

膨張材を添加したセメントペーストの拘束環境下における極若材齢時における機械的性質の経時変化に関する基礎的検討

Fundamental Study on the Time Development of Mechanical Properties of Cement Paste with Expansive Additives at Very Young Age under External Restraint

名古屋大学 准教授 五十嵐豪

(研究計画ないし研究手法の概略)

・研究計画

コンクリートの乾燥収縮ひび割れを抑制する方策の一つとして、膨張材(記号: EA)を使用する方法が一般的になりつつある。ただし、過剰に投入された場合、強度低下を引き起こすことがあるため、膨張発現と外部拘束効果を十分に理解した調合設計が求められる。

膨張材の膨張発現は、硬化中、硬化初期に生じるが、このような極若材齢における膨張発現は、埋め込み型ひずみ計などによって取得可能である一方、剛性発現は、一般的な測定手法である円柱供試体などを用いた圧縮試験中のひずみ測定では、ある程度硬化していることが求められることや、外部拘束を保持したままの試験は困難であることなどが課題として挙げられる。以上の背景から、打ち込み直後からの極若材齢における膨張材の作用メカニズムの理解のために、外部拘束を保持したまま硬化以前の剛性変化を取得方法の確立を試みた。

・研究手法 (実験概要)

EMM-ARM (E-modulus Measurement through Ambient Response Method)

EMM-ARM は、University of Minho の Miguel Azenha 博士によって開発された非破壊による連続的に剛性を取得する手法である¹。測定原理としては、片持ち梁状の容器に測定対象(スラリー状でも可)を入れ、連続的な外部加振による加速度応答により得られる固有振動数から剛性を取得する。測定のセットアップの写真を図-1に示す。本検討では、膨張材を添加したセメントペーストの外部拘束の有無を取得できるように拡張を試みた。



図-1 EMM-ARMの測定セットアップ

¹ Azenha, M., Ramos, L. F., Aguilar, R., and Granja, J. L. (2012). "Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application." *Cement and Concrete Composites*, 34(7), 881-890.

外部拘束なし

自己膨張を生じる材料を取り扱う場合、測定容器を充填することは、少なからず、外部拘束の発生を意味する。したがって、自由膨張を抑制しないように、Azenha の提案手法を発展させ、測定容器への充填量を半分にして測定した。

外部拘束あり

自己膨張を生じる材料を取り扱う場合、測定容器を充填することによって、容器による外部拘束を生じる。したがって、自己膨張によって生じる膨張圧によって、測定容器が破壊を生じないように、Azenha の提案手法を発展させ、測定容器の材質をアクリルからアルミニウムに変更して測定した。本検討では、測定手法の構築に注力するため、外部拘束の有無のみの比較を実施したが、例えば、外部拘束の程度による材料の挙動を測定したい場合には、測定容器の厚みなどの変更により外部拘束の剛性を変化させることにより可能である。

測定環境

加速度の測定には、セラミクス加速度計(PCB Piezotronics Model 352B, 測定感度 102 mV/(m/s²), 測定範囲, ±49.1 m/s² pk, 分解能 0.0008 m/s² rms, 周波数範囲:2-10,000 Hz, 質量 24.25 g)を片持ち梁状の容器の先端(自由端側)に取り付け、データ収集周波数 1,000 Hz で、10分ごとに132秒の時間間隔で垂直方向の振動を材令7日まで取得した。外部加振は、小型サーキュレータによって与えた。

(実験調査によって得られた新しい知見)

ヤング率の発現

外部拘束なし

外部拘束なしの状態での膨張材の置換率(結合材の内割0, 10, 15%)を変えた水結合材比0.40のセメントペーストのヤング率の経時変化を図-2に示す。図には、本検討で改良した EMM-ARM による測定結果に加えて、一般的なヤング率の測定手法である圧縮試験中のひずみ測定と縦振動の一次共鳴振動数の測定から得られた結果を併せて示している。

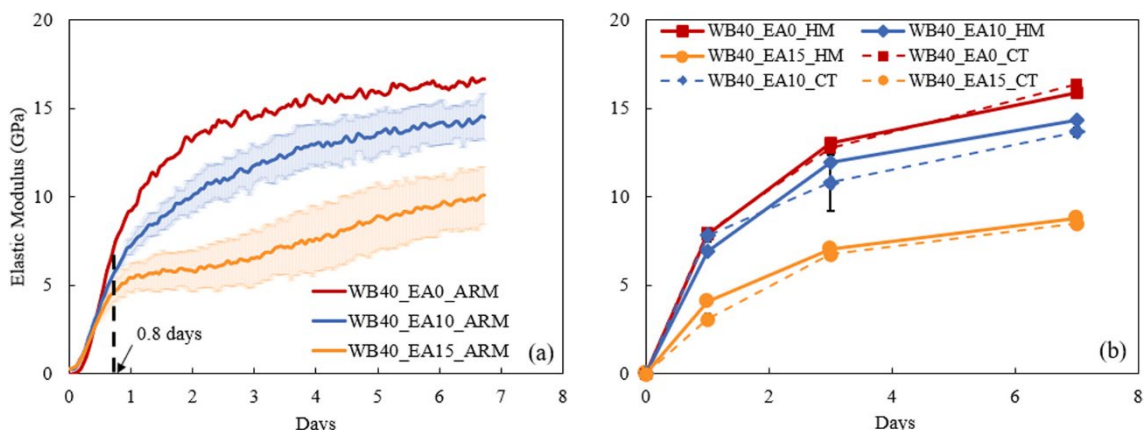


図-2 外部拘束なしでのヤング率の経時変化

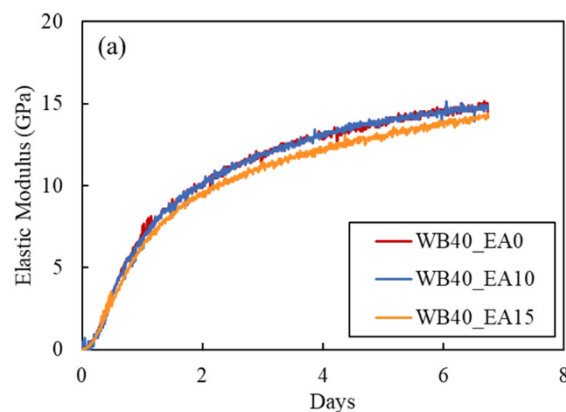
(凡例 ARM : EMM-ARM, HM : 共鳴振動法, CT : 圧縮試験)

図に示されるように、EMM-ARMによって得られたヤング率は、一般的な測定手法である圧縮試験や一次共鳴振動数による値と対応していることが確認された。EMM-ARMによる手法は、非破壊かつスラリー状を対象としても測定できるため、打ち込み直後(グラフの原

点) から剛性の発現を取得可能であることが強みであるといえる。本検討では、外部拘束なしの状態において膨張材の置換により材齢の進行に伴って、ヤング率の増進が停滞していることが確認された。

外部拘束あり

外部拘束ありの状態での膨張材の置換率（結合材の内割 0, 10, 15%）を変えた水結合材比 0.40 のセメントペーストのヤング率の経時変化を図－ 3 に示す。図－ 2 と図－ 3 の比較によって示されるように、外部拘束ありの状態で得られたヤング率は、外部拘束なしの状態とは異なり、膨張材の置換によらずほぼ同じ経時変化を示した。本検討では、通常の膨張コンクリートとは異なり、大量の膨張材の置換や、セメントペーストではあるが、膨張材の使用時の適切な外部拘束を与えることが重要であることが示唆された。



図－ 3 外部拘束ありでのヤング率の経時変化

拘束状態の膨張挙動および拘束応力

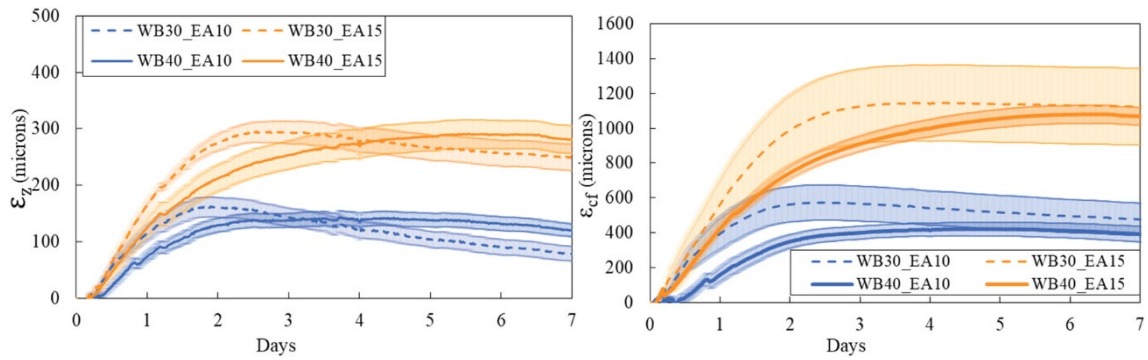
測定容器の表面に片持ち梁の軸方向とその直交方向にワイヤストレインゲージを貼付することにより、拘束状態の膨張挙動と膨張から算出される拘束応力を算出した。測定のセットアップの写真を図－ 4 に示す。



図－ 4 拘束状態のひずみの測定セットアップ

拘束状態の膨張挙動

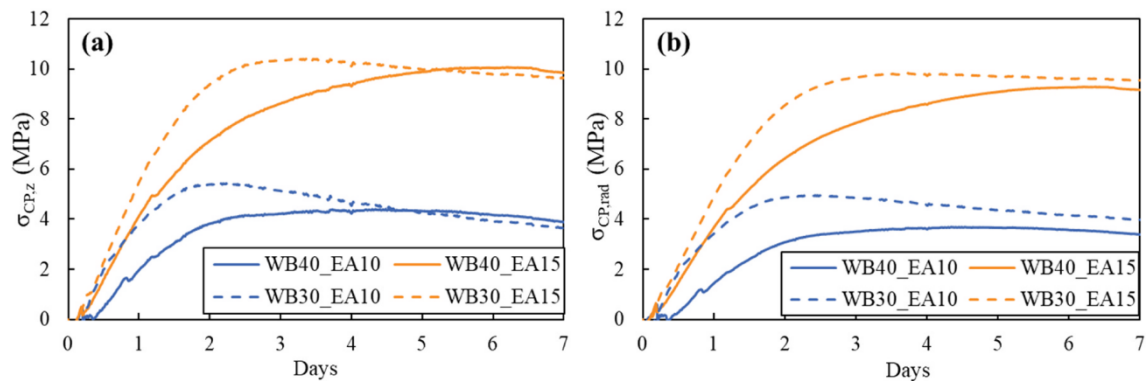
図－ 5 に拘束状態の膨張ひずみの経時変化を示す。なお、水結合材比 0.30 の結果も併せて示している。図に示されるように、膨張材の置換率の増加によって、膨張ひずみが増加している傾向が確認できる。



図一 5 拘束状態の膨張ひずみの経時変化（左：軸方向，右：軸直交方向）

拘束応力

図一 6 に拘束状態の膨張ひずみから算出した膨張材を置換したセメントペーストに作用している拘束応力の経時変化を示す。なお，水結合材比 0.30 の結果も併せて示している。図に示されるように，膨張材の置換率の増加によって，拘束応力が増加している傾向が確認できる。



図一 6 拘束応力の経時変化（左：軸方向，右：軸直交方向）

まとめ

本検討では，打ち込み直後からの極若材齢における膨張材の作用メカニズムの理解のために，外部拘束を保持したまま硬化以前の剛性変化の取得方法を確立した。

（ 発 表 論 文 ）

- [1] M. Gupta, G. Igarashi, Y. Takahashi, T. Ishida, Multiscale expansion modeling of concrete with free lime-based expansive additives under isotropic conditions using poromechanics, *Journal of Building Engineering*, 77 (2023).
- [2] M. Gupta, G. Igarashi, Y. Takahashi, J. Granja, M. Azenha, T. Ishida, Effect of expansive additives and external restraint on the early age mechanical properties and microstructure of cement paste, *Construction and Building Materials*, 422 (2024).