

農業副産物を活用した環境親和性材料の創出と非破壊試験法の開発

島本由麻（東京農工大学 大学院農学研究院）

simamoto@go.tuat.ac.jp

安定して食糧を生産するためには、農業用排水路、ダム、頭首工といった農業水利施設を適切に維持管理することが必要不可欠である。近年、農業水利施設は長期供用に伴い、劣化や損傷が進行している。既存施設が現状においてどのくらい損傷しているのかを明らかにすることは、施設の補修・補強・更新を決定するうえで重要な視点である。そこで、本報では、農業水利施設の主要な構造材料であるコンクリートを対象として、演者が取り組んでいる Acoustic Emission (AE) 法を用いた損傷度評価法の開発について紹介する。

加えて、環境配慮への積極的な取り組み姿勢が問われる昨今、SDGs（持続可能な開発目標）の一つである農村地域の持続的な保全を実現するためには、コンクリートに代表される既存材料ばかりでなく、より環境親和性を有する構造材料（以下、環境親和性材料と記す）を提案・開発していくことが必要であると考えられる。演者は農業副産物である「もみ殻」および「稲わら」を有効活用した環境親和性材料を地域資源の循環の観点から開発している。このことについても合わせて概要を紹介する。

はじめに

農業水利施設の問題点として、施設の老朽化の進行や豪雨・地震に対する脆弱性を挙げることができる。1980年代に集中的に整備された農業水利施設は、建設から40年以上が経過した施設が多く、老朽化が進んでいる。耐用年数を迎える施設は1995年頃においては150か所程度であったが、その後年々増加し、2005年以降は年間400~500か所と1995年の約3倍に増加している(図-1)¹⁾。老朽化に伴い、農業水利施設の突発事故件数も年々増加傾向を示している。2015年以降は年間1,000件を超える事故が発生している¹⁾。耐用年数を超過した農業水利施設は今後も毎年蓄積し、それに伴い突発事故も増加するものと予想される。さらに、日本では、標準耐用年数の期間内においても地震災害など構造部材に損傷が蓄積される機会が多く、寒冷地においては凍結融解作用などの影響も考慮する必要がある。写真-1は竣工後50年が経過した農業水利施設においてひび割れ損傷が顕在化した事例である。以上から、コンクリートの損傷度評価法の開発が強く求められて

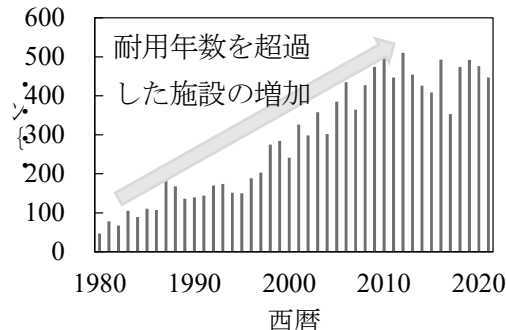


図-1 耐用年数を超過した農業水利施設の施設数の推移¹⁾

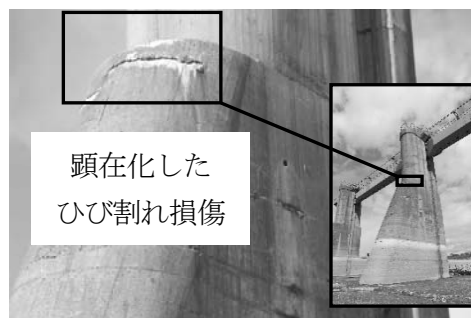


写真-1 農業水利施設におけるひび割れ損傷の顕在化

いる。

既存施設から採取したコンクリート・コアを用いた力学試験の問題点

コンクリートの損傷度評価においては、コンクリート・コアを用いた力学試験によって圧縮強度から材料損傷が同定されている。このことは、非破壊検査により現地で計測した試験値を評価（無損傷～損傷～極度な損傷蓄積）するために、非破壊試験指標と破壊試験指標との比較検証が不可欠であることが技術的な背景としてある。コンクリートに代表される構造材料は一般的に均質であることを前提に計画・設計が行われる。しかしながら、損傷現象の最も特異的な点は、その規模や分布、特性が材質に加えて設置環境や構造断面の影響を受けることにある²⁾。コンクリート・コアを用いた力学試験は、施設実態を評価するうえで不可欠であるが、サンプルの採取位置やその規模（サンプルサイズ、供試体寸法）により非破壊検査との評価値の整合が取れない場合がある。この技術的課題は十分に解決策を得ているとは言い難いのが現状である。そこで、演者は AE 法を用いることで、コンクリート内部で発生する局所破壊の進行を同定し、従来の圧縮強度のみでは評価できない損傷実態を明らかにすることを試みている³⁾⁵⁾。

AE 法を用いたコンクリート損傷度評価法の開発

AE とは固体材料内部の微小な破壊あるいはそれと同様なエネルギー解放過程において発生する弾性波動現象である。本手法は計測対象から発生する弾性波を受動的に受信し、その特性から損傷や破壊過程を評価するものである。実験においては、図-2 に示すようにコンクリートに AE センサを設置し、荷重過程で発生する弾性波を捉えている。

演者は AE パラメータの一つである AE エネルギーに着目し、コンクリートの内部損傷と AE エネルギー特性との関連を検討している。内部損傷はコンクリート・コアを X 線 CT 法により可視化し、例えば空隙表面積等の幾何学的特徴量を抽出することで定量化している。検討の結果、初期 AE エネルギーと空隙表面積との間に強い正の相関が示された（図-3）⁴⁾。このことから、荷重初期における高エネルギー強度の弾性波の発生がひび割れの発生や進展と密接に関連していることが明らかとなった。

荷重過程での AE エネルギー特性に着目すると、無損傷コンクリートと損傷を有するコンクリートでその特性が大きく異なった。無損傷コンクリートでは、一連の荷重過程で規模の異なる複数の AE エネルギー放出が検出された。複数の AE エネルギーのピーク値は、各ひずみレベルにおいて圧縮破壊が

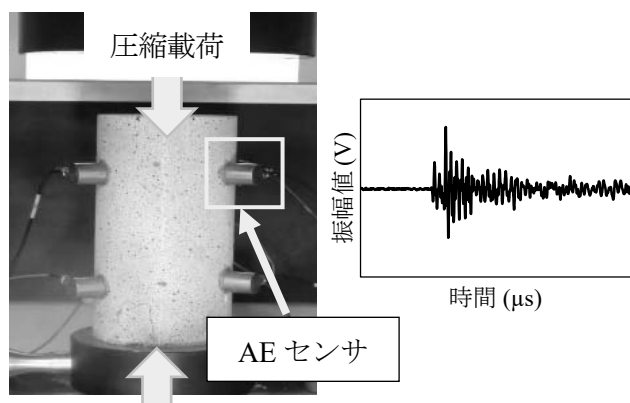


図-2 AE 法を導入した圧縮強度試験と検出波の例

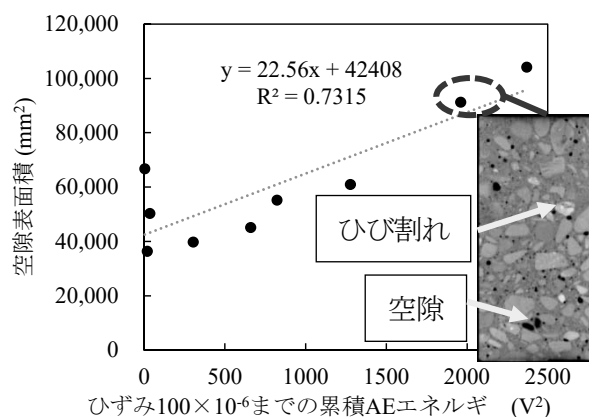


図-3 初期 AE エネルギーと空隙表面積の関係とコンクリートの X 線 CT 画像の一例

段階的に進行したものを検出していると推察され、コンクリートの圧縮破壊に関する理論⁶⁾と一致している。一方、損傷を有するコンクリートにおいては、载荷初期から大きなAEエネルギー放出が確認された。損傷を有する供試体は圧縮強度において基準値を上回っていたが、本結果からひび割れ損傷の蓄積が進行していたと推察できる。

以上のように、AEエネルギーに着目することで、圧縮強度では明らかにすることが難しいコンクリートの損傷度を評価できる可能性が示された。AE計測の特徴として1秒間に100万回にも及ぶ高いサンプリングレートを挙げることができる。このような大規模なデータには多くの有益な情報が含まれる一方、必要なデータを取捨選択することが重要な課題である。現在、日本と同様に地震多発国であるトルコ共和国・エーゲ大学との国際共同研究を通じて、機械学習を用いた有用なAEパラメータの選定や評価精度の向上について検討を進めている⁵⁾。

損傷が極度に進行した構造物では、上記のようなコンクリート・コアの採取が困難な場合も多い。この場合、現地での非破壊試験により損傷度が評価される。しかしながら、大規模農業水利施設は広大な面積を有しており、非破壊試験は限られた範囲でしか実施できないのが実情である。演者は内部の損傷状況の評価するとともに、広範囲の非破壊試験による評価が可能な空撮画像を用いた外観調査手法の開発にも取り組んでいる。今後、破壊試験と非破壊試験を適切に組み合わせることで、より詳細な損傷度評価を可能とし、既存の農業水利施設における適切な維持管理を実現していきたいと考えている。

農業副産物を活用した環境親和性材料の開発

農業農村地域の持続的な発展を目指すうえで、地域資源を活用した環境親和性材料の開発が必要だと考えられる。演者はこの地域資源の中でも東アジア地域で広く栽培されている稲に着目し、その副産物である「もみ殻」および「稲わら」を有効活用した環境親和性材料の開発に取り組んでいる(図-4)。

稲わらは材料の靱性向上に寄与する。もみ殻は灰化し「もみ殻灰」として混和することで、もみ殻灰がセメントと化学反応(ポゾラン反応)し、構造材料の化学的抵抗性や長期強度を増大させる。開発材料は農業副産物を有効活用しに役立つという側面ばかりでない。もみ殻の灰化過程において創出される電気・熱エネルギーをビニールハウスの加温等、農業施設で再利用しており、エネルギーの創出という利点も有している(図-4)。実際に稼働しているもみ殻ガス化プラントを事例に二酸化炭素排出量を試算すると、もみ殻を活用することで1機あたり年間47tもの二酸化炭素排出量が削減できることが明らかになった⁷⁾。

材料設計にあたっては、現在、もみ殻灰の混和率を変化させ、材料強度および構造材料の破壊過程を評価している。破壊過程の評価においては、AEエネルギーや破壊力

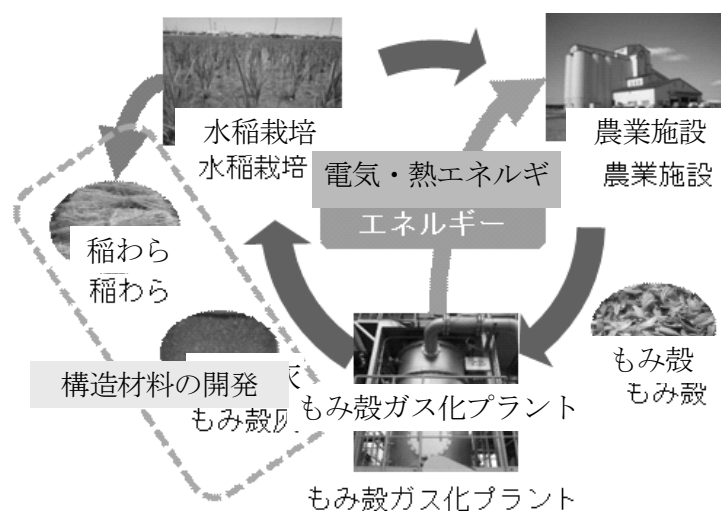


図-4 農業副産物を循環利用した材料開発

学指標を新たに導入し最適な混和率を検討している。加えて、稲わらとマトリックスとの界面付着性を向上させるべく、環境に配慮した化学処理法についても合わせて検討を進めている。

おわりに

農業農村工学とは食料生産や地域の環境保全に資する技術開発を目的とした分野である。そのような分野で「材料」を一つのキーワードとして、コンクリートの損傷度評価法や農業副産物を活用した環境親和性材料の開発に取り組んでいる。材料は配合条件や形状等によって様々な機能を発揮することができる。今後これらの研究をさらに深め、環境保全や農村地域の持続的な発展に貢献できるように努めたい。また、農業農村工学はその名のとおり農学と工学の融合分野である。現在行っているエーゲ大学・工学部との国際共同研究のような農工連携による研究活動を精力的に展開し、日本の学術研究の発展に寄与できるように努めたい。

謝辞

公益社団法人農業農村工学会からご推薦を頂き、栄えある本賞を授賞することができました。平松和昭会長、小泉健専務理事をはじめ、関係の諸先生方に厚く御礼申し上げます。本研究は東京農工大学、北里大学、新潟大学にて行われたものです。学部時代から現在に至るまで、多くのご指導ご鞭撻を賜っている鈴木哲也先生に拝謝申し上げるとともに、論文連名著者の先生方、共同研究や現場等でお世話になった関係者の皆様に御礼申し上げます。最後となりますが、本研究を支えてくださいました研究室のメンバーに心から感謝いたします。

引用文献

- 1) 農林水産省：農業水利施設におけるストックマネジメントの取組について、
https://www.maff.go.jp/j/nousin/mizu/sutomane/attach/pdf/sutomane_230322.pdf (2023)
- 2) Lemaitre, J.: A Course on Damage Mechanics, Springer-Verlag, Berlin (1992).
- 3) Morozova, N., Shibano, K., Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T.: Frost Damage Evaluation of Concrete Irrigation structure by X-ray CT and AE Energy Release Trend at the Initial Loading Stage, *Case Studies in Construction Materials*, 18, doi: 10.1016/j.cscm. 2023.e02088 (2023).
- 4) Shimamoto, Y. and Suzuki, T.: Damage Evaluation of Heavily Cracked Concrete by Initial AE Energy Parameter, *Advanced Experimental Mechanics*, 5: 122-127, doi: 10.11395/aem.5.0_122 (2020).
- 5) Shimamoto, Y., Tayfur, S., Alver, N. and Suzuki, T.: Identifying Effective AE Parameters for Damage Evaluation of Concrete in Headwork: A Combined Cluster and Random Forest Analysis of Acoustic Emission Data, *Paddy and Water Environment*, 21: 15-29, doi: 10.1007/s10333-022-00910-w (2022).
- 6) 日本材料学会：第2章確率モデルの基礎理論，材料強度の確率モデル（2012）。
- 7) Shimamoto, Y. and Suzuki, T.: Recycle of Rice Husk into Agro-Infrastructure for Decreasing Carbon Dioxide, *Paddy and Water Environment*, 17(3): 555-559, doi: 10.1007/s10333-019-00752-z (2019).