

論文

[1114] 超音波振動によるセメント混合物の締め固め

正会員 ○内崎 巖 (竹中技術研究所)

1. まえがき

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。低い振動数は減衰が少ない点で締め固め範囲を広くするためには有利であるものの硬化コンクリートの緻密性を高めようとコンクリート中の水分を減らしていくと締め固められなくなる。なぜならば、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)を利用して含水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

超音波振動を利用して流動性を示さない団粒状のセメントペーストを締め固めるには超音波共振体(ステンレスやジュラルミン等の金属を材料とする弾性体)を押し当てて振動をセメントペーストに伝達する。超音波振動を受けた超音波共振体直下の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。この現象に関する主な要因の中から、①含水比、②加振時間、③加振圧力(超音波共振体をセメントに押し付ける圧力)の3項目を取り上げ、それらが緻密層の形成に及ぼす影響を次のように調べた。

実験方法は、まず型枠(内径50mm)の中に種々の含水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49mmの超音波共振体(振動数28.5KHz, 振幅5μm)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)。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。結果を図2.1に示す。緻密層厚は含水比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共振体との間から逃げてしまうからである。緻密層の質の指標とした硬さの変化は、含水比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。

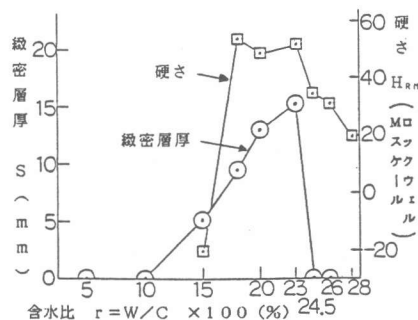


図2.1 含水比が緻密層厚に及ぼす影響

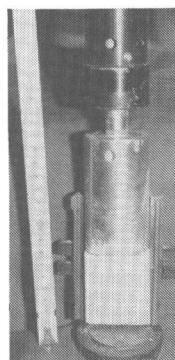


写真2.1 実験方法

次に加振時間及び加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響について述べる。材料はW/C=0.2のセメントペースト(写真2.2)、実験方法は含

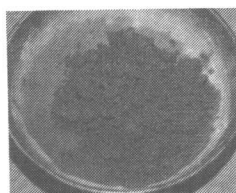


写真2.2 セメントペーストの団粒状態

水比に関する実験とほぼ同様である。図2.2に示す加振時間が緻密層厚に及ぼす影響を見ると、加振時間15秒までは

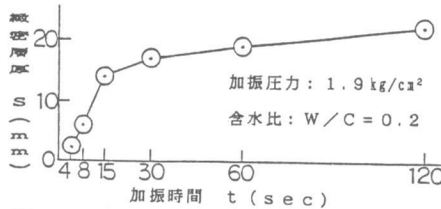


図2.2 加振時間が緻密層厚に及ぼす影響

緻密層は急激に成長するがその後は徐々に飽和する傾向を示している。図2.3に示す加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響では加振圧力の増大にともない緻密層厚は顕著に増大しており飽和傾向はみられない。

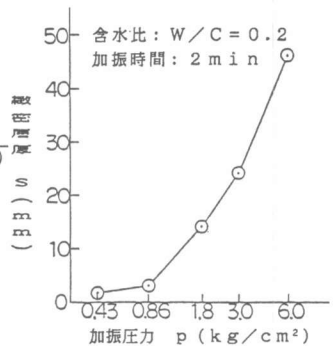


図2.3 加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響

以上述べた実験から、①超音波締固めの対象となるセメントの含水比は比較的狭い範囲に限定されること、②加振時間がある程度以上長くなると緻密層厚は増加しない飽和傾向を示すこと、③加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響は大きく、飽和傾向はみられないこと、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共振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共振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め固めを試みたところ、適切な割合を選べば緻密層は固結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 0.6 mm 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共振体は振動数 19.5 kHz 、振幅 $5 \mu\text{m}$ 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。 4 kg/cm^2 で約 32 mm 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 4 kg/cm^2 の曲線を見ると、加振

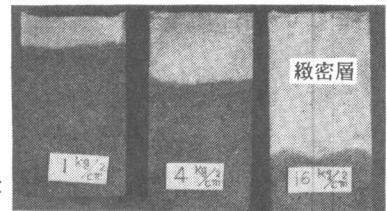


写真3.1 加振圧力による緻密層厚の変化

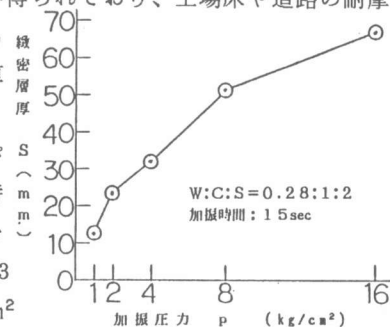


図3.1 加振圧力が緻密層厚に及ぼす影響

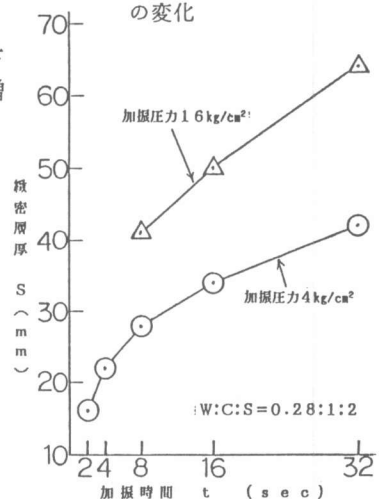


図3.2 加振時間と緻密層厚の関係

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32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32秒で得られる緻密層厚約40mmを加振圧力16 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。

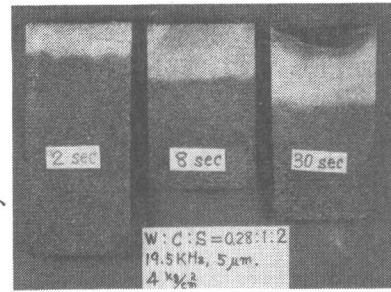


写真3.2 加振時間による緻密層厚の変化

本実験により、加振圧力を高められれば、緻密層の極厚化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共振体を押し付けて締固め、緻密層を形成する。これを繰り返して高さ約10cm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、通常のモルタル（□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。

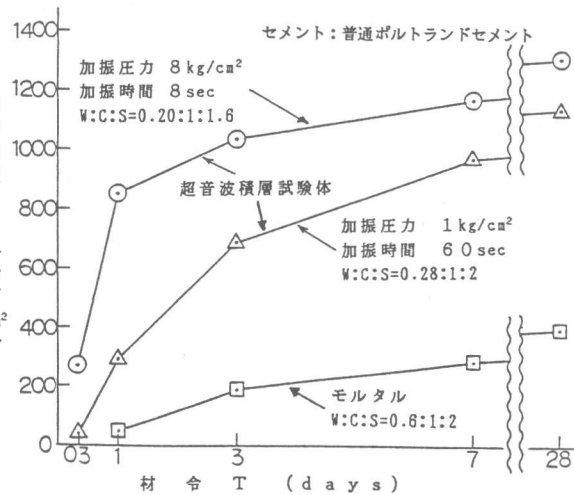
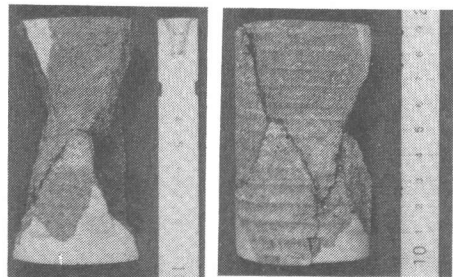


図3.3 圧縮強度の経時変化



a 加振圧力 8 kg/cm² b 加振圧力 1 kg/cm²

写真3.3 圧縮試験後の試験体

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. 超音波締固めと圧縮締固めとの比較

次に、超音波振動による締固め効果を圧縮による締固めで評価した。評価方法は、種々の圧力でセメントペーストを締固めて圧縮締固め圧力と圧縮強度（養生期間28日）の関係を求めた。その結果を図4.1に示す。同図4.1に前章で示した超音波締固めによる圧縮強度113

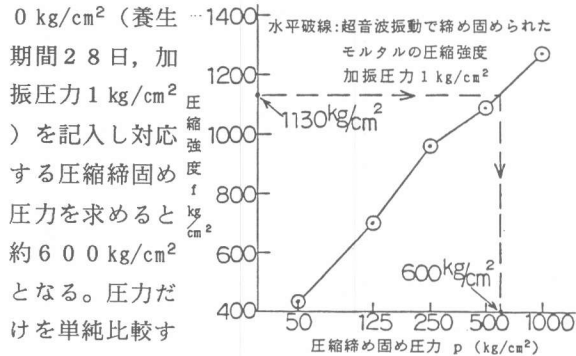


図 4.1 圧縮締め固め圧力と圧縮強度の関係

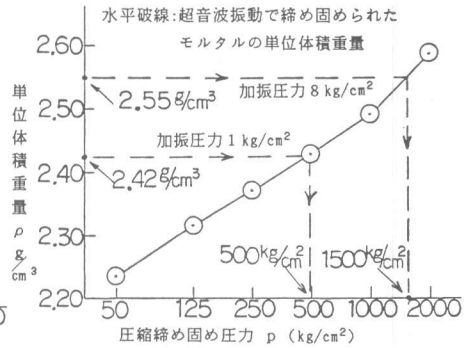
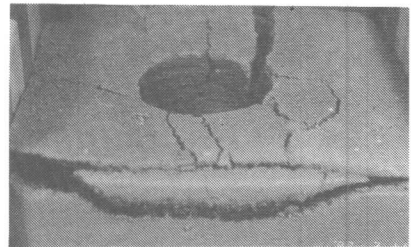


図 4.2 圧縮締め固め圧力と単位体積重量の関係

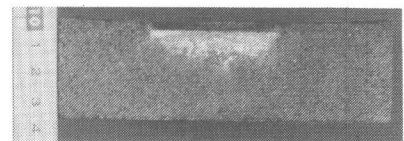
強度を得るのに超音波締め固めは圧縮締め固めの1/600の圧力ですむことになる。また、単位体積重量についても同様な方法で比較し図4.2に示した。超音波締め固めの2.42 g/cm³ (加振圧力1 kg/cm²)、2.55 g/cm³ (加振圧力8 kg/cm²)に対応する圧縮締め固め圧力はそれぞれ500 kg/cm²、1500 kg/cm²となった。加振圧力の圧縮締め固め圧力に対する割合は1/500と1/190になる。以上述べたことから、超音波締め固めは低い加振圧力で極めて高い圧縮圧力で締め固めたのと同様な締め固め効果を発揮できる、と言える。

5. 平面を対象とした超音波締め固め

道路や工場床を本方式の適用対象とすると、型枠による拘束のない平面状態で施工できることが必須の要件となる。そこで、16 cm × 16 cmの型枠内にモルタルを入れて圧縮圧力16 kg/cm²で締め固めた後、超音波締め固めを行った。写真5.1-aに示す加振圧力16 kg/cm²の例では円筒型超音波共振体をモルタルに押しあてて加振すると、しばらくして周囲に亀裂が発生し始め、超音波共振体が沈むにつれて亀裂は拡大した。写真5.1-bに示す加振圧力4 kg/cm²の例では、亀裂は起こっていない。この時の緻密層は加振時間4～8秒で約1 cmの厚さに形成されており、締め固めによる沈下量は3～4 mmであった。



a 加振圧力16 kg/cm²



b 加振圧力4 kg/cm²

写真5.1 平面の超音波締め固め

6. 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含水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) 超音波締め固めは低い加振圧力で極めて高い圧縮圧力で締め固めたのと同様な締め固め効果を発揮できること。
- 5) 超音波締め固めの前に高い圧縮圧力で締め固めれば亀裂の発生なく平面を施工できること。

今後は、平面の連続施工が可能な加振方式(たとえばローラー型加振機)を用いて実施工と同等な条件での実験を試み、実際の工事に役に立つ工法へ発展させたいと考えている。