

コンクリートの締固めに適した内部振動機の開発

近松 竜一 橋木 淳一
(大阪本店土木工部部)

Development of Inner Vibrator for Compacting Concrete

Ryuichi Chikamatsu Junichi Hashiki

Abstract

The authors developed a small, light inner vibrator having a rough spiral protrusion on the vibrator body; this tool can be used to compact concrete efficiently in parts where a high density of concrete is required. The performance of this vibrator and the effects of its use were verified experimentally. The acceleration of the developed inner vibrator was found to be greater than that of currently available vibrators, and the transmission of vibrations to concrete can be controlled by switching the direction in which an eccentric weight is rotated

概要

鉄筋が高密度に配置された狭あいな部位においても、コンクリートを効率的に締め固めできる施工性に優れた内部振動機として、振動体の側面に螺旋状の凹凸を設けた、小型で軽量の内部振動機を試作し、その性能および使用効果について実験的に検証した。その結果、振動体の外径が同一で、螺旋状の凹凸が無い標準品より振動体の加速度が大きいこと、振動体内部の偏芯重錘の回転方向を切り替えることでコンクリートへの振動伝播の指向性を制御できる可能性があることを明らかにした。

1. はじめに

最近のコンクリート構造物は、狭あいな断面内に鉄筋などの鋼材が高密度で配置され、コンクリートの打込みや締固めが難しい事例が増えている。特に、埋設物が多い部材や部材間の接合部では、コンクリートを密実に充てんするのが難しく、充てん不良やコールドジョイントなどの初期欠陥が生じやすい傾向にある。

狭あいな空間に、多数の鋼材が交錯して配置された部位では、所定の箇所にコンクリートを打ち込むことさえ困難な場合も多い。また、内部振動機を使用して十分な締固めを行うには、格子状の鉄筋が障害となり、内部振動機を細部にわたり深く挿入できない場合も多い。さらに、内部振動機が鉄筋の間に挟まって抜けなくなったり、力づくで引き抜いて配筋を乱したり、型枠を傷めるなどのトラブルの発生も懸念される。

コンクリートの充てんを確保する対策としては、1) 組み立てた鉄筋の一部を一旦外して、打込みや締固めに必要なスペースを確保し、作業終了後に再び組み立てる、2) 狭い間隙に一定の傾斜角で挿入できる槍状の内部振動機、型枠用振動機などを用いて締固め時の作業性を改善する、3) 流動化剤によりコンクリートの流動性を高めたり、自己充填性を有する高流動コンクリートを使用する、などの方法が挙げられる。いずれの方法も実効性があり有用な対策であるが、実際には施工条件の制約により採用が難しい場合も多い。また、対策によっては、施工効率が低下する場合もある。コンクリートをより合理的に確実に充てんできる技術が求められている。

2. 締固め作業における課題

一般的なコンクリート工事において、コンクリートの締固めに際しては内部振動機が用いられている。内部振動機を用いて型枠内に打ち込まれたコンクリートを広範囲にゆきわたらせ、液状化させて余分な気泡を追い出し、密実に充てんすることができる¹⁾。

一般には、内部振動機として、棒状体の外径がφ30mmからφ60mmの範囲の製品が用いられている。内部振動機は、振動体大きいものほど振動エネルギーが大きく、コンクリートの締固め能力も大きい。しかし、大型の内部振動機は、その重量も大きいため、内部振動機を引き回すのに労力が必要となる。

特に、形状が複雑で狭あいな部材では、内部振動機を挿入し引き上げる作業を繰り返すため、長時間作業するには難がある。また、振動体が大きいほど鉄筋の間隙や埋設物に挟まりやすく、トラブルのリスクが高い。

これに対して、小型の内部振動機は、重量も軽く操作性に優れている。高密度に配筋された接合部など、鉄筋のあきが小さい箇所にも挿入できる。しかし、大型の内部振動機に比べると振動エネルギーが小さいため、締固め作業の効率が低下する傾向にある。

そこで、鉄筋が高密度に配置された狭あいな部位においても、コンクリートを効率良く締め固めることが可能な施工性に優れた内部振動機として、振動体の外面に螺旋状の凹凸を設け、回転方向を制御できる内部振動機(以下、スパイラル型内部振動機と呼称)を試作し、その振動特性に関して実験的に検証した。

Table 1 内部振動機の諸元
Parameter of Inner Vibraters

内部振動機の種類	振動体		重錘の 偏心距離 (mm)	偏心重錘 の質量 (g)	重錘を除いた 振動機の質量 (g)	無負荷 振動数 (HZ)
	直径 (mm)	長さ (mm)				
Φ40mm(標準)	43	340	8.0	121	2519	230
Φ40mm(スパイラル)	43	340	8.0	121	2399	230
Φ50mm(標準)	52	390	9.4	192	4357	230

本論文では、このスパイラル型内部振動機の概要、内部振動機の振動特性、ならびにスラブおよび壁モデルによるコンクリートの締固め実験結果を示し、振動体の外面に螺旋状の凹凸を設けた場合の効果について考察を加えた。

3. スパイラル型内部振動機の概要

高密度に配筋された狭あいな部位において、コンクリートの締固めを確実にを行うために、内部振動機に求められる要件として、以下の諸点が挙げられる。

- 1) 狭あいな箇所にも容易に挿入できる。
- 2) 振動エネルギーが大きく、締固め能力が大きい。
- 3) 鉄筋の間に挟まって引き抜けなくなったり、配筋を乱すなどのトラブルの可能性が小さい。

これらの要件を満たすことを前提として、施工性に優れたスパイラル型内部振動機を製作した。この内部振動機の概観をPhoto 1に、その諸元を標準型の内部振動機と併せてTable 1にそれぞれ示す。スパイラル型内部振動機の特徴について以下に示す。

(1) 小型で軽量である 狭いスペースへの抜き差しや締固め作業の労力を軽減するにはできるだけ細径のものが、逆に締固め能力を考慮すると作業に支障がない範囲で太径のものが望ましい。そこで、試作機は振動体の直径をφ40mmに設定した。このサイズは建築工事では一般的に用いられており、φ50mm(土木工事での汎用品)より細径であるが、軽量のため長時間継続して作業することができ、作業効率の向上にも効果があると考えられる。

(2) 振動体の外面に螺旋状の凹凸を有している 従来の内部振動機は、一般に振動体の側面が平滑である。一部には、内部振動機の振動エネルギーが効率良くコンクリートに伝達されるよう、振動体の先端にヒレ状の切込みを入れた形状にした製品がある。そこで、試作品では、振動エネルギーをより効率的に伝達されることを意図して、振動体の外側面に螺旋状の凹凸を設けた。

振動体の表面に凹凸を設けることでコンクリートとの接触面積が増加し、物理的な噛合いも加わることで振動機とコンクリート間の振動伝達のロスを低減する効果が期待できる。



Photo 1 スパイラル型内部振動機の概観
Spiral Inner Vibrater



Photo 2 内部振動機の振動体内部の構造
Internal Structure of Vibration body

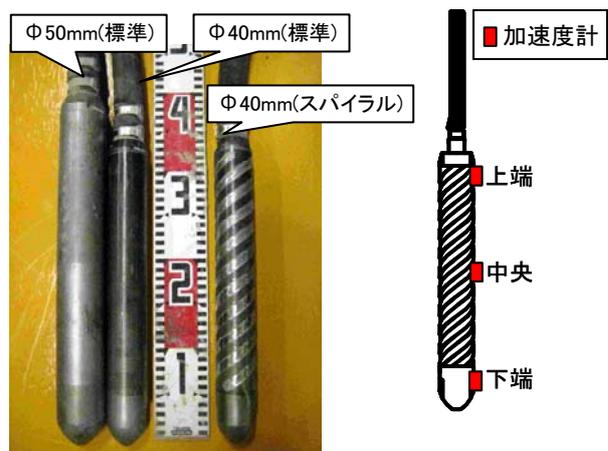


Photo 3 実験に用いた内部振動機と加速度計設置箇所
Inner Vibraters Used by Experiment and
Accelerometer installation place

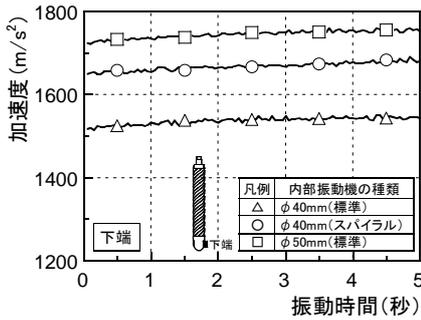


Fig. 1 無負荷時の加速度 (下端部)
Acceleration at No Load (Bottom Part)

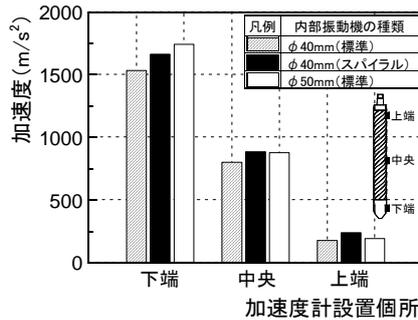


Fig. 2 無負荷時の振動体部位毎の加速度
Acceleration of Each Part at No Load

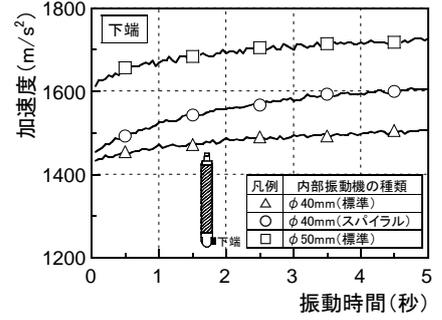


Fig. 3 細骨材中に挿入した場合の加速度 (下端部)
Acceleration When Inserting It
in Fine Aggregate (Bottom Part)

(3) 振動体の回転方向を切り替えることができる内部振動機はPhoto 2に示すように、モータ（三相誘導電動機）が内蔵されているため、モータの相と電源の相の組合せを変えることにより回転方向が変わる。そこで、凹凸の形状を螺旋とし、その回転方向を制御すれば、いわゆる“ねじ”のように回転作用に伴う指向性を付与する効果が期待できる。螺旋を右回りに設けた場合、振動体を右方向に回転（以下、これを正転と呼称する）させれば振動機を挿入しやすく、左回転（以下、逆転と呼称する）では振動機を引き抜きやすくなる。

また、内部振動機を引き抜く場合、螺旋形状による振動体周辺のコンクリートの動きが下方から上方へ気泡を排出する方向と一致する。さらに、内部振動機が鉄筋の間に挟まった場合に、ねじを緩めるのと同じ原理で引き抜きやすくなる効果も考えられる。

4. スパイラル型内部振動機の振動特性

4.1 実験概要

試作したスパイラル型内部振動機を無負荷時（空中）および細骨材中に挿入した場合について、振動体の加速度を測定した。実験には、Table 1に示す3種類の内部振動機を使用した。内部振動機をPhoto 3に示す。加速度計は、Photo 3に示すように、振動体の下端、中央、上端の3箇所にした。振動体とホース長の合計が一定（50cm）の位置で内部振動機を固定し、空中および一定の密度で充てんされた細骨材中に挿入した状態で振動させた。

細骨材を用いた振動実験には、直径φ51cm、高さ47cmの鋼製容器（容量約100L）を使用した。側面と底面は、振動の反射の影響を軽減するために緩衝材（エアキャップ製）を設けた。この容器の中央部に加速度計を取り付けた内部振動機を、下端が底部から50mmの位置となるよう鉛直に吊るし、含水状態を調整した細骨材を一定量（120kg）、容器内に投入し、均して詰めた。

なお、細骨材の充てん率は約45%程度である。加速度は動ひずみ測定器で計測し、動的計測ソフトを用いて0.05ミリ秒間隔でデータを収集した。

4.2 無負荷時の内部振動機の加速度

各種内部振動機の無負荷時における振動体の下端部の加速度測定結果をFig. 1に示す。

加速度は、振動開始から数秒間でほぼ安定しており、φ50mm（標準）が最も大きい結果となった。これは、振動体が太径ほど重錘の質量、偏心距離ともに大きく、振動エネルギーも大きいことを意味している。

一方、振動体が同一径のφ40mmの場合には、スパイラル型の方が標準品より加速度が約9%大きくなった。両者は、重錘の質量は同じであるが、振動機の質量はスパイラル型の方が標準品より約5%小さく、振幅増により振動エネルギーが大きくなったと考えられる。

無負荷時における各種内部振動機の加速度を振動体の部位別で整理した結果をFig. 2に示す。

いずれの内部振動機も下端部の加速度が最も大きく、中央部では下端部の約50～53%、上端部では約11～14%と、上方になるほど減少している。

部位毎の加速度に着目すると、中央部ではφ40mm（スパイラル）がφ50mm（標準）とほぼ同等であり、上端部においてはφ40mm（スパイラル）がφ50mm（標準）より大きい。これは振動体の外側面に凹凸を設けたこと、振動機の質量が軽くなったことにより、重錘振動のバランスに変化が生じ、振動体の振幅が全体的に大きくなったものと考えられる。

4.3 細骨材中に挿入した場合の内部振動機の加速度

内部振動機を細骨材中に挿入した場合の振動体下端部の加速度の測定結果をFig. 3に示す。

内部振動機の種類による加速度の大小は、無負荷時と同様の傾向にある。ただし、φ40mm（スパイラル）の場合は、φ50mm（標準）、φ40mm（標準）に比べ、無負荷の場合より加速度の低減割合が大きくなる傾向が認められる。また、加振開始からの加速度の変化に着目すると、φ40mm（スパイラル）は振動開始直後から数秒間の加速度が特に小さく、時間の経過とともに緩やかに増加し、平衡状態に達している。

一般に、内部振動機を細骨材中で加振すると、振動体自体の振動が細骨材間で拘束されるため、振動体の加速

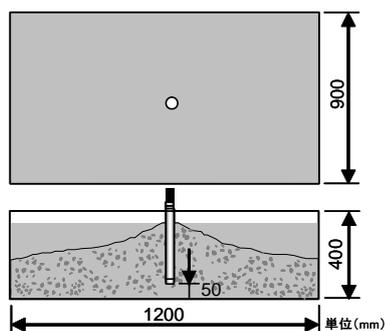


Fig. 4 スラブ試験体の概要
Outline of Slab Specimen

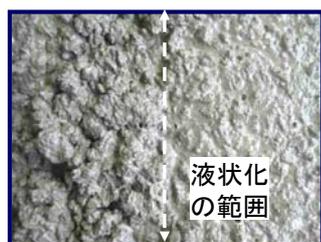


Photo 4 液状化範囲の境界
Boundary within The Range of Liquefaction

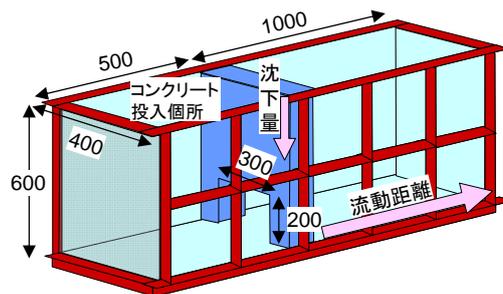


Fig. 5 振動式L型フロー試験の概要
Outline of Flow Examination with Vibration L-Shape

度は無負荷時よりも小さくなると考えられる。振動体の振動の減衰が大きいことは逆に被振動体に振動が伝播していることを意味している。

したがって、これらの結果は、振動体の側面に螺旋状の凹凸を設けたことで被振動体の細骨材との噛み合いが高まり、振動体の振動が抑制され、加速度の減衰として表われたものと考えられる。螺旋状の凹凸を設けることは、振動体自体の振動エネルギーを高めるとともに、被振動体への振動の伝播を高める可能性を示唆するものと考えられる。

5. スパイラル型内部振動機を用いた場合のコンクリートへの振動伝播特性

スパイラル型内部振動機の締固め効果を把握するために、実際にコンクリート中に挿入した場合の振動伝播特性について実験的に検討した。

5.1 実験概要

5.1.1 スラブ試験体を用いた振動締固め実験 Fig. 4に示すように、平面が90×120cm、高さ40cmの型枠内にコンクリートを打ち込み、内部振動機を用いて締め固めた場合の振動の伝播状況を調べた。

実験には、Table 1に示す3種類の内部振動機（スパイラル型、標準品（φ40mm、φ50mm））を使用した。

コンクリートは、目標スランブ8cmとし、レディーミクストコンクリート（27-8-20N）を使用した。

実験手順は、まず一定量のコンクリート（約330L）をホッパに入れて試験体の中央に配置し、約50cmの高さから連続的に打ち込んだ。内部振動機は、試験体の中央部に予め固定し吊るした状態でセットしておき、コンクリートを打ち込んだ後に20秒間振動を与えた。なお、スパイラル型内部振動機を用いた場合は、正転、逆転の2ケースについて実験を行った。

加振終了後、コンクリートの天端や型枠との境界面の振動伝播状況を観察した。特に、天端面については、Photo 4に示すように、コンクリートの表面がほぼ水平となり、セメントペーストが浮き上がり光沢が現れた範囲を液状化したとみなして数値化した。

5.1.2 振動式L型フロー試験 Fig. 5に示すように、平面が40cm×150cm、高さ60cmで一側面がアクリル製の型枠を用いた。この型枠の内部をポリスチレン性の緩衝材により仕切りを設け、コンクリートを打ち込んだ後、内部振動機により振動を与え、仕切り材の下端部に設けた開口（幅30cm、高さ20cm）からのコンクリートの流動状況を調べた。

実験には、2種類のφ40mm内部振動機（スパイラル型、標準品）を使用した。

コンクリートは、目標スランブ8cmの普通コンクリート（水セメント比55%、24-8-20N相当）を用いた。1バッチ100Lとし、実験ケース毎に練り混ぜ、型枠内に均一に打ち込んだ。内部振動機は、予めリフタの爪上に固定し投入箇所の上中央部に配置した。仕切り材に設けた開口部の蓋を外した後、内部振動機を振動させながらリフタを一定速度で降下させた。内部振動機は型枠底部から5cmの高さまで約5秒かけて挿入し、その後10秒間振動させた（合計15秒）。加振が終了した後、コンクリートの流動距離および投入箇所における沈下量を測定した。

5.2 スラブ試験体における振動の伝播性状

各種内部振動機を用いた場合の振動伝播状況をTable 2に示す。また、天端面における振動の伝播状況をPhoto 5に、スパイラル型内部振動機を用いた場合の型枠端部の振動伝播状況をPhoto 6に示す。

天端面の液状化した範囲は、太径のφ50mm（標準）を用いた場合が最も大きく、次にφ40mm（スパイラル）を正転で振動させた場合となり、逆転で振動させた場合とφ40mm（標準）の場合は同程度であった。

一方、型枠端部の隅角部に着目すると、φ40mm（スパイラル）を逆転で振動させた場合には型枠面に沿ってペーストの浮上りが顕著に認められ、下層部では正転の場合よりも振動が伝播していることが示唆された。

これらの結果によれば、Fig. 6に示すように振動が伝播しているものと推測される。すなわち、螺旋状の凹凸を設けた内部振動機を正転で振動させた状態で固定した場合、振動体を挿入する方向（下向き）に作用する推進力の反作用で上部に向かって振動が伝播しやすく、打込み時に山になったコンクリートを崩して均し、上層の液状



ケース 1 (φ40mm標準)



ケース 4 (φ50mm標準)



ケース 2 (φ40mmスパイラル, 正転)



ケース 3 (φ40mmスパイラル, 逆転)

Photo 5 各種内部振動機を用いた場合のスラブ試験体の天端面における液状化の範囲
Spreading Situation on The Crown Side of Slab Specimens by Inner vibraters



スパイラル正転



スパイラル逆転

(a) スパイラル型内部振動機を正転させた場合

(b) スパイラル型内部振動機を逆転させた場合

Photo 6 スラブ試験体の型枠端部におけるスパイラル型内部振動機の回転方向によるペーストの浮上り状況
Difference of Spread Situation by Direction Where Spiral Inner Vibrater is Rotated at Corner of Form in Slab Specimens

化に効果的になると考えられる。

一方、逆転で振動させた状態で固定した場合は、振動体を引き抜く方向（上向き）に作用する推進力の反作用でコンクリートには下層の方が広範囲に振動が伝播するものと考えられる。

5.3 振動式L型フロー試験における流動状況

振動式L型フロー試験結果をTable 3に、コンクリートの流動状況をPhoto 7に示す。

スパイラル型内部振動機を用いた場合は、同一径の標準品を用いた場合に比べて、開口からの流動距離が増大する結果が得られた。また、スパイラル型の場合は、逆

転で振動させた方が正転で振動させた場合より流動距離が大きく、上述のスラブ試験体での天端面における液状化範囲と相違する結果が得られた。

一方、沈下量に着目すると、正転で振動させた場合には、他のケースに比べて沈下量が若干大きくなり、流出するコンクリート量が多い結果となった。

これらの結果は、前述したようにスパイラル型内部振動機を用いた場合の回転方向による振動伝播の指向性の相違によるものと考えられる。特に、本実験では、内部振動機を振動させた状態でコンクリート中に挿入したことにより、逆転させた場合にコンクリートを下方に向かって押し込むような振動の作用が顕在化し、流動距離の

Table 2 各種内部振動機による振動の伝播状況
Spread Situation of Vibration by Inner Vibraters

ケース	内部振動機の種類			天端面の液状化範囲 (cm)	型枠端部の振動の伝播状況*
	振動体の径	螺旋状の凹凸	振動体の回転		
1	φ40mm	無(標準)	—	80	△
2		有	正転	86	△
3	逆転		80	○	
4	φ50mm	無(標準)	—	90	○

* ペーストの浮上り程度 ○全体的, △一部のみ

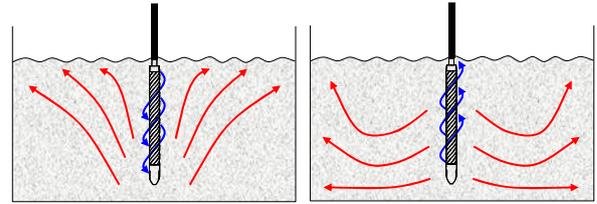


Fig. 6 スパイラル型内部振動機の振動伝播の概念図

Conceptual Drawing of Vibration Spread by Spiral Inner Vibrater



ケース 1 (φ40mm標準) ケース 2 (φ40mmスパイラル, 正転) ケース 3 (φ40mmスパイラル, 逆転)

Photo 7 振動式L型フロー試験のコンクリートの流動状況 (振動時間15秒, 挿入時間5秒, 挿入深さ 下端より5cm)
Concrete Flow Situation In Flow Examination with Vibration L-Shape (Vibration Time 15 sec, Insertion Time 5 sec, Insertion depth 5cm from bottom)

差として反映されたものと推測される。

一方、正転の場合には内部振動機を挿入した後、さらに振動を作用させたことで上方に向かって振動が作用したものと考えられる。これは、正転の場合に、コンクリートが開口部から盛り上がりながら流動する状況が観察された状況を裏付けるものである。

以上の結果を総合すると、振動体の側面に螺旋状の凹凸を設け、その回転方向を制御することで、同一径の内部振動機より振動の伝播範囲を高めることができ、結果として締固め能力を向上させる可能性があることを実験的に検証できたものと考えられる。

6. まとめ

本論文の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- 1) 振動体の外面に螺旋状の凹凸を設けることで、同一径の標準品より振動体の加速度を高めることができる。
- 2) 右回りの螺旋状の凹凸を設けた内部振動機を右回転(正転)で用いた場合、引上げ時に上方に向かって振動が伝播しやすくなる。

Table 3 振動式L型フロー試験結果

Result of Flow Examination with Vibration L-Shape

ケース	内部振動機の種類			流動距離 (cm)	天端からの沈下量 (cm)
	振動体の径	螺旋状の凹凸	振動体の回転		
1	φ40mm	無(標準)	—	76	21
2		有	正転	82	22
3	逆転		90	21	

- 3) 右回りの螺旋状の凹凸を設けた内部振動機を左回転(逆転)で用いた場合、挿入時にコンクリートを下方へ押し込む方向に振動が伝播しやすくなる。
- 4) 内部振動機の振動体の表面に螺旋状の凹凸を設け、その振動体内部の偏芯重錘の回転方向を切り替え、コンクリートへの振動の伝播を制御することで、コンクリートを効率良く密実に充填することができる。

参考文献

- 1) 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.