

S3-3

超音波照射による固液混合材料の記憶の消去と材料の破壊強度の強化への応用

Erasure of memory of paste by irradiating ultrasonic waves and its application to increase breaking strength

○中原明生¹, 米山暎汰², 伊藤丸人², 松尾洋介³, 狐崎創⁴*Akio Nakahara¹, Ryota Yoneyama², Maruto Ito², Yousuke Matsuo³, So Kitsunozaki⁴

A water-poor densely packed colloidal suspension called paste remembers the direction of vibration and flow it has experienced and the memory of such motion can be visualized as a morphology of desiccation crack pattern. When the paste remembers the vibration, desiccation cracks run in the perpendicular to the direction of the vibration, while desiccation cracks run in the direction parallel to the flow direction when the paste remembers the flow motion. Here we find that memories in paste can be erased by the irradiation of ultrasonic waves to paste as we obtain only isotropic and cellular crack patterns without any anisotropy related to memory effect. This method can be applied to increase the breaking strength of dried paste by homogenizing microstructure in paste.

1. ペーストの記憶効果と乾燥亀裂パターン

粉と水を混ぜた高濃度の固液混合材料（ペースト）は塑性ゆえに振動や剪断などの方向を記憶し、その記憶はペーストを乾燥させることによって現れる亀裂パターンの形状として視覚化される。例えば、ペーストが水平方向に振動してその方向を記憶した場合は「乾燥させた時に現れる亀裂」は振動方向に対し垂直に伝播し、一方、ペーストが剪断を記憶した場合は「乾燥させた時に現れる亀裂」は剪断方向に対し平行に伝播する（記憶効果）^[1-2]。ペーストの記憶効果のメカニズムを調べたところ、振動下や剪断下でミクロに異方的な粒子の空間分布が形成され、乾燥時の変形や亀裂の生成はその方向に依存することが確認された^[3-5]。

ペーストの記憶効果の工学的な応用として、ペーストに振動や剪断の方向を記憶させることによって亀裂の進展方向を制御することができるようになったが、ある意味この応用は材料を特定の方向に壊れやすくする制御に対応するという課題点も浮上した^[1-2]。

本研究においては、振動や剪断の方向を記憶して特定の方向に割れやすくなったペーストに対し超音波を消去することで、それらの記憶を消去して割れやすい方向を消し、その結果固液混合材料の破壊強度を増加させる研究を行ったので、その成果について報告する。

2. 超音波照射による記憶の消去実験

超音波を照射し記憶を消去する実験の材料として、振動を記憶する高濃度（体積比 42%, 降伏応力 2.5Pa）の炭酸カルシウム・ペーストを用いた。一辺が 500mm の水槽の底に投げ込み式超音波発生器を設置し、すでに振動を記憶したペースト（厚さ 10mm）を入れた直径 100mm の円形ステンレス容器の底が水槽の水面に接

するように設置し、下から超音波を照射し、その後乾燥させた時に現れる亀裂パターンの形状から超音波照射の効果を視覚化した。ペーストが振動や剪断を記憶している場合はその方向に依存した異方的な縞状乾燥亀裂パターン（Fig. 1(a)）が得られる。ところが、すでに振動を記憶したペーストに対して超音波を照射することで等方的なセル状亀裂パターン（Fig. 1(b)）が得られたということは、超音波照射によってペーストの記憶を消去できたことを意味していると考えられる。

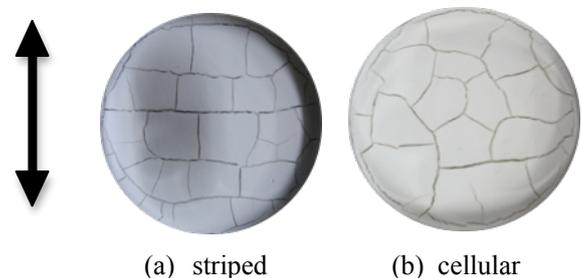


Figure 1. Desiccation crack patterns of calcium carbonate pastes. The arrow indicates the direction of horizontal vibration. (a) A paste is vibrated in one direction for 1 min., then dried. (b) A paste is vibrated for 1 min., irradiated by ultrasonic waves of 71kHz and 25kPa for 1 min, and then dried.

照射する超音波の周波数 f [Hz] と強度の実効値である音圧 P [Pa] をコントロール・パラメーターとして、亀裂パターンの形状から記憶が消去できたかの判断相図（Fig. 2）を作成した。図中で、●は超音波照射により過去の記憶が消去されて等方的なセル状亀裂が発生、◆は超音波の強度が弱く記憶を弱めるのみ、田は超音波照射の甲斐なく記憶が消せず過去の振動方向に垂直な縞状亀裂の発生、を示している。超音波照射で記憶を消去できること、周波数が低いほど弱い強度

でもペーストの記憶を消去できることが分かった^[6].

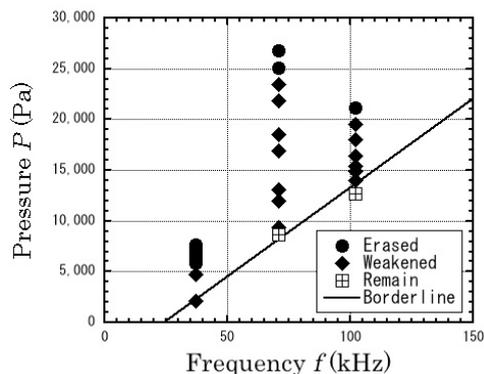


Figure 2. Effect of the irradiation of ultrasonic waves to paste, as a function of frequency and pressure of applied ultrasonic waves.

3. 材料の破壊強度の強化

超音波照射による振動の記憶の消去が固液混合材料の破壊強度の増加をもたらしているか調べるために、モルタルを用いて実験した。サンプルとしては、A: モルタルペーストをシリコン容器の型に流し込み、容器を上下にトントンの揺すって上面を平らにしたもの、B: サンプル A を水平方向に振動させ振動を記憶させたもの、C: さらにサンプル B に超音波を照射し振動の記憶を消去したもの、を 1 週間ほど静止状態で固化させ、その後シリコン容器から取り出して各サンプルを 10 個ずつ引っ張り試験機で 3 点曲げ法にて破壊強度を測定した。その結果、振動を加えてから超音波を照射されたサンプル C の破壊強度が最も大きいことが示され、超音波照射が固液混合材料の破壊強度の増加に応用できることがわかった。

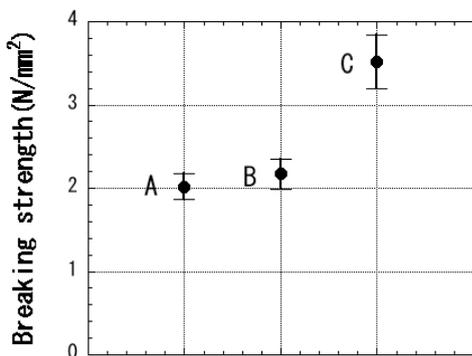


Figure 3: Breaking strength of mortar. (A) The mortar paste is just solidified in silicone container. (B) Sample A is vibrated horizontally and then solidified. (C) Sample B is irradiated by ultrasonic waves and is solidified.

4. まとめ

揺れや流れの方向を記憶した固液混合材料（ペースト）は記憶に依存した方向に割れやすいことが知られている^[1-2]。本実験により、過去の動きを記憶したペーストに対し超音波を照射することで記憶を消去しペーストの状態を初期化することに成功した^[6]。この結果を適用すると特定の方向に割れやすい異方的な構造を均一化・一様化して割れにくい構造へと制御できるので、今後工学的にも大きな応用が期待される。

謝辞

本研究は、平成 28-30 年度 科学研究費補助金・基盤研究(C)16K0548 「ペーストの記憶の外的擾乱に対する非線形応答を用いた破壊と材料物性の制御」、平成 27-28 年度 学術振興会・二国間共同研究事業・ハンガリー(HAS)との共同研究「外場による塑性変形の関与する破壊のメカニズムとその制御」、平成 28 年度 日本大学理工学部研究助成金「超音波照射による固液混合材料の記憶の消去と材料の破壊強度の強化への応用」の助成を受けて実施された。

参考文献

- [1] 中原明生, 松尾洋介, 大信田志志: 「ペーストの記憶効果と破壊の制御への応用」, 日本物理学会誌, Vol. 70, No. 3, pp. 179-187 (2015)
- [2] Lucas Goehring, Akio Nakahara, Tapati Dutta, So Kitsunozaki and Sujata Tarafdar: *Desiccation Cracks and their patterns: Formation and Modelling in Science and Nature*, WILEY-VCH (2015).
- [3] So Kitsunozaki, Akio Nakahara and Yousuke Matsuo: “Shaking-induced stress anisotropy in the memory effect of paste”, *Europhysics Letters*, Vol. 114, pp. 64001-1 ~ 64002-6 (2016).
- [4] So kitsunozaki, Arina Sasaki, Akihiro Nishimoto, Tsuyoshi Mizuguchi, Yousuke Matsuo and Akio Nakahara: “Memory effect and anisotropy of particle arrangements in granular paste”, *European Physical Journal E* (採択済み).
- [5] Zoltan Halasz, Akio Nakahara So Kitsunozaki and Ferenc Kun: “Effect of disorder on shrinkage-induced fragmentation of a thin brittle layer”, *Physical Review E*, Vol. 96, pp. 033006-1 ~ 033006-9 (2017) (selected as Editors' Suggestion).
- [6] Akio Nakahara, Ryota Yoneyama, Maruto Ito, Yousuke Matsuo and So Kitsunozaki: “Erasure of memory in paste by irradiation of ultrasonic waves”, *European Physical Journal: Web of Conferences*, Vol. 140, pp. 12007-1 ~ 12007-4 (2017).