

財団法人新潟県建設技術センター
研究助成事業

報 告 書

平成 28 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、財団法人新潟県建設技術センター平成 27 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

凍害損傷の発達したコンクリート構造物の物性特性を考慮した非破壊検査法の開発

1-2. 申請者

新潟大学自然科学系（農学部） 准教授 鈴木哲也

1-3. 研究目的

新潟県内の社会基盤施設は、寒冷地環境の影響により凍結融解作用による材料損傷の進行が懸念される。特にコンクリート構造物では、凍害損傷の進行に伴い耐久性能の低下のみならず、塩化物の浸透や中性化など他の劣化要因の促進が懸念される。

本研究では、申請者の研究蓄積のあるコンクリート材料の凍害損傷に関する非破壊診断を対象に、材料損傷特性を詳細に調査・診断するための X 線 CT 計測による画像解析と弾性波計測を組み合わせた非破壊検査法を開発することを目的としている。

1-4. 研究成果

本研究に関連する研究成果を以下に列挙する。

(1) 論文

- 1) **鈴木哲也** : X 線 CT 画像の空間統計処理に基づくひび割れ損傷の定量評価, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, Vol. 5, pp. 91-96, 2015.
- 2) **鈴木哲也**, 山岸俊太郎, 稲葉一成, 森井俊広 : 弾性波を用いた損傷コンクリートのひび割れ特性評価に関する研究, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 15, pp. 223-228, 2015.
- 3) 稲葉一成, 山岸俊太郎, **鈴木哲也**, 森井俊広 : X 線 CT 画像のポスト処理に基づくコンクリートのひび割れ特性の抽出, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, 15, pp. 343-349, 2015.
- 4) **Suzuki, T.**, Inaba, K., Yamagishi, S. and Morii, T.: Damage Evaluation of Concrete in a Historic Arch Bridge by Acoustic Emission, 新潟大学農学部研究報告第 67 巻 2 号, pp. 111-116, 2015.
- 5) **鈴木哲也** : AE 法を援用したひび割れコンクリートの損傷度評価, 非破壊検査, 64(6), pp. 267-273, 2015.
- 6) **鈴木哲也**, 山岸俊太郎, 塩谷智基, 大津政康 : ひび割れの顕在化したコンクリートの X 線 CT 画像と速度場の合成による定量的損傷度評価に関する研究, コンクリート構造物の最先端診断技術に関するシンポジウム論文集, pp. 47-54, 2015.

(2) 口頭発表

- 1) **鈴木哲也**, 山岸俊太郎: ひび割れ損傷の蓄積がコンクリートの圧縮破壊挙動へ及ぼす影響評価, 第 69 回セメント技術大会, CD-R, pp. 262-263, 2015.05
- 2) **鈴木哲也**: AE 指標に基づくひび割れ損傷の進行したコンクリートの圧縮破壊特性, 第 18 回応用力学シンポジウム講演概要集, pp. 231-232, 2015.05.
- 3) **鈴木哲也**, 山岸俊太郎, 塩谷智基, 桃木昌平, 小林義和: 弾性波動のトモグラフィ処理に基づくコンクリート損傷検出, 平成 27 年度農業農村工学会講演会講演要旨集, CD-R, 2015.
- 4) **鈴木哲也**, 塩谷智基: ひび割れコンクリートの局所損傷が AE 発生挙動に及ぼす影響評価, 土木学会全国大会第 70 回年次学術講演会講演概要集, CD-R, 2015.
- 5) **Suzuki, T.** and Shiotani, T.: Evaluation of X-ray CT Image Properties of Cracked Concrete by Spatial Parameter Analysis, ETNDT6, Emerging Technologies in Non-Destructive Testing 6, 27-29 May 2015, Brussels, Belgium
- 6) **Suzuki, T.**: Damage Estimation of Freeze-Thawed Concrete by AE and Three-Dimensional Image Analysis, International Conference of the Regeneration and Conservation of Concrete Structures, 1-3, June, 2015, Nagasaki, Japan.
- 7) **Suzuki, T.** and Ohtsu, M.: On-Site Damage Evaluation of Cracked Concrete by Acoustic Emission and Related Non-Destructive Techniques, NDT-CE2015, Berlin Germany, 2015.09.15-18.

2. 研究成果（概要）

2-1. はじめに

コンクリートに代表される脆性材料では、損傷度評価に圧縮強度試験など力学特性が頻繁に用いられている。その際、力学試験にはコンクリート・コアが主に用いられているが、長期供用下の既存施設において複数の試料を採取することは現実的ではなく、非破壊検査手法の構築が不可欠である。既存施設の性能評価には、構造材料中に発達した損傷と力学特性との関連を明確にすることで非破壊検査精度の向上が期待できる。

筆者らは圧縮強度試験に AE (Acoustic Emission) 計測を導入し、破壊の確率過程論と損傷力学によるコンクリート損傷の定量評価法を提案している^{1),2)}。既往研究では、凍害や甚大な地震動に伴う損傷蓄積が圧縮応力下の AE 発生挙動を変質させることを明らかにしている。一連の試験研究において提案した評価パラメータである相対弾性係数は、非破壊的に求める JIS A 1127 (2010)「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」³⁾に規定された相対動弾性係数と密接に関連していることを明らかにしている⁴⁾。これらのことから、破壊試験により求められる力学特性をコンクリート中の弾性波伝搬特性から非破壊的に評価できる可能性が明らかになっている。

本研究概要では、コンクリート中に発達する損傷特性を概説した後に、ひび割れ損傷状況の異なるコンクリートを対象に AE 法による圧縮破壊過程の詳細評価を試みた結果を報告する。それらを踏まえて、コンクリートの弾性波伝搬特性に基づく動弾性係数評価と AE 指標との関係から実構造物での非破壊損傷度評価への AE 法の応用事例を解説する。

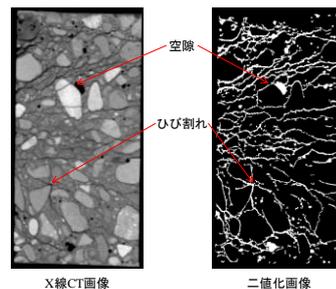


図1 X線CT画像によるひび割れ損傷の可視化

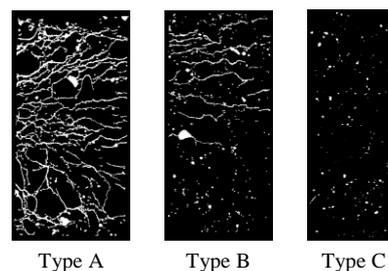


図2 二値化処理画像 (Type A~Type C)

2-2. コンクリートの圧縮破壊特性と非破壊損傷推定

(1) コンクリート損傷の特徴と X 線 CT による可視化・定量化

構造材料の損傷とは、破壊過程における空隙構造の発達と、これに起因する有効断面の減少に基づく力学特性の劣化であると定義できる⁵⁾。コンクリートは、モルタルと粗骨材とが不規則に分布する複合材料であり、その微視的構造はモルタル、粗骨材ならびにその遷移帯の3層で構成されている。遷移帯は、構成材ごとの弾性係数の相違から微視的なひび割れや欠損を多く含み、空隙率の上昇に伴い最弱層となる。コンクリート損傷は、主として微視的空隙を多く含む遷移帯とモルタル相から発生するが、その様相は負荷状態により大きく異なる。単軸引張りでは、骨材近傍の遷移帯で初期欠損を起点としたモード I 破壊 (引張り破壊) とモード II 破壊 (せん断破壊) の混合モードの多数の微視的なひび割れが発生する。微視的ひび割れは、モルタル相に発達し、載荷方向に垂直な巨視的ひび割れを引き起こす。単軸圧縮の場合には、載荷初期に粗

骨材界面においてモードⅡの微視的ひび割れが発生した後にモードⅠ破壊を発生させる。その後、これらの微視的ひび割れは、モルタル相中の混合モードのひび割れとなり、終局破壊に至る。いずれの荷重過程においても応力の増加に伴いひずみ量が上昇し、応力-ひずみ曲線において材質特性の概略は明らかになる。荷重過程にAE計測を導入することは破壊源の同定に加えて、その特徴を定量化できる利点がある。その際、ひび割れ損傷の幾何学的特徴を明らかにしておくことは破壊過程を詳細に理解するために必要である。コンクリート損傷をX線CT法により可視化した事例を図1に示す。図1は実構造物より採取したコンクリート・コアの荷重前の画像である。同図より、粗骨材界面やモルタル相にひび割れ損傷が発達していることが理解できる。

本研究では、ひび割れ損傷の度合いが異なる3種類のコンクリート・コアの比較からひび割れ損傷が物性値へ及ぼす影響を考察する。実験に用いたコンクリート・コアは、実構造物より採取したものである。本報では供試体をType AからType Cに分類し、試験結果を提示する。Type Aはひび割れ損傷がコア全域に発達した供試体（圧縮強度：5.3N/mm²（平均値））、Type Bはコア上層部にひび割れ損傷が顕在化した供試体である（圧縮強度：3.8N/mm²）。Type Cはひび割れ損傷が顕在化していない供試体である（圧縮強度：25.3N/mm²（平均値））。いずれの供試体も凍害損傷が進行する環境条件下で供用されていたものである。Type AからType Cの供試体は、X線CT法により内部構造を可視化した後にAE法による弾性波計測とデジタル画像相関法(DICM)を援用したひずみ場の非接触計測を組み合わせた圧縮強度試験から各タイプの破壊特性を評価した。

X線CT計測により取得したコンクリート・コアの断面画像を二値化処理した結果を図2に示す。

図中の白色部がひび割れ損傷である。Type Aにおいてひび割れの発達を確認できる。Type Cでは空隙のみであり、各タイプの損傷状況の相違を確認できる。コンクリート断面のひび割れや空隙分布の特徴を空間統計パラメータである集中度指数 I_0 ⁶⁾を用いて評価した(図3, 図4)。集中度指数 I_0 の算出は、二値化画像の白色部のピクセル数を区画法における点データとして検討した。その結果、区画面積の増加に伴い集中度指数 I_0 は低下する傾向にあることが確認された。近似式の傾き(以後、 c 値と記す)に着目するとType A: 7.24, Type B: 22.36, Type C: 153.15となった。 c 値はType Cにおいて最も高く、集中度指数 I_0 の変動が大きいことが確認された。Type Aの場合、各区画面積の集中度指数 I_0 が他のサンプルタイプと比較して低く、 c 値が最も小さいことが確認され、ひび割れ損傷の進行に伴い c 値の低下傾向が顕著となった。本研究では、 c 値と空隙率の関係からコンクリート断面のひび割れ・空隙の分布特性を評価した(図4)。同図において示した空隙率は、コンクリート断面の面積とひび割れおよび空隙の合計面積の相対値である。Type Aは空隙率2.3~17.0%, c 値6.07~58.7の範囲に分布していた。Type Cの場合、空隙率0.8~3.2%, c 値36.6~274.5の範囲に分布し、Type Aの分布範囲と重複していることが確認された。X線CT画像の二値化処理データから、ひび割れが局所的に発達した供試体と空隙がコア全域に発達した供試体は同程度の値を示すことが確認された。

以上のことから、コンクリート断面に発達したひび割れや空隙の面積に加えて、その分布特性を考慮することにより損傷の詳細評価が可能になる。その際、X線CTを活用することにより、ひび割れ損傷の評価精度は向上する。社会基盤施設の長寿命化には、検出されたひび割れ損傷と物性値の関係を定量化する必要がある。本報では、次節においてひび割れ損傷が明確になったコンクリート・コ

アを用いて、圧縮応力下の AE と変形挙動（応力 - ひずみ曲線）の観点から AE レートプロセス解析⁷⁾による定量的損傷度評価の試みを解説し、実構造物における破壊試験データと P 波速度を用いた非破壊試験との整合を実証的に検討した事例を示す。

(2) ひび割れ損傷コンクリートの圧縮応力下の AE 特性

長期供用下のコンクリート構造物においてひび割れ損傷が発達した場合、その力学特性や損傷領域の概定は既存施設の性能評価において不可欠である。本節では、コンクリートの圧縮応力下に発生する AE 特性から、ひび割れ損傷がコンクリート破壊挙動へ及ぼす影響を詳説する。図 5 に図 2 に示す Type A から Type C を対象とした圧縮荷重過程の AE 発生位置とひずみ分布を示す。なお、本図は荷重 9.8 kN (Type B, 応力レベル 30%), 16.3 kN (Type B, 応力レベル 50%) および 26.0 kN (Type B, 応力レベル 80%) における AE 発生源位置標定の結果と画像解析 (DICM) により求めたひずみ分布の合成画像である。図中のプロットは、AE パラメータである最大振幅値を位置標定の結果に反映させるため、最大振幅値 42~59 dB, 60~79 dB および 80~99 dB の 3 種に分類し、プロットサイズの異なる標記を行った。

Type A では最大振幅値 42~59 dB の AE が高頻度に検出され、コア中央部および損傷部分に変形が集中した。荷重過程の進行に伴い、AE はコア中央部に集中し、ひび割れが顕在化した部位では検出される AE が比較的少ないことが確認された。ひび割れ損傷の進展は、一次 AE や二次 AE が発生したとしても現存する気相部（ひび割れ損傷、空隙）に波動の伝搬が妨げられることから、荷重重の増加によりひび割れの進展が顕著になったことで AE の伝播が困難となり位置標定に必要な AE 源の検出ができなかったものと考えられる。同様の試験結果の考察は渡辺らの研究^{8), 9)}においても報告

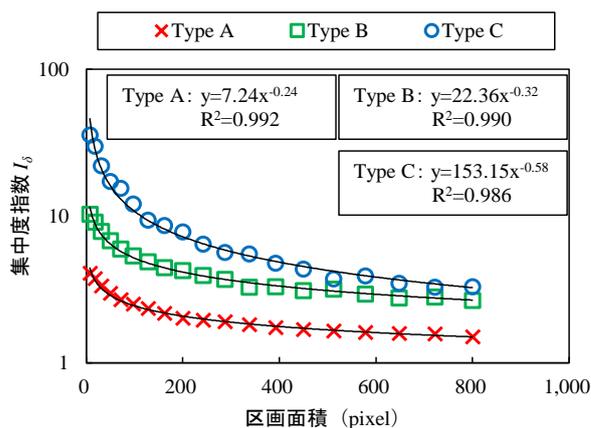


図 3 区画面積と集中度指数 I_δ の関係

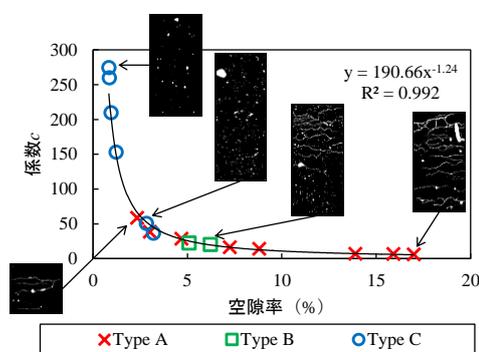


図 4 ひび割れ評価パラメータ (c 値) と空隙率の関係

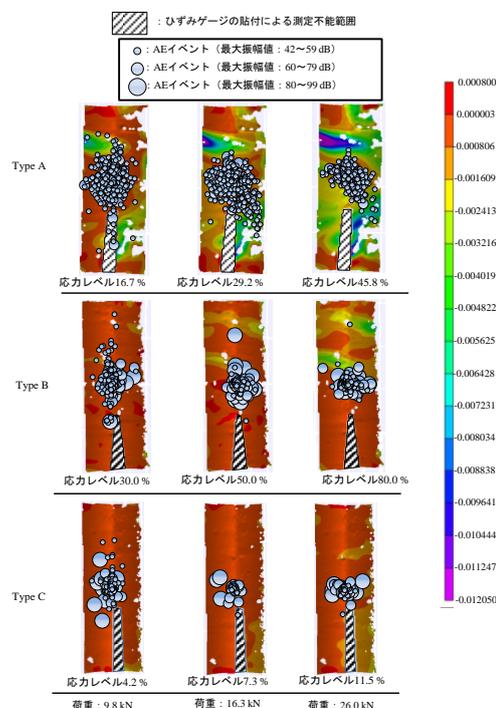


図 5 圧縮荷重過程の AE 発生位置とひずみ分布

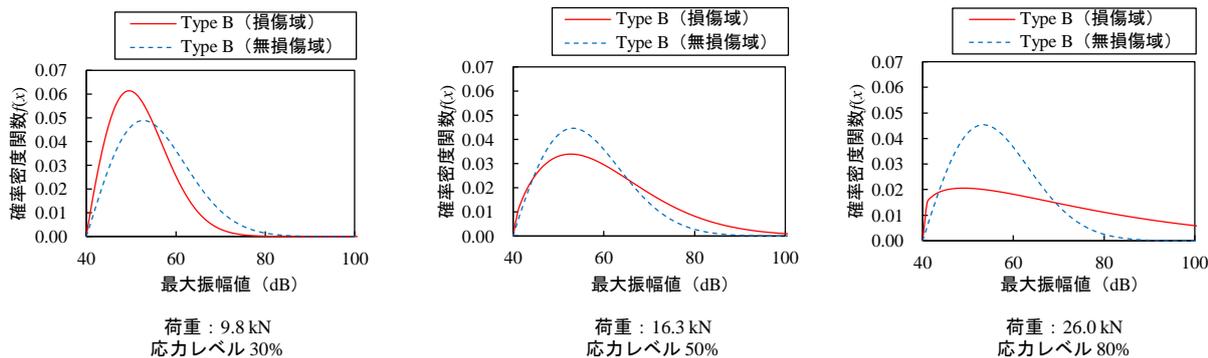


図6 最大振幅値の分布特性（ワイブル解析，Type B）

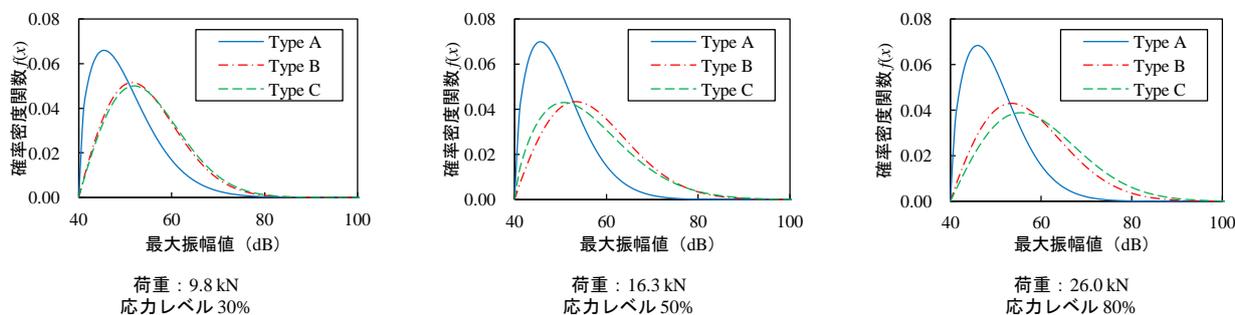


図7 最大振幅値の分布特性（ワイブル解析，Type A～Type C）

されており、ひび割れ損傷の発達したコンクリートの破壊試験では AE 源位置標定に加えて、AE パラメータによる定量評価を加えることにより破壊状況を詳細に把握できるものと考えられる。

そこで、AE 発生源位置標定より発生位置が明確になった AE の最大振幅値に着目し、最大振幅値の特性をワイブル解析により評価した（図6，図7）。

図6より、Type B では、ひび割れ損傷を有する部位 (Type B-1) とそれ以外の無損傷部位 (Type B-2) において検出される AE の特性が異なることが明らかになった。図7より、Type A は各荷重において、分布形状およびその範囲に変化はなく、最大振幅値約 45 dB に偏在していることが確認された。Type A はコア全域においてひび割れ損傷が進行した供試体であり、検出された AE はコア内部に現存するひび割れ挙動に影響を受けた二次 AE と考えられる。Type B および Type C では各荷重条件において、分布形状が類似していた。これは、Type B の

無損傷域において検出された AE（一次 AE）に影響を受けたものと考えられる。

以上のことから、長期供用下にあるコンクリート構造物の力学特性を評価する場合、圧縮強度など応力-ひずみ挙動の最大値のみに着目するのではなく、載荷過程における変形挙動の空間変動や AE 発生挙動の観点から検討を加えることが損傷状況を詳細に評価する観点から有効であるものと考えられる。

2-3. AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価

圧縮応力下の AE 発生挙動がひび割れ損傷の影響を受けていることが明らかになったことから、本節では検出した AE を破壊の確率過程論（レートプロセス論）¹⁰⁾に基づく処理を行い、定量的損傷度評価を試みた事例を示す。

(1) 破壊の確率過程論

複合材料の破壊問題は、一種の確率過程として

理解できる。破壊現象ないし材料の損傷過程は、本質的に統計的現象であり確率論的考察を無視して論ずることはできない。破壊の確率過程論（レートプロセス論）は、現象の進行を速度過程（rate-process）と考え、処理過程における対象とする現象の時間軸に沿った発生頻度を確率論的に取り扱う理論である。一例として横堀¹⁰⁾は、材料損傷について破壊の確率過程論を用いて、以下に示す 3 つの確率を定義し、考察している。

- 1) $m(t)$: 任意の時刻 t において単位時間に損傷が発生する確率
- 2) $m(t)dt$: 損傷が t から $t+dt$ の間に発生する確率
- 3) $P(t)$: 時刻 t まで損傷が発生しない確率

上記に示す 1) から 3) の定義から、時刻 t まで損傷が無く、次の dt で損傷が発生する確率は、

$$P(t)m(t)dt = -dP(t) \cdots \cdots (1)$$

であり、式 (1) は下式となり、現象の発生確率が速度過程であることが理解できる。

$$\frac{dP(t)}{dt} = -m(t)P(t) \cdots \cdots (2)$$

したがって、破壊の確率過程論は、物理ないし化学的現象を確率論的に評価する際に、確率過程の概念を導入することにより定量的評価を可能にしている。

(2) AE レートプロセス解析

コンクリートの圧縮応力下における AE 発生挙動は、確率過程論における定式化が可能である。AE の発生総数を N 、ひずみレベルを ε とし、AE 発生確率密度関数を $f(\varepsilon)$ とすると、 ε から $\varepsilon+d\varepsilon$ へのひずみ量の増分に対し、以下の式 (3) を導くことができる。

$$f(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{dN}{N} \cdots \cdots (3)$$

AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ に対して、本研究では次のような指数関数曲線を仮定する。

$$f(\varepsilon) = \alpha \cdot \exp(\beta\varepsilon) \cdots \cdots (4)$$

ここで、 α と β は定数である。

式 (4) において、 β 値が正ならばひずみレベルの低い段階で AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ が低いことを意味し、コンクリート材料が健全な状態であることが評価できる。 β 値が負ならば、ひずみレベルの低い段階で AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ が高いことを意味し、損傷が進行した材料であると評価することができる (図 8)。

既往の研究では、式 (4) を双曲線に仮定し、AE データベースの構築に基づく評価パラメータ（相対弾性係数）を開発している^{11), 12), 13)}。今日までに港湾構造物や道路橋 RC アーチ部材¹³⁾、各種コンクリート変質（凍害, ASR, 中性化, 摩耗損傷）などを対象に既存施設から採取したコンクリート・コアの AE レートプロセス解析による調査診断を行っている。なお、評価事例の詳細は参考文献を確認されたい。

(3) 凍害の顕在化したコンクリートの損傷度評価

本研究では、凍害損傷を事例にひび割れ損傷の指標である集中度指数 I_b の評価パラメータ c 値と AE レートプロセス解析から求められる β 値の関係から損傷蓄積が圧縮応力下の AE 発生挙動へ及ぼす影響を考察した (図 9, 図 10)。

図 9 は、AE レートプロセス解析の前提となる圧縮破壊過程の全 AE 発生挙動を図化したものである。図中の通常サンプルとは、実験室内で打設した無損傷コンクリート（28 日水中養生後）であり、健全な状態と言える。通常サンプルでは、載荷初期

に AE は微弱な発生に留まり、終局時に頻発する。これは図 8 に示すモデルの仮定と一致するものである。Type B では荷重初期に AE が頻発し、Type A では通常サンプルや Type B、C とは異なる AE 発生挙動を示した。AE レートプロセス解析は、これら AE 発生挙動の特徴を評価パラメータとし算出するものである。図 10 は、Type A から Type C を対象に c 値と β 値の関係を示したものである。同図よりひび割れ損傷の進行したコンクリート・コアでは β 値が低下し、“損傷を有する”と判断できる $\beta < 0.0$ の範囲に評価値 (Type A, Type B) が確認された。二値化画像との関係から、ひび割れ損傷の進行したコンクリート・コアでは、 β 値と c 値が低下する傾向が確認され、圧縮破壊挙動で発生する AE とひび割れ損傷との関連が示唆された。

筆者らの AE レートプロセス解析に関する研究では上記検討結果を踏まえて β 値と P 波速度の関係から非破壊損傷度評価を試みている⁷⁾。標準的なコンクリートの P 波速度は 4,000 m/s¹⁴⁾ であり、損傷蓄積により低下する。筆者らは、非破壊試験の指標として P 波速度を用い、破壊試験指標 (図 11 では損傷パラメータと記す) として AE 指標である β 値、応力 - ひずみ挙動の指標である λ 値を用いることで破壊試験と非破壊試験の関連性を検討した。なお、 λ 値の定義式は以下となる。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 E_0 : 初期接線弾性係数、 E_c : 最大応力時の割線弾性係数である。

検討結果を図 11 に示す。図中のカラーコンターは実構造物から採取した 25 本のコンクリート・コアを含む 57 供試体での検討結果である。図中の損傷領域、無損傷領域および中間領域は、 β 値と λ 値の特性から定義した損傷度評価区分である。実験的検討の結果、P 波速度の平均値は、無損傷領域

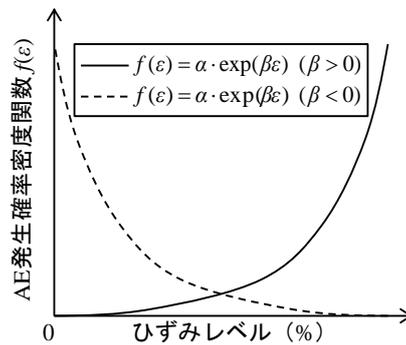


図 8 AE 発生確率密度関数 $f(\epsilon)$ とひずみレベルの関係

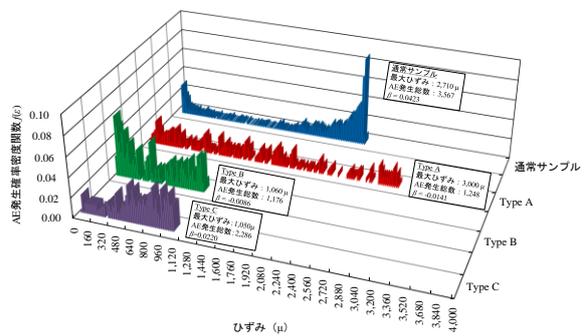


図 9 圧縮荷重過程の AE 発生挙動

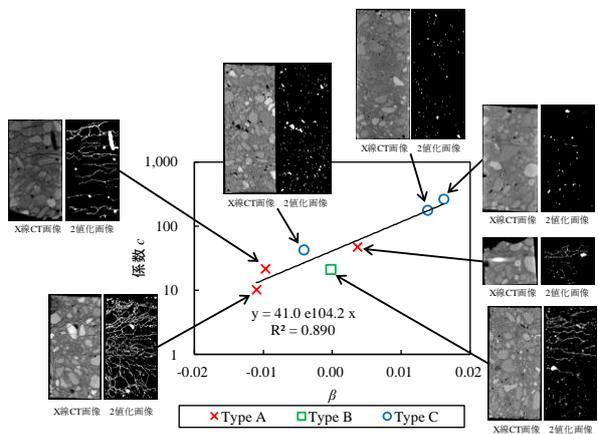


図 10 β 値と c 値の関係

において最も高く、損傷の進行に伴い評価値の低下傾向が確認された。これは、一般的なコンクリート損傷の進行に伴う P 波速度の低下傾向と一致しており、評価パラメータ (β 値) においても供試コンクリートの損傷蓄積を評価できたものと考えられる。中間領域では、 $\beta < 0.00$ と $\beta > 0.00$ の各領域に

において、P波速度の低下傾向が異なることが確認され、損傷進行は内部構造と密接に関連する材料物性の影響を受けているものと考えられる。このことから、 λ 値と β 値の関係を用いた損傷度評価指標は、強度などに代表される力学特性では明確にできなかったコンクリート損傷を定性的に評価できるものと考えられる。

評価パラメータとP波速度との良好な関連から、非破壊での損傷度評価が可能であるものと推察される。P波速度を用いて非破壊的にコンクリート物性を評価する規格にJIS A 1127 (2010)「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数、動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」³⁾がある。本規格では1次元波動方程式から縦波速度を式(6)で評価している。

$$V = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \dots \dots \dots (6)$$

ここで、 V : 縦波速度、 E : 弾性係数、 ρ : 密度である。

これは、ポアソン比が0の場合のP波速度であり、鉄筋コンクリートの適用には問題がある。筆者らは、ポアソン比を考慮した式(7)を用いてP波速度から動弾性係数 E_d を評価し、非破壊損傷度評価に関する方法論を提案している^{4), 17), 18)}。

$$V_p = \sqrt{\frac{(1-\nu)E_d}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}} \dots \dots \dots (7)$$

ここで、 V_p : P波速度、 E_d : 動弾性係数、 ρ : 密度、 ν : ポアソン比である。

そこで、P波速度から非破壊的に求めた動弾性係数 E_d と破壊試験データとの比較から実構造物でのコンクリート損傷の非破壊評価の可能性について検討した事例¹⁾を次節に示す。検討には、コンク

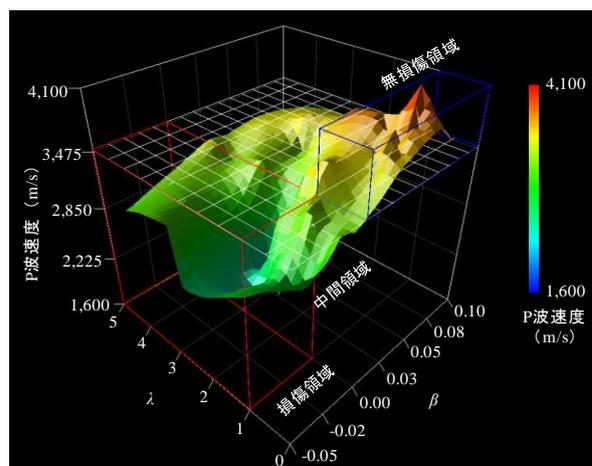


図 11 P 波速度と損傷パラメータの関係⁷⁾

リート水利施設において東日本大震災前後に損傷状況を比較した調査結果を用いる。本事例は、筆者らの AE レートプロセス解析に関する研究開発の一環として 2011 年 3 月 11 日以前に東北地方の被災地域において損傷度評価を行った施設を対象に、震災後の損傷蓄積を震災前後の評価パラメータの比較を通して検討したものである。

2-4. AE 指標による実構造物の損傷度評価

(1) 対象施設と検討方法

コンクリート・コアは、東日本大震災被災地域に立地するコンクリート製開水路より採取した。本施設は、前述のとおり筆者らが取り組んでいるコンクリート損傷度評価システム (DeCAT) の構築に関する研究¹⁵⁾の一環として、東日本大震災が発生する以前にコンクリート・コアの試験研究を実施したものである。本試験では、震災前の試験データに加えて、同一施設同一部位において震災後にサンプリングを行いコンクリート物性の比較検討を試みた。サンプルの採取は、東日本大震災前 (Case 1) と震災後 (Case 2) に実施している。サンプルサイズは Case 1 が 15 本であり、Case 2 が 12 本である。

試験施設の立地は、東日本大震災の震源より約150kmに位置し、2011年3月11日には最大震度7が観測されている。供用開始は平成8年であり、比較的新しい施設である。東日本大震災以前の現地踏査では最大値で粗骨材の表面が見える程度の摩耗損傷のみが確認された。コンクリート表面のひび割れはほとんど確認されず、確認されたひび割れ幅も0.2mm未満であった。不同沈下などに起因するコンクリート製開水路での目地開きや目地段差は確認されなかった。このことから、震災前は構造上問題となるような変状には至っていなかったものと推察される。東日本大震災後の現地踏査では、不等沈下による目地部近傍の損傷進行が確認され、明らかに震災前とは構造物の損傷状況が異なることが目視により確認された。

採取したコンクリート・コアは、超音波法によりP波速度を計測した。超音波の送受信方法は透過法である。計測にはパンジェット・ラボ (FTS 社製) を用いた。入力周波数は54kHzである。発信電圧は250Vである。コンクリート・コアは、P波速度を計測した後にAE法による損傷度評価を試みた。

(2) 動弾性係数を用いたコンクリート損傷の非破壊推定

コンクリート・コアの力学特性は、圧縮強度が震災前 (Case 1) の平均値 (標準偏差) で 25.0N/mm^2 (0.85) を示した。震災後 (Case 2) には 24.8N/mm^2 (0.96) が確認された。Case 2 は Case 1 と比較して平均値の低下と標準偏差の増加が示されたが、両評価値の明確な相違は確認されなかった。震災前後のコンクリート物性を比較した結果、圧縮強度の顕著な低下は確認されなかったが、コンクリート損傷の蓄積はAEの評価パラメータである相対弾性係数 E_0/E^* の低下から確認された。相対弾性係数とは、圧縮強度試験より求めた初期接線弾性係数 E_0 と AE データベースより評価した“健全時の弾性係数” E^* の相対値であり、1.0 で健全を示し、1.0

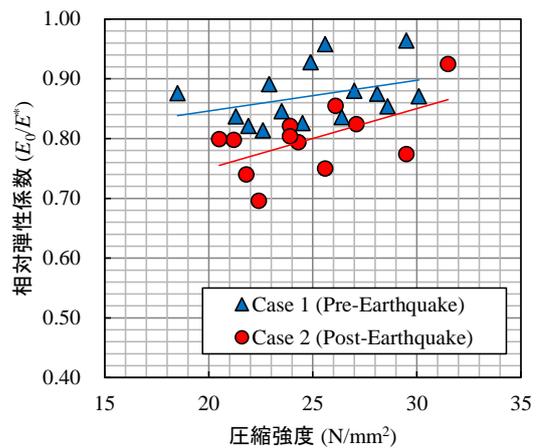
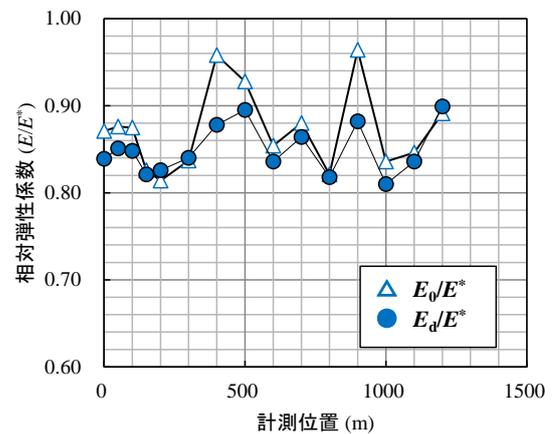
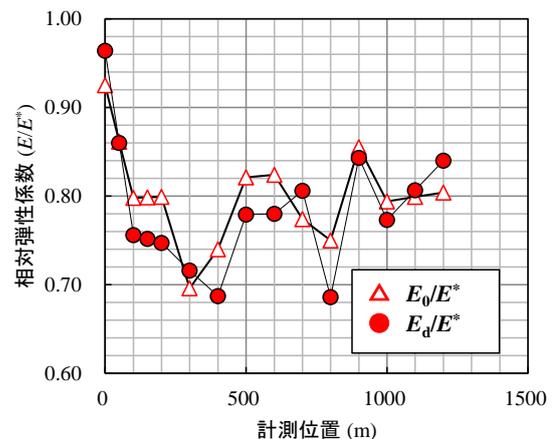


図12 相対弾性係数と圧縮強度の関係



Case 1: Pre-Earthquake Condition



Case 2: Post-Earthquake Condition

図13 相対弾性係数を指標とした破壊試験と非破壊試験

未満で損傷蓄積を示す評価パラメータである^{2), 15), 16)}。相対弾性係数 E_0/E^* は、Case 1 が 0.814~0.964 を示したのに対して、Case 2 は 0.696~0.928 が確認された。平均値を比較すると Case 1 に対する Case 2 の評価値は、平均値で約 8.5% の低下が確認された。図 12 に圧縮強度と相対弾性係数 E_0/E^* の関係をサンプルごとに示す。Case 1 と Case 2 の相対弾性係数 E_0/E^* の分布範囲の相違が確認された。相対弾性係数 E_0/E^* の相違は、コンクリート内部に損傷蓄積が圧縮応力下の AE 発生挙動に影響したものであると推察される。その際、圧縮強度の相違が両サンプルで顕在化しなかったのは、損傷の蓄積が終局時の最大応力の低下までは引き起こさない程度であったものと考えられる。

以上のことから、コンクリート損傷の定量化には圧縮強度が一般的に用いられているが、圧縮強度に加えて内部損傷の進行によるコンクリート物性の変質を考慮することにより、損傷度評価精度の向上が期待できるものと考えられる。そこで、現地において非破壊的に求めた透過法による P 波速度試験から動弾性係数 E_d を評価し、非破壊損傷度評価を試みた結果を図 13 に示す。計測はコア採取地点の近傍の 15 ヶ所である。図中の相対弾性係数 E_0/E^* は圧縮強度試験から求めたものであり、相対動弾性係数 E_d/E^* は P 波速度計測から非破壊的に求めた評価パラメータである。なお、相対動弾性係数に関する理論的検討は、既往文献^{4), 17), 18)} に詳説されていることから、そちらを参照されたい。実験的検討の結果、Case 1 および Case 2 において両評価指標がほぼ類似の変動傾向を示していることがわかる。このことから、破壊試験より求まる相対弾性係数 E_0/E^* と非破壊的に求める相対動弾性係数 E_d/E^* の関係から、相対動弾性係数 E_d/E^* を用いることにより実構造物の局所的なコンクリート損傷を非破壊的に検出できるものと考えられる。

これらのことから、複数のコンクリート・コアの

採取が困難な既存施設の損傷度評価には、AE 指標ないし、AE 指標と関連性の高い動弾性係数 E_d を用いることで高精度の非破壊評価が可能となる。

2-5. おわりに

コンクリート物性に関する非破壊検査精度の向上は、力学特性との関係性が重要である。本研究で提示した AE 指標と P 波速度から求めた動弾性係数 E_d との関係性は、コンクリート構造物の非破壊損傷度評価において有効性は高く、既存施設への適用が期待できる。

参考文献

- 1) Suzuki, T. and Ohtsu, M.: Use of Acoustic Emission for Damage Evaluation of Concrete Structure Hit by the Great East Japan Earthquake, *Construction and Building Materials*, 67, pp. 186-191, (2014)
- 2) 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)
- 3) 土木学会, 共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法, 2013 年制定コンクリート標準示方書 [規準編 JIS 規格集], pp. 576-581, (2013)
- 4) 弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書および第 2 回弾性波法によるコンクリートの非破壊検査に関するシンポジウム講演概要集, 土木学会, コンクリート技術シリーズ 73, pp. 31-45, (2006)
- 5) Kochanov, L. M.: 1.1 Some Type of Damage, *Introduction to Continuum Damage Mechanics*, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 1-10, (1986)
- 6) 日本材料学会 : 3.3.3 腐食疲労, 材料強度の確

- 率モデル, pp. 147-152, (2012)
- 7) 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)
 - 8) 渡辺健, 岩波光保, 横田弘, 二羽淳一郎: AE 法を用いた圧縮下コンクリートの破壊進展予測に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 25 (2), pp. 163-168, (2003)
 - 9) 渡辺健, 岩波光保, 横田弘, 二羽淳一郎: AE 法を用いたディープビームにおける圧縮破壊領域の推定, コンクリート工学年次論文集, 24 (2), pp. 175-180, (2002)
 - 10) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版, pp. 6-14, (1966)
 - 11) Ohtsu, M., Kawai, Y. and Yuji, S.: Evaluation of Deterioration in Concrete by Acoustic Emission Activity, コンクリート工学協会年次論文集, 10 (2), pp. 849-854, (1988)
 - 12) Ohtsu, M. and Suzuki, T.: Quantitative Damage Estimation of Concrete Core based on AE Rate-Process Analysis, Journal of AE, 22, pp. 30-38, (2004)
 - 13) Suzuki, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M.: Relative Damage Evaluation of Concrete in a Road Bridge by AE Rate - Process Analysis, Materials and Structures, 40(2), pp. 221-227, (2007)
 - 14) (社)日本非破壊検査協会編: 第 6 章超音波試験, コンクリート構造物の非破壊検査法, pp. 112-114, (1994)
 - 15) (独)農研機構・農村工学研究所: 農業水利施設の機能保全のための研究成果活用の手引き - 農業水利施設のストックマネジメント高度化技術の開発 (21034) -, pp. 19-27, (2012)
 - 16) (社)日本非破壊検査協会編: 8.3.4 レートプロセス理論, アコースティック・エミッション試験 II 2008, p. 102, (2008)
 - 17) 池田幸史, 鈴木哲也, 大津政康: 共鳴法における劣化コンクリートの動弾性係数に関する考察, コンクリート工学年次論文集, 26 (1), pp. 423-428, (2004)
 - 18) Ohtsu, M.: Nondestructive Evaluation of Damaged Concrete due to Freezing and Thawing by Elastic-Wave Method, Journal of Advanced Concrete Technology, 3(3), pp. 333-341, (2005)