

一般財団法人新潟県建設技術センター
研究助成事業

報 告 書

令和2年3月

新潟大学自然科学系（農学部）

鈴木哲也

1. 概要

本報告書は、一般財団法人新潟県建設技術センター令和元年度研究助成事業に係わる研究成果を取りまとめたものである。

1-1. 申請課題名

弾性波計測によるコンクリート構造物の損傷度診断法の開発

～弾性波を用いた圧縮強度試験の高度化によるコンクリート損傷度診断～

1-2. 申請者

新潟大学自然科学系（農学部） 教授 鈴木哲也

1-3. 研究目的

本申請は、弾性波計測と画像解析を組み合わせたコンクリート損傷度評価法の開発を提案することを目的とする。特に新潟県建設技術センターなどにおいて頻繁に行われている圧縮強度試験に開発手法を適用し、一般的に行われている圧縮強度試験でコンクリート損傷度を定量的に評価診断する検査手法を開発する。

1-4. 研究成果

本申請課題に関連する研究成果を以下に列挙する。

(1) 論文

- 1) Tetsuya Suzuki, Saki Nishimura, Yuma Shimamoto, Tomoki Shiotani and Masayasu Ohtsu: Damage Estimation of Concrete Canal due to Freeze and Thawed Effects by Acoustic Emission and X-ray CT Methods, *Constructions and Building Material*, 2020 (accepted).
- 2) 鈴木哲也, 島本由麻：鉄筋コンクリート表層に発達した欠陥の非破壊検出に関する基礎的研究，*農業農村工学会論文集*，2019（掲載可）
- 3) 鈴木哲也，島本由麻，西田浩之，大嶋雅光：ひび割れ損傷の顕在化した補修コンクリート水路橋の実態評価，*コンクリート工学年次論文集*，Vol. 41, No.2, pp. 1345-1350, 2019.
- 4) Tetsuya Suzuki and Yuma Shimamoto: On-site damage evaluation of cracked irrigation infrastructure by acoustic emission and related non-destructive elastic wave method, *Paddy and Water Environment*, Vol. 17, No.3, pp. 315-321, 2019.

(2) 口頭発表

- 1) 野村麻由子，島本由麻，鈴木哲也：弾性波エネルギーを指標としたコンクリート損傷度評価法の開発，平成31年度農業農村工学会講演会講演要旨集，CD-R，2019.
- 2) 島本由麻，鈴木哲也，馬場光久，杉浦俊弘：X線CT法によるひび割れ損傷状況の可視化・定量化，平成31年度農業農村工学会講演会講演要旨集，CD-R，2019.
- 3) 島本由麻，鈴木哲也，馬場光久，杉浦俊弘：機械学習を活用したX線CT画像処理によるひび割れ損傷の抽出，平成31年度農業農村工学会講演会講演要旨集，CD-R，2019.
- 4) Shimamoto, Y. and Suzuki, T.: Use of X-ray CT and Elastic Wave Method for Evaluation of Cracking Damage in Service Structure, the 14th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics, November 1-4, 2019, Tsukuba, Japan, pp. 71.

2. 研究成果（概要）

2-1. はじめに

材料損傷の蓄積は、有効断面の減少に伴う力学特性の低下として顕在化する¹⁾。既存施設の適切な維持管理には材料損傷の実態評価が不可欠であるが、その検査精度に関する議論は途上である。既往研究では SEM²⁾や X 線 CT³⁾による可視化が試みられており、いずれも計測手法の特徴を生かして数 μm 以上の損傷を対象に実証的検討が試みられている。日本国内では大塚ら^{4)~7)}に代表される造影剤を援用した X 線 CT 画像とひび割れ損傷の発達との関連や、橋本ら⁸⁾による X 線 CT による凍害コンクリートの空隙構造に関する詳細評価などを先行研究として確認することができる。コンクリート水利施設を対象とした検討には、石神ら⁹⁾による凍害損傷の顕在化したコンクリート水利施設より採取したブロック供試体中に発達したひび割れ損傷の X 線 CT 画像による可視化・定量化に関する試みや筆者^{10)~12)}によるひび割れの幾何学的特徴と圧縮応力場における AE (Acoustic Emission) 発生との関連に関する実証的検討を挙げることができ

る。いずれの先行研究においても、ひび割れ損傷の幾何学的特徴とコンクリート物性との関連について、より具体的な技術的議論の必要性を言及している。

本報ではひび割れ損傷が内在化しているコンクリート水利施設（竣工後 53 年経過）より採取したコア供試体を対象に、X 線 CT による損傷実態の可視化と圧縮応力場における AE エネルギー強度の関係から、損傷蓄積とコンクリート物性との関連について明らかにし、弾性波計測によるコンクリート構造物の損傷度診断法の開発に関する基礎的検討結果を報告する。

2-2. AE エネルギーの発生特性評価

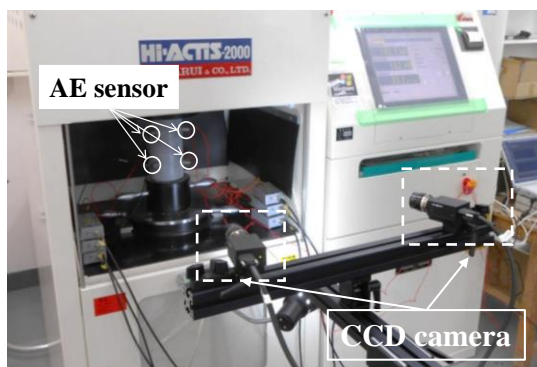
圧縮荷重過程の AE エネルギーの特徴量は、式(3)に示す AE エネルギー発生頻度割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみ ε の関係から、 $f_e(\varepsilon)$ のピーク値により評価する。

$$f_e(\varepsilon)\Delta\varepsilon = \frac{\Delta E_{AE}(\varepsilon)}{E_{AE}} \quad (3)$$

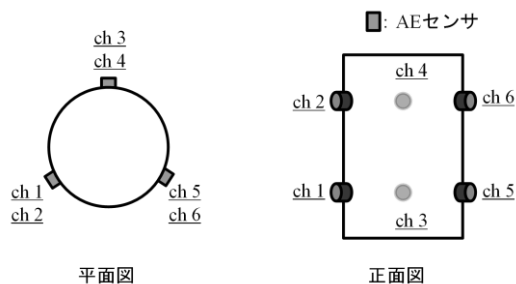
ここで、 $\Delta\varepsilon$: 単位ひずみ（本論では $20\ \mu$ ）、 Δ

表-1 示方配合（無損傷サンプル）

セメント	粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				AE 剤 (cc)	スランプ ^o (cm)	空気量 (%)
				W	C	S	G			
普通ポルトランド	25	47	35.7	154	328	656	1154	131	10	5



(a) AE 計測システム



(b) AE センサ設置位置

図-1 AE 計測条件

表-2 コンクリート力学特性一覧

Case 1, 無損傷サンプル (n=5)

圧縮強度 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)	弾性係数 (GPa)	λ	P 波速度 (m/s)
30.8 [21.0~38.0]	1,459 [795~1,860]	21.8 [19.7~26.4]	1.3 [0.5~2.8]	4,112 [4,056~4,166]

* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す.

Case 2, 既設コンクリートサンプル (n=14)

圧縮強度 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)	弾性係数 (GPa)	λ	P 波速度 (m/s)
15.1 [6.5~31.7]	605 [235~1,160]	26.2 [13.6~36.7]	3.1 [0.8~6.5]	3,978 [3,770~4,142]

$E_{AE}(\epsilon)$: 単位ひずみにおいて発生した AE エネルギー, E_{AE} : 一連の圧縮荷重過程で発生する総 AE エネルギーである.

ンプで行った. AE センサには 150 kHz 共振型センサを用いた.

2-3. 実験方法

(1) 供試コンクリート

供試したコンクリート・コアは, 1963 年に北海道において建設された既設コンクリート水利施設の側壁部と底版部より採取したものである. サンプルサイズは, $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ の円柱供試体が 14 本である. 実験に供試したコア供試体の端面は実験精度を確保する観点から端面に平滑化処理を施した. サンプルの外観目視の結果, ひび割れ損傷の顕著な顕在化は確認されなかった. 本研究では, 既設コンクリートサンプルとの比較を行うことを目的に実験室内で無損傷コンクリートを打設した (以後, 「無損傷サンプル」と記す). 配合設計の概略は, 水セメント比 47%, 空気量 5%, 粗骨材率 35.7%, スランプ 10 cm および粗骨材寸法 25 mm である (表-1).

(2) AE 計測を援用した圧縮強度試験

AE 計測は, 破壊過程における AE 発生頻度に加えて, AE 源の位置標定を試みた. 試験装置は SAMOS (PAC 社製) である. AE センサは, コンクリート・コアの側面部に設置した (図-1). 閾値を 42 dB とし, 60 dB の増幅をプリアンプとメインア

2-3. 結果および考察

(1) コンクリート物性

検討に用いたコンクリート・コアの力学特性を表-2 に示す. なお, 表中の損傷力学指標 λ は, 弾性係数の相対値であり, 標準的な圧縮強度試験 (圧縮強度 24 N/mm², 最大ひずみ 2,000 μ) の場合, $\lambda=1.0$ となり, 損傷蓄積に伴い λ 値は増加傾向を示す¹⁴⁾.

実験的検討の結果, 無損傷サンプルは, 圧縮強度 30.8 N/mm² (最大値~最小値: 21.0~38.0 N/mm²), 最大ひずみ 1,459 μ (796~1,860 μ), 割線弾性係数 21.8 GPa (19.7~26.4 GPa) であった. 損傷力学指標 λ は, 平均 1.3 (0.5~2.8) であった. 圧縮強度試験前に実施した P 波速度の計測 (条件: 入力周波数 54kHz, 超音波法 (透過法)) では, 平均値 4,112 m/s (4,056~4,166 m/s) であり, コンクリートの標準値である 4,000 m/s に近い値であった.

既設コンクリートサンプルでは, コンクリート・コアの目視調査の結果, 顕著なひび割れ損傷は確認されなかった. 圧縮強度 15.1 N/mm² (6.5~31.7 N/mm²), 最大ひずみ 605 μ (235~1,160 μ), 割線弾性係数 26.2 GPa (13.6~36.7 GPa) であった. 損傷力学指標 λ は, 平均 3.1 (0.8~6.5) であった.

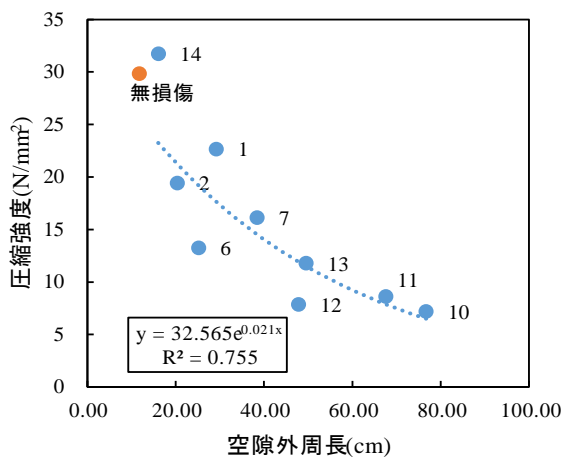


図-2 空隙外周長と圧縮強度の関係

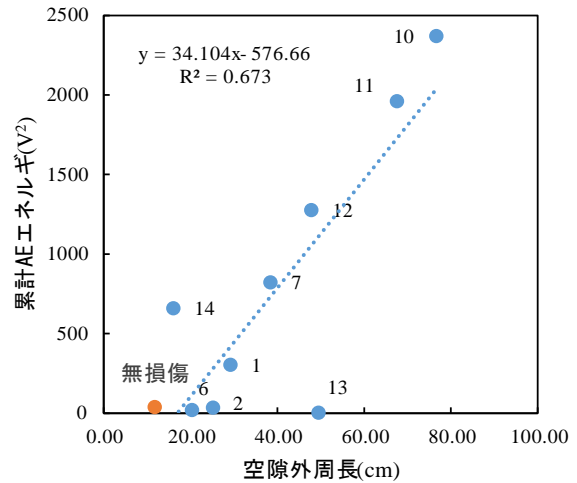
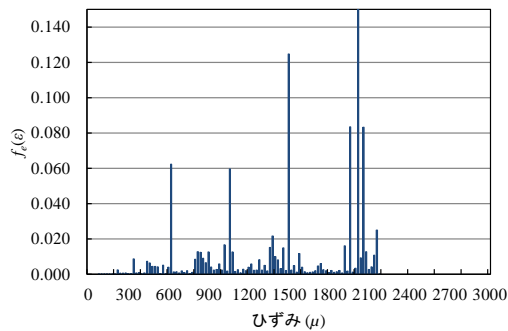
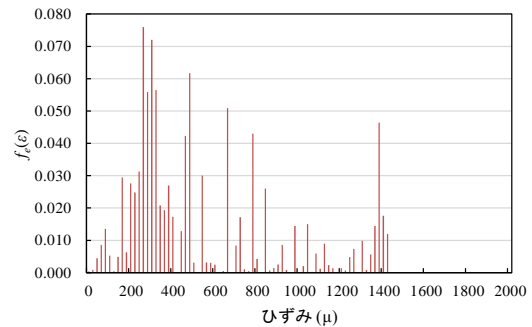


図-3 空隙外周長と累計 AE エネルギーの関係
(ひずみ 0~100 μ 区間)



(a) 無損傷コンクリート¹²⁾



(b) 既設コンクリートサンプル
(No. 14, 最大強度, 31.7 N/mm²)

図-4 AE エネルギー発生割合とひずみの関係

使用骨材などの材質が異なる既設コンクリートサンプルと無損傷サンプルとの単純比較は困難であるが、既設コンクリートサンプルでは、力学特性の最大値と最小値の範囲の増加傾向が確認された。損傷力学指標 λ においても同様に、既設コンクリートサンプルにおいて増加傾向が確認された。

コンクリート構造物の耐久性とひび割れ損傷との関係については、既往研究の多くがひび割れ発達の目視による幾何学的状況と強度特性について考察している。一例として幸左ら¹⁵⁾はアルカリ骨材反応によりひび割れの発達した T 型単柱式橋脚を対象に、ひび割れ損傷の発達形態とコンクリート・コアを用いた力学特性の関連について実証的検討を行い、ひび割れ密度と圧縮強度との負の相

関を明らかにしている。筆者の既往研究¹¹⁾においても、ひび割れ密度と圧縮強度との間に負の相関が認められ、幸左らの研究と同様の傾向が確認された。圧縮強度以外の物性値は、最大ひずみ 605 μ (平均値) であり、ひび割れ損傷の発達に伴う力学特性の低下が懸念される結果となった。

既存施設より採取したコンクリート・コアでは、農業水利施設であることから 21 N/mm² が基準強度となる¹⁶⁾。耐久性を必要とする場合は 24 N/mm² である¹⁶⁾。圧縮強度のみを基準値とした場合、強度特性が低下したコンクリートでは損傷を検出できるが、微細損傷のみで強度が低下していない供試体では無損傷と診断され、補修が遅れることになる。ひび割れ損傷が顕在化していない既設コンク

リートサンプルでは、基準値よりも高い圧縮強度を有する供試体では損傷蓄積を強度特性のみで精緻に検出することは困難であると考えられる。

(2) コンクリート特性と空隙の関係

図-2に空隙外周長と圧縮強度の関係を示す。なお、図中の無損傷サンプルは平均値を示す。既設コンクリートサンプルでは、耐久性を必要とする水利施設の標準強度 24 N/mm^2 を上回るものは、14サンプル中 1 サンプルのみであった。空隙外周長の増加は、コンクリート内部にひび割れ損傷が蓄積していることを意味しており、評価値の増加と圧縮強度の低下との密接な関連が示唆された。

図-3に空隙外周長とひずみ $0\sim 100\mu$ 区間における累計 AE エネルギーの関係を示す。累計 AE エネルギーとは、圧縮荷重過程において検出した AE のエネルギー評価を行い、その累計値を算出したものである。本検討では、検出波の最大振幅値の 2 乗を AE エネルギーとして評価した¹³⁾。損傷度評価における、ひずみ $0\sim 100\mu$ 区間の累計 AE エネルギーの意味は、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である。

検討の結果、無損傷サンプルと比較して、既設コンクリートサンプルにおいて空隙外周長の増加に伴い、荷重初期における AE エネルギーの増加が見られた。この関係性は、概ね圧縮強度と類似しているが、既設コンクリートサンプルにおいて最大強度を記録した No. 14 は、圧縮強度とは異なる傾向が累計 AE エネルギーにおいて見られた。これは、圧縮強度がコンクリートの圧縮荷重過程における最終破壊時の応力値であるのに対して、検出した AE のエネルギー強度は微視的な局所破壊過程を詳細に評価したものであり、圧縮強度と比較して、より詳細に供試コンクリートの材質を反映したものであると考えられる。

これらのことを踏まえて、荷重過程における AE

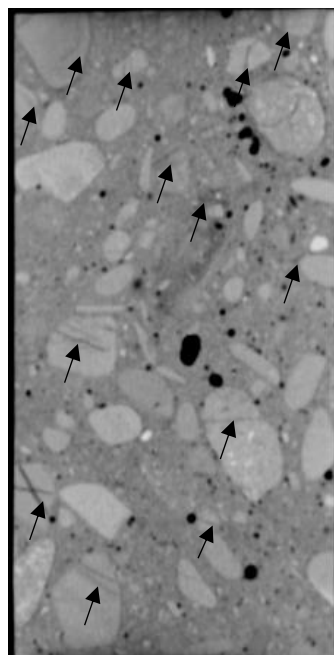


図-5 既設コンクリートサンプル No. 14
(→：ひび割れ損傷と推定される部位を示す)

エネルギー特性を考察した。図-4に AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係を示す。既往研究¹²⁾により評価した無損傷コンクリートの圧縮過程では、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。ひずみ 620μ 、 $1,060\mu$ 、 $1,500\mu$ および $2,020\mu$ において AE エネルギーが頻出した。本供試体の最大ひずみは $2,180\mu$ であることから、ひずみレベルの 28%、49%、69% および 93% である。複数の AE エネルギーのピーク値は、各ひずみレベルにおける圧縮破壊が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¹⁷⁾と一致し、本論で供試した無損傷サンプルにおいても同様の傾向が確認された。

それに対して、既設コンクリートサンプル No. 14 では、荷重初期から AE エネルギー放出が確認された。同様の傾向は、凍害によりひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアを用いた筆者らによる既往研究^{11), 12)}においても確認されている。このことから、既設コンクリートサンプルにおいても

コンクリート物性に及ぼす蓄積損傷の影響は明らかであり、圧縮強度が基準値を上回っていたとしても、ひび割れ損傷の蓄積は進行していたものと推察される。No.14 サンプルの X 線 CT 画像を図 - 5 に示す。X 線 CT 画像より、ひび割れ損傷の蓄積が明らかである。

これらのことから、既存施設の実態評価や補修工、補強工の選定に用いる圧縮強度などに加えて、AE エネルギー強度を用いることでより詳細な損傷度評価が可能になるものと推察される。その際、蓄積損傷の可視化と定量化には、X 線 CT 計測が有用であり、それらから求められたひび割れ指標とコンクリート物性との密接な関連から損傷度評価が可能であると推察される。

なお、今後の技術的課題としては図 - 5 に示す骨材中に発達したひび割れ損傷の原因やその発生時期等の情報と本論で議論したコンクリート損傷実態とを合わせるにより、精緻なコンクリート損傷度評価が可能になるものと推察される。

2-5. おわりに

本報では、ひび割れ損傷が内在化している竣工後 53 年が経過したコンクリート水利施設より採取したコア供試体を対象に、X 線 CT による損傷実態の可視化と圧縮応力場における AE エネルギー強度の関係から、蓄積損傷とコンクリート物性との関連について考察した。検討の結果、コンクリート物性に加えて、AE エネルギー強度を用いることでより詳細な損傷度評価が可能になるものと推察された。その際、蓄積損傷の可視化と定量化には、X 線 CT 計測が有用であり、それらから求められるひび割れ指標とコンクリート物性との密接な関連が示唆された。

参考文献

1) Kachanov, L. M.: Introduction to Continuum Damage Mechanics, MARTINUS NIJHOFF

PUBLISHERS, 1986.

- 2) Shi, X., Fay, L., Peterson, M. M., Yang, Z.: Freeze-Thaw Damage and Chemical Change of Portland Cement Concrete in the Presence of Diluted Deicers, *Materials and Structures*, 43, pp. 933-946, 2010.
- 3) Arambula, E., Garboczi, E. J., Masad, E., Kassem, E.: Numerical Analysis of Moisture Vapor Diffusion in Asphalt Mixtures using Digital Images, *Materials and Structures*, 43, pp. 897-911, 2010.
- 4) 大塚浩司：X 線造影撮影による鉄筋コンクリート内部の微細ひびわれ検出に関する研究，土木学会論文集，451，pp. 169-178，1992.
- 5) 武田三弘，大塚浩司：X 線造影撮影によるコンクリート劣化の数値化と凍結融解抵抗性の判定，土木学会論文集 E，62 (4)，pp. 728-738，2006.
- 6) 武田三弘，大塚浩司：X 線造影撮影によるコンクリート強度の推定，土木学会論文集 E，62 (2)，pp. 376-384，2006.
- 7) 武田三弘，大塚浩司：X 線造影撮影法によるコンクリートの性状評価手法の開発と応用，土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造)，68 (3)，pp. 146-156，2012.
- 8) 橋本勝文，横田弘，杉本隆文，吉川昂純：凍結融解作用を受けたモルタルの X 線 CT 撮影による空隙構造評価，材料，62 (8)，pp.492-497，2013.
- 9) 石神暁郎，佐藤智，中村和正，緒方英彦，周藤将司：X 線 CT によるコンクリート内部変状の評価，第 62 回農業農村工学会北海道支部研究発表会講演集，pp. 60-63，2013.
- 10) Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M. and Ohtsu, M.: Use of Acoustic Emission and X-Ray Computed Tomography for Damage Evaluation of

- Freeze-Thawed Concrete, Construction and Building Materials, 24, pp. 2347-2352, 2010.
- 11) Suzuki, T., Shiotani, T., and Ohtsu, M.: Evaluation of Cracking Damage in Freeze-Thawed Concrete using Acoustic Emission and X-ray CT Image, Constructions and Building Materials, 136, pp. 619-626, 2017.
 - 12) Shimamoto, Y. and Suzuki, T.: Detection of Cracking Damage in-Service Concrete by AE Energy Parameter, 2nd International RILEM/COST Conference on Early Age Cracking and Serviceability in Cement-based Materials and Structures - EAC2, Brussels, 2017.
 - 13) 日本非破壊検査協会編：3 AE パラメータ，アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp.22-35, 2008.
 - 14) 鈴木哲也：コンクリートの圧縮荷時の AE 発生挙動に基づく損傷度評価の試み，土木構造・材料論文集，30，pp.157-165，2014.
 - 15) 幸左賢二，久利良夫，川島恭志，三浦正嗣：ASR 構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究，構造工学論文集 A，55A，pp.1036-1047，2009.
 - 16) 農林水産省農村振興局整備部水利整備課施設管理室監修：第4章 鉄筋コンクリート構造物における適用，農業水利施設の機能保全の手引き，p. 54，2007.
 - 17) 谷川恭雄監修：第1章 圧縮荷重を受けるコンクリート，硬化コンクリートの性質，セメントジャーナル社，pp. 10-11, 2004.