

論文

[1171] 超音波締め固めにおける砂の粒径の効果

正会員 ○内崎 巖 (竹中工務店技術研究所)

§ 1. まえがき

流動性を全く示さない低水セメント比のモルタルが超音波振動を受けると、瞬時に流動化して締め固まり緻密な層を形成する。既報〔1〕ではこの緻密層は極めて高い圧縮強度を早期に発現することを報告した(養生期間8時間で270 kg/cm², 28日で1300 kg/cm²)。こうした特性を有する超音波締め固め法の応用分野を模索する上で、いかに速く、厚い緻密層が得られるかは大きなポイントである。この立場から緻密層形成における砂の役割を理解することが極めて重要と考え、砂の粒径が緻密層厚に及ぼす影響を調べた。その結果、超音波振動体に対する直径約1 mmの砂の衝撃反撥性はこれより大きい砂や小さい砂に比べ際立って強いことを探りあて、この性質を効果的に活用すれば短時間に厚い緻密層を形成できることを見出した。以下にその概要を述べる。

§ 2. 超音波振動の衝撃を受けた砂の挙動……砂の跳躍試験

細骨材を混入したモルタルを超音波振動で締め固めて得られる緻密層の厚さはセメントペーストでのそれに比べ4~5倍にもなる。このことは緻密層形成における骨材とくに砂の役割が重要であることを示している。そこで、超音波振動体に接触する砂がどのような挙動を示すかを調べるために、砂の跳躍試験を次のように行った。

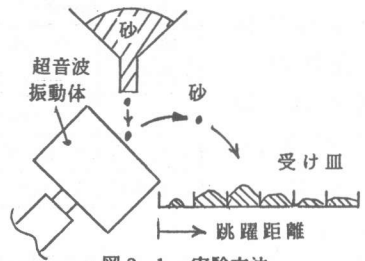


図 2.1 実験方法

実験方法は図 2. 1 に示すように、自由落下する砂を傾斜した超音波振動体(振動数19.5KHz, 振幅11μm, 材質: ステンレススチール)に衝突させ、跳ね返って飛び散る砂を受け皿で受け、距離と重量百分率を測定した。パラメーターとして砂の粒径をとりあげ、表 2. 1 に示す大粒径(平均粒径3.2 mm), 中粒径(平均粒径0.82 mm), 小粒径(平均粒径0.16 mm)の3種類を用いた。実験結果を図 2. 2 に示す。同図 2. 2 を見ると、中粒径の砂と大粒径の砂は遠く70 cmまで飛び跳ねており、全体的に緩やかな右下がりの勾配となっている。これに対し、小粒径の砂は10 cm前後に極端に集中した後急激に下がり、30 cmを越えるものは殆ど無い。このように小粒径の砂は近距離に分布しており、中及び大粒径の砂の跳躍距離の分布とは際立った対照を

表 2. 1 砂の種類と大きさ 単位: mm

種類	最小粒径	最大粒径	平均粒径
小粒径	0.07	0.30	0.16
中粒径	0.30	1.68	0.82
大粒径	2.0	5.6	3.2

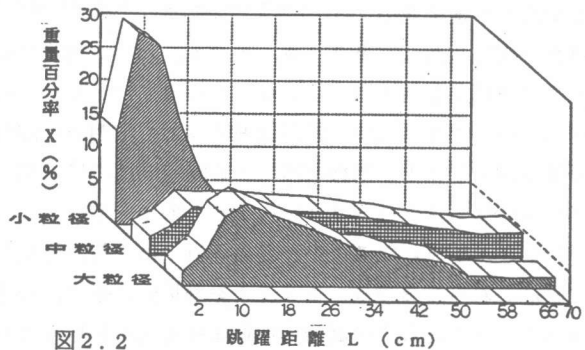


図 2. 2

砂の粒径が跳躍距離の分布に及ぼす影響

示している。次に、中粒径の砂と大粒径の砂とを比較すると、前者は右下がりの勾配が比較的緩やかであり、遠くまで一様に飛んでいる。特に、跳躍距離60～70cmでの中粒径の砂の量は大粒径の砂の量の2倍以上にもなる。このように中粒径の砂は他の砂に比べて、超音波振動体との衝突を通して、運動エネルギーを格段に吸収しやすい性質を持っているのである。

この実験により、砂の粒径が大き過ぎても小さ過ぎても遠くへは飛び跳ねないという最適跳躍粒径が存在すること、その最適粒径は1mm程度であることが明らかになった。この最適粒径の砂を材料とするモルタルを超音波振動で締め固めれば、他の砂では得られない厚い緻密層が短時間に得られるのではないかと、この見通しを得た。

§ 3. 砂の粒径を変化させたモルタルの超音波締め固め

前記3種類の砂をそれぞれ混入したモルタルを超音波振動で締め固め、粒径が緻密層厚に及ぼす影響を①水セメント比②加振時間③砂セメント比の各項目について調べた。加振条件は表3.1

1に示す値を基本とした。加振方法は型枠(内径50mm)の中にモルタルを投入し16kg/cm²の圧力で締め固めた後、直径49mmの超音波振動体(振動数19.5KHz, 振幅11μm)を4kg/cm²の加振圧力で押し付けながら締め固めた(写真3.1, 3.2)。

表 3.1 加振条件

項目	仕様
振動数	19.5 KHz
振幅	11 μm
加振圧力	4 kg/cm ²
加振時間	30 sec

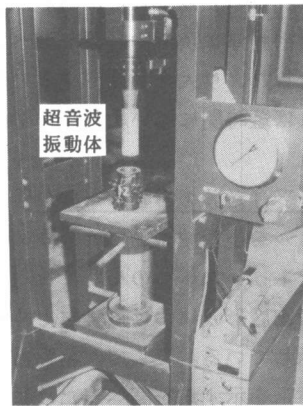


写真 3.1 実験装置

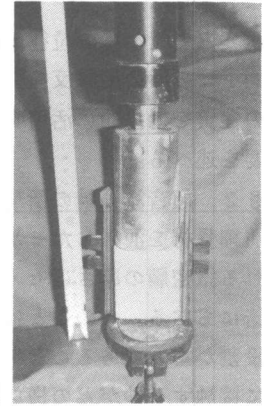
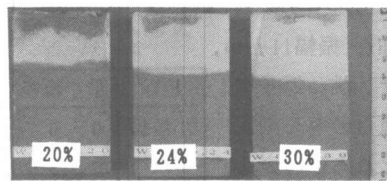


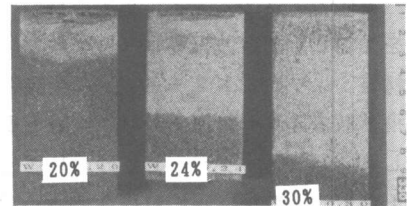
写真 3.2 加振方法

3.1 水セメント比と緻密層厚の関係

砂セメント比をS/C=2.4一定とし、水セメント比を変化させたモルタルを超音波振動で締め固め、硬化後試験体を切断して緻密層の

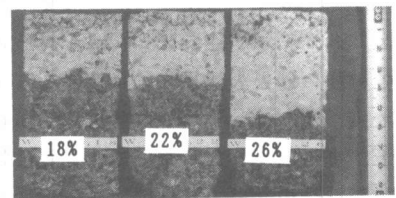


a) 小粒径 (平均粒径 $D = 0.16$)



b) 中粒径 ($D = 0.82$)

厚さを測定した(写真3.3, a, b, c)。実験を通して次の事項が観察された。①W/Cの増加にともない流動化したモルタルが型枠と超音波振動体との隙間から溢れ出る量も増えること、②緻密層厚と非緻密層厚の境界線はW/Cが少なすぎたり(20%以下)、多すぎる(28%以上)と、不明確になること、③表面直下に空隙が発生すること。これらの事項は、モルタルを効果的に締め固めるには水セメント比などの調合と加振条件を適切に組み合わせる必要があることを示している。



c) 大粒径 ($D = 3.2$)

砂の粒径をパラメータとした水セメント比と緻密層厚の関係を図3.1に示す。加振時間は30秒である。同図3.1をみると、小粒径の砂(△)の緻密層厚は2.5～3.5mmと薄く、水セ

メント比18から30%に至るまで少ししか増加していない。これに対し、中粒径の砂(○)の緻密層厚は水セメント比20%から急激に増加して28%で極大値9.1mmになり30%では少し下がっている。大粒径の砂の緻密層厚(□)は水セメント比が低い範囲では小粒径の砂とほぼ同等の30~35mmであるが20%を越えると緻密層厚は増大しはじめ前二者の中間の値をとって30%での6.2mmまで増えている。水セメント比28%での3種の砂の緻密層厚を小粒径の砂の緻密層厚を1として比べると、大粒径の砂は1.6倍、中粒径の砂は2.6倍になる。

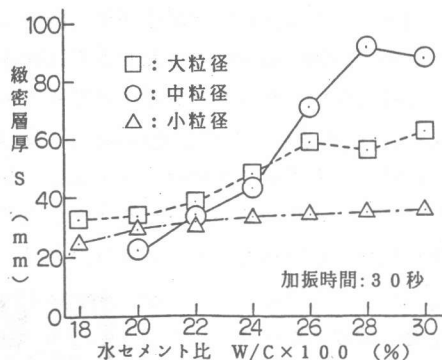


図3.1 水セメント比と緻密層厚の関係

このように同じ条件での緻密層厚の大小関係(小粒径<大粒径<中粒径)は砂の跳躍の大小関係と一致した。また、水セメント比が増えるにつれて緻密層厚も増加する傾向は3種の砂で共通している。

以上述べた3種の砂に関する跳躍実験と締め固め実験の結果とを併せ考えると、次のような締め固めプロセスが考えられる。超音波振動を利用する締め固めでは超音波振動体に接触した砂粒は勢よく跳ね返って隣の砂粒に衝突し、それが飛び跳ねて次の砂粒に衝突するという砂粒の衝突の連鎖反応が繰り返されて締め固め範囲が広がっていく。それゆえ水分が増えるとセメントペーストの変形抵抗が低下し、砂粒は跳躍し易くなって、緻密層厚が増大するのであろう。水分が多すぎると、セメントペーストの変形抵抗がさらに少なくなり、砂の動きは活発になり過ぎる結果、締め固まって固結化せずに流動化し表面に流れ出る。流動化したモルタルは加振圧力を支えられなくなり、砂粒が超音波振動体から受け取る衝突エネルギーは増えないので、緻密層は厚くならない。

3.2 加振時間と緻密層厚の関係

前述の粒径による緻密層厚の顕著な差は30秒という長い加振時間で得られたものである。そこで、加振時間の短縮にともないその差がどのように変化するかを調べるために、前節と同様に3種の砂を混入したモルタル(W:C:S=0.28:1:2.4)を締め固めて、加振時間と緻密層厚の関係を求めた。試験体断面の一例を写真3.4に示す。図3.2には加振時間と緻密層厚の関係を示す。同図3.2をみると、10~30秒の長い加振時間では3種の砂の間で緻密層厚にはっきり差が現れており、その順番は小粒径<大粒径<中粒径となっている。小粒径と中粒径との緻密層厚をみると、加振時間が短くなるほどその差が顕著になる。たとえば、中粒径の砂では3秒という極めて短い加振時間であっても厚さ5.4mmもの緻密層が得られているのに対し、小粒径では6mmと薄い。両者の緻密層厚の比を加振時間毎にとってみると、30秒では2.6倍しかなかったものが10秒では3倍、3秒では9倍になっている。

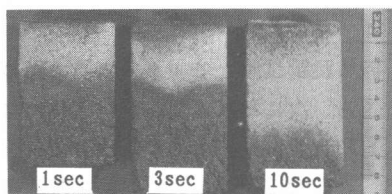


写真3.4 加振時間による緻密層厚の変化：中粒径

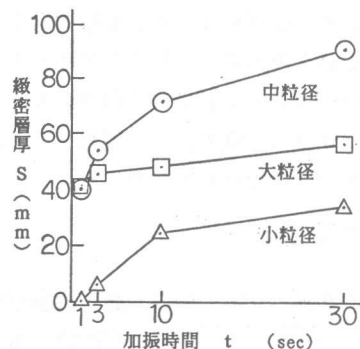


図3.2 加振時間と緻密層厚の関係

以上述べた加振時間と緻密層厚の関係に関する実験から加振時間が短くなるにつれて最適粒径の砂が厚い緻密層をつくりだす効果は顕著になることが判り、興味深い。

この実験からも超音波振動体は粒径1mm前後の砂に選択的に働きかけることが確認された。

3.3 砂セメント比が緻密層厚に及ぼす影響

これまでの実験では砂セメント比は一定としてきた。ここでは、 $W/C = 0.24$ 一定とし、 S/C を1.0~2.8まで変化させたモルタルを用いて、砂セメント比が緻密層厚に及ぼす影響を大まかに調べた。セメントは白色ポルトランドセメントを、砂は中粒径を使った。加振方法はこれまでと同様である。硬化後の試験体断面を写真3.5に示す。試験体断面を顕微鏡(200倍)で観察したところ、砂の多い試験体は空隙が多いものの S/C の異なる試験体間のセメント分の構造を較べても本質的相違はみられなかった。横軸に S/C をとって緻密層厚の変化を図3.3に示す。同図3.3からわかるように、 S/C が変化しても緻密層厚はあまり変わらない。試験体断面を観察したところ、 $S/C = 1.4$ と2.0の緻密層断面は滑らかな手触りでその質に大きな変化はないと感じられた。これに対し、 $S/C = 2.8$ では断面がザラザラしており、緻密層厚と非緻密層厚との境界がはっきり分かれていなかった。また、 $S/C = 1.0$ の緻密層断面は一応滑らかだが、緻密層と非緻密層との境界が $S/C = 1.4$ と2.0の試験体に較べて不明確だった。観察結果から、すくなくとも1.4~2.0程度の範囲であれば、砂セメント比は緻密層の質に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

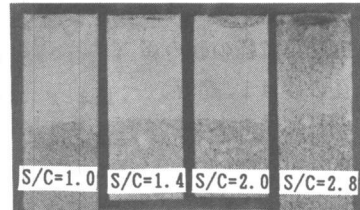


写真3.5 S/C による緻密層厚の変化

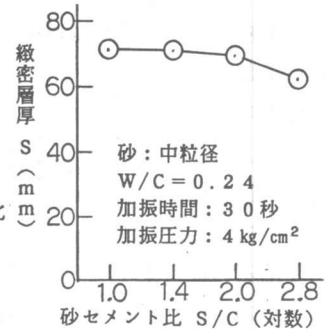


図3.3 砂セメント比と緻密層厚の関係

を較べても本質的相違はみられなかった。横軸に S/C をとって緻密層厚の変化を図3.3に示す。同図3.3からわかるように、 S/C が変化しても緻密層厚はあまり変わらない。試験体断面を観察したところ、 $S/C = 1.4$ と2.0の緻密層断面は滑らかな手触りでその質に大きな変化はないと感じられた。これに対し、 $S/C = 2.8$ では断面がザラザラしており、緻密層厚と非緻密層厚との境界がはっきり分かれていなかった。また、 $S/C = 1.0$ の緻密層断面は一応滑らかだが、緻密層と非緻密層との境界が $S/C = 1.4$ と2.0の試験体に較べて不明確だった。観察結果から、すくなくとも1.4~2.0程度の範囲であれば、砂セメント比は緻密層の質に大きな影響を及ぼさないと考えられる。

8.4 まとめ

砂の跳躍試験とモルタルの締め固め実験を行って、砂の粒径が緻密層厚に及ぼす影響を調べたところ、次に挙げる諸点が明らかになった。

- 1) 超音波振動体に対する砂の衝撃反撥性は粒径により異なり、粒径が大き過ぎても小さ過ぎても衝撃反撥性は弱い。最適跳躍粒径は1mm程度である。
- 2) モルタルの超音波振動締め固めにおいて、最適跳躍粒径の砂を用いれば短時間に厚い緻密層が得られる。
- 3) 砂の粒径の違いによる緻密層厚の差は加振時間が短いほど大きい。

これらの知見は、超音波締め固め法の応用分野を模索するにあたり、厚い緻密層を形成する手法の一つとして有効に活用できると考えている。また、砂の特性を利用して得られる緻密層が厚さだけでなく質の点でも優れているかどうか、今後検討を進める予定である。さらに、締め固めプロセスにおけるセメントペーストの作用についても未解明であり、今後の課題として残されている。

参考文献: [1] 内崎 巖: 超音波振動によるセメント混合物の締め固め, 日本コンクリート工学会年次論文報告集, 1989, Vol-11-1, pp. 679~682.