workability of Concrete, Proceedings of the International RILEM Conference, pp.377-388, 1996.
- 5) 坂本淳：高スランプのコンクリートを対象としたコンシステンシー評価方法の現状，コンクリート工学，Vol.37，No.12，pp.38-41，1999.