

35. 超音波振動を利用するセメント混合物の締め固め

(株)竹中工務店：内崎 巖

1. はじめに

フレッシュコンクリートの締め固めには振動を利用してコンクリートの流動性を一時的に増大させる方法が広く用いられている。棒状振動機や振動ローラはその例であるが、使用される振動数は可聴音以下と低い。硬化コンクリートのより高い緻密性を狙って、フレッシュコンクリート中の水分を減らそうとしても低い振動数では限界がある。それは、コンクリート中の水分が少なくなるにつれて変形に対する抵抗が増大し、低い振動数では流動化しなくなるからである。そこで、可聴音以上の振動（超音波振動）を利用して水セメント比の低いコンクリートを締め固めて緻密性を高める方法を試みたところ、流動性を全く示さないフレッシュコンクリートが超音波振動を受けると瞬時に流動化して締め固まり、高い緻密性を有するコンクリートが形成されることを見出したので以下に述べる。

2. セメントペーストの締め固め

流動性を全く示さない団粒状のセメントペーストを超音波振動で締め固める方法を試みた。それには超音波振動体（ステンレスやジュラルミン等の金属性弾性体）をセメントペーストに強く押し当てて振動を伝達する。超音波振動を受けたセメントペーストは瞬時に流動化して締め固まり緻密な層を形成する。この現象に関与する主な要因の中から水セメント比を取り上げ、緻密層の形成に及ぼす影響を調べた。

実験方法は、まず型枠（内径50mm）の中に種々の水セメント比の普通ポルトランドセメントを投入し、次に約3 kg/cm²の圧力で圧縮した後直径

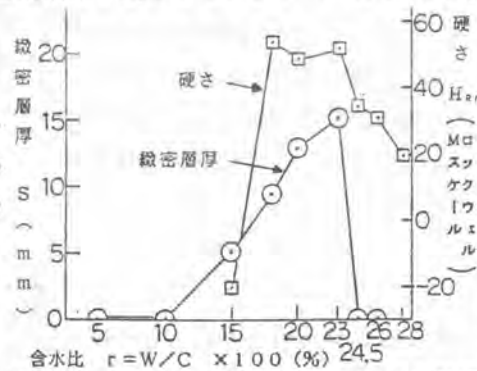


写真 2.1

実験方法

49mmの超音波振動体（振動数28.5KH z、振幅5 μ m）を2分間0.64kg/cm²の圧力で押し付けて試験体とした。写真 2.1 に実験方法を、写真 2.2 に試料の団粒状態を示す。硬化後試験体を切断して緻密層の厚さと硬さ（ロックウェルMスケール）を測定した（写真 2.3）。その結果を図 2.1 に示す。緻密層厚は水セメント比5～10%では観察されず15%から生じはじめ23%まで急増した後突然生じなくなっている。水分が少ないと締め固められず、水分が多いと流動化したセメントが型枠と超音波

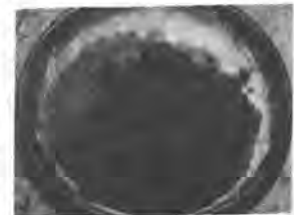


写真 2.2 セメントペーストの団粒状態

振動体との隙間から逃げてしまうからである(写真2.4)。緻密層の質の指標とした硬さは、水セメント比18~23%間ではほぼ一定であり、この範囲では緻密層厚が変化してもその質には大きな変化は起こっていないと理解できる。



写真2.3 試験体断面
上部の黒い部分が緻密層



写真2.4 流出したセメントペースト

以上述べた実験から、①超音波締固めの対象となるコンクリートの水セメント比は比較的狭い範囲に限定されること、②水の量が多すぎると、セメントペーストが流動化して逃げてしまい振動を強く伝えられないこと、などが明らかになった。

3. モルタルの締め固め

前章で述べたセメントペーストの実験では一方で緻密層が成長すると同時に他方超音波振動体と接触するセメントペーストは流動化して型枠と超音波振動体との隙間から流れ出てきた。流出するセメントペースト量は加振圧力の増大につれて著しく増大するという深刻な問題に直面した。そこで、セメント中に細砂を混入して超音波締固めを試みたところ、適切な割合を選べば緻密層は固結化し数気圧の加振圧力を支持できることを探り出したので次に述べる。

3.1 加振圧力が緻密層の形成に及ぼす影響

加振圧力の増大により緻密層をどれだけ厚くできるかを調べた。対象としたモルタルの割合はW:C:S=0.28:1:2、セメントは普通ポルトランドセメント、砂は目の開き0.6mmの篩を通過した砂である。加振方法は前章とほぼ同様であるが超音波振動体は振動数19.5KHz、振幅5μmを用い種々の圧力で15秒間押し付けた。硬化後試験体を切断して緻密層の厚さを測定した(写真3.1)。その結果を図3.1に示す。緻密層厚は加振圧力の低い範囲で急激に増大した後徐々に増加傾向が緩やかになっている。4kg/cm²で約32mmの緻密層が得られており、工場床や道路の耐摩耗性向上を目的とする表層施工には十分な厚さである。次に、加振圧力をパラメータとした加振時間と緻密層厚の関係を図3.2に示す。同図3.2の加振圧力4kg/cm²



写真3.1 加振圧力による緻密層厚の変化

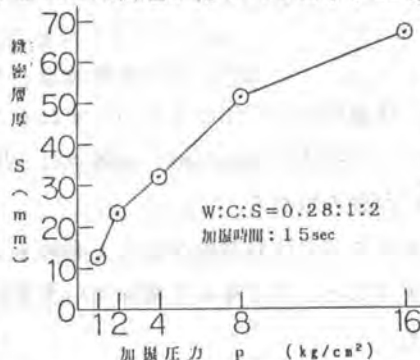


図3.1 加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響

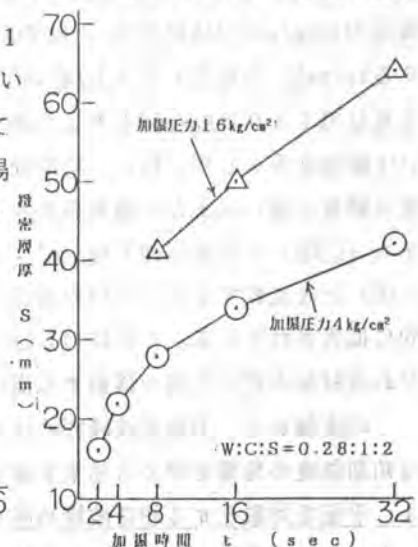


図3.2 加振時間と緻密層厚の関係

cm²の曲線を見ると、加振時間8秒迄の増加傾向は著しく、その後勾配を緩めながら3.2秒迄増加している。同一厚さを得るための所要時間を比較すると、加振圧力4 kg/cm²、加振時間3.2秒で得られる緻密層厚約4.0 mmを加振圧力1.6 kg/cm²で得るには8秒となり、所要時間は1/4に短縮されている。なお、さらに長く加振すると表層部に空隙が発生し始め、数分間におよぶ時は水分が蒸発して乾燥粉体となることが観察された。

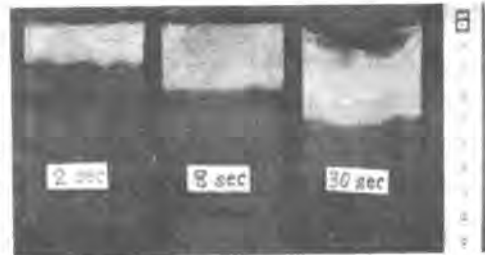


写真3.2 加振時間による緻密層厚の変化

本実験により、加振圧力を高められれば、緻密層の厚増と加振時間の短縮が可能となることが分かった。

3.2 超音波締固めによるモルタルの圧縮強度

超音波振動による締固めがモルタルの圧縮強度の経時変化に及ぼす影響を調べた。実験方法は、型枠（内径50mm）の中にモルタルを少量投入して前述の超音波振動体押し付けて締固め、緻密層を形成する。これを繰り返して高さ約10 cmの積層試験体とした。

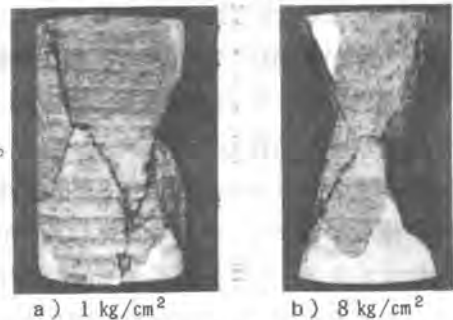


写真3.3 圧縮試験後の試験体

これを繰り返して高さ約10 cmの積層試験体とした。20℃の水中で養生し、圧縮強度の経時変化を測定した。圧縮試験後の試験体を写真3.3に示す。加振圧力8 kg/cm²と1 kg/cm²で締め固めた結果を図3.3に示す。同図3.3から分かるように加振圧力8 kg/cm²では材令0.3日で273 kg/cm²、3日で1031 kg/cm²、28日で1302 kg/cm²と著しく高い圧縮強度を示した。特に、初期強度は顕著に高い。また、通常モルタル（□印）と加振圧力1 kg/cm²（△印）とを比較すると、△印の各点の圧縮強度は□印の各点のいずれも3倍以上と大幅に縦方向に拡大されている。これに対し○印（加振圧力8 kg/cm²）の各点は△印に比較して左方向すなわち材令の若い方向へ移動する傾向が読み取れる。

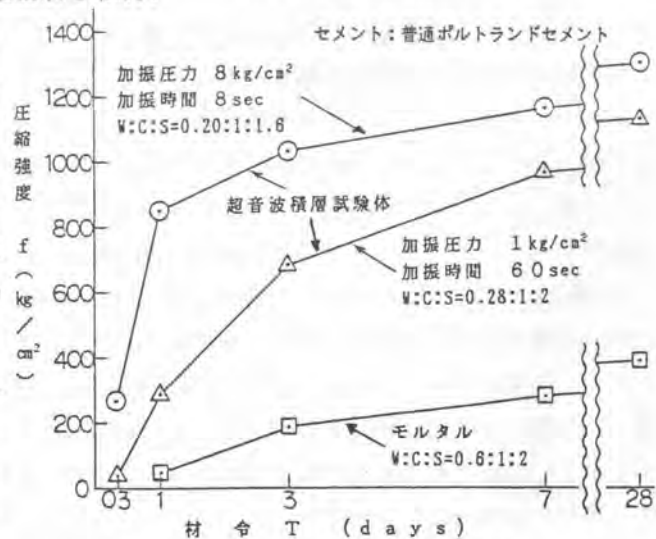


図3.3 圧縮強度の経時変化

この実験から、①超音波締固めはモルタルの圧縮強度を著しく高めること、②高い加振圧力は初期強度の発現を早める効果を奏すること、など極めて興味深い事実が明らかになった。

4. 平面を対象とする超音波締め固め

これまでの実験で得られた緻密層の厚さは最大で数cmと薄く、構造体としての用途には適し

ていない。工場や倉庫のコンクリート床用耐摩耗コーティングとしての用途であれば、この厚さは実用上充分と考え、次のような定性的実験を試みて本工法を平面施工へ適用できるかどうかの可能性を模索した。

実験方法は通常の調合のコンクリートを平板型枠に打設し、4～5時間経過してブリージング水が引いたのを見計らって超音波振動（振幅：10 μ m）で締め固めた。この生乾き程度は打設されたコンクリートが§2で述べた水セメント比の範囲内におさまっていることに対応している。締め固めは幅16cm、厚さ4cmの超音波振動体を上記のコンクリートに約0.5kg/cm²の圧力で押し付けながら1.5m/minの速度で移動した。（写真4.1）。この工程ではコンクリート表面は締め固まるとともに一部が流動化して超音波振動体の前方に押し出されてきた。その様子は鉋の切り屑のようであった。この工程を経たコンクリート表面は数mmの小さな凹凸で被われていた。



写真4.1 平面の締め固め



写真4.2 試験体断面

次に振幅を半分に下げ、加振圧力約0.05kg/cm²で前回と同様に締め固めると極めて滑らかな表面が形成された。試験体を切断して断面を観察したところ、表層2～3mmには高い緻密性を有する層が形成されていた（写真4.2）。

以上の実験は極めて大ざっぱなものであるが、上記の結果から本締め固め法の平面施工への適用の可能性は一応見い出せたと考えている。

5. まとめ

超音波振動を利用した締め固め実験を行って、次に挙げる基本事項を明らかにした。

- 1) 超音波締め固めの対象となるセメントの水セメント比は比較的狭い範囲に限定されること。
- 2) セメントペースト中に適切な量の細砂を混ぜれば、固結化した緻密層が形成され数気圧の加振圧力を支持できること。これにより緻密層の極厚化と加振時間の短縮が可能なこと。
- 3) 超音波締め固めはモルタルの圧縮強度を著しく高めるだけでなく高い加振圧力は初期強度の発現を早める効果を奏すること
- 4) コンクリートの生乾き状態のタイミングを上手に捉えれば、平面の連続施工が可能である。

今後は、平面の連続施工が可能な加振方式（たとえば、図5.1に示す装置）を試作し実施工と同等な条件での実験を試み、実際の工事で役に立つ工法へ発展させたい。

図5.1 超音波締め固め機の構想

