

論文 圧縮破壊過程の AE 発生特性に基づくコンクリート損傷度評価

山岸 俊太郎*1・鈴木 哲也*2・森井 俊広*3・大津 政康*4

要旨: コンクリート構造物の長寿命化策の精緻な検討には、損傷度の定量化が不可欠である。本研究では AE 法を導入した圧縮強度試験を実施し、AE 発生挙動と応力 - ひずみ挙動の両観点からコンクリートの損傷度評価を試みた。評価指標には、AE 発生挙動の定式化より得られる β と損傷力学における損傷パラメータ λ を用いた。両指標の関係からコンクリート・コアを「損傷域」、「中間域」、「無損傷域」の 3 区分に評価し、P 波速度との関係を考察した。検討の結果、 λ と β の関係から損傷と評価されたコンクリート・コアは無損傷のものと比較して P 波速度の低下が確認され、損傷度評価との関係が示唆された。

キーワード: コンクリート, AE (Acoustic Emission), 損傷力学, 圧縮強度試験

1. はじめに

長期供用下にあるコンクリート構造物では、ひび割れを中心とするコンクリート損傷が発達している。既存施設の適切な維持管理には、構造材料の強度特性に加えて、コンクリート損傷の定量的評価が不可欠である。

このような技術的課題に対して、筆者らは AE (Acoustic Emission) 法と損傷力学を用いたコンクリートの定量的損傷度評価について検討している¹⁾。提案手法は、圧縮強度試験に AE 計測を導入し、圧縮破壊過程における AE 発生挙動と応力レベルの関係式から、コンクリート損傷を評価するものであり、既設構造物より採取したコンクリート・コアに対しても評価可能であることが確認されている²⁾。ひび割れ損傷の顕在化したコンクリートの圧縮破壊挙動評価では、AE 計測に 3 次元画像解析 (DICM) を組み合わせ、圧縮破壊過程における変形挙動と AE 発生挙動から損傷コンクリートの詳細評価を試みている³⁾。一連の研究結果より、ひび割れ損傷の進行が圧縮破壊過程の変形挙動と AE 発生挙動の双方に影響を及ぼしていることが明らかとなった。

本論では、圧縮破壊時に発生する AE とひずみレベルの関係に着目し、AE 発生挙動の定式化からコンクリートの損傷度評価を試みた。供試体は、水中凍結融解試験により人工的に損傷を与えたコンクリート・コアと既存施設より採取したコンクリート・コアである。実験的検討では、P 波速度の測定によるコンクリートの物性評価を行った後、AE 法を導入した圧縮強度試験よりコンクリートの損傷度評価を行った。評価指標には、応力 - ひずみ挙動から得られる損傷パラメータと AE 発生特性を用いて、両指標の関係からコンクリート損傷を評価した。これらの結果から、コンクリートの損傷度評価と P 波速度との関係を考察した。

2. 解析手法

2.1 AE 発生挙動の定式化

コンクリートの圧縮強度試験において、AE の発生挙動は微小ひび割れの発生過程と対応している。微小ひび割れは漸増的に発生、集積され、主破壊に至る。ひび割れ発生に対応する AE 発生挙動は、微小ひび割れの集積により累進的に増加する。この過程は、あるひずみレベルで発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。その場合には、確率過程論における定式化が可能である⁴⁾。

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 $\varepsilon + d\varepsilon$ へのひずみの増分に対し、以下の式(1)を導くことができる。

$$f(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ に対し、損傷度の定量化のために、以下の指数関数を仮定する。

$$f(\varepsilon) = \alpha \cdot \exp(\beta\varepsilon) \quad (2)$$

ここで α 、 β は定数である。

式(2)において、 β 値はひずみレベル ε での AE 発生頻度を反映し、載荷初期段階の AE 発生確率により、その正負が決定する。 β 値が正の場合、AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ は低ひずみレベルで低いことを意味し、材料が無損傷であると評価できる。 β 値が負の場合、AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ は載荷初期段階の低いひずみレベルにおいて高いことを意味し、コンクリートが損傷した状態であると評価することができる。このモデルは、圧縮応力下でのひずみレベルが低い段階での AE 発生挙動により損傷の進行を判断するものである。

本研究では、圧縮応力下における AE 発生挙動とひずみレベルの関係を定式化し、 β 値をコンクリート損傷に

*1 新潟大学大学院 自然科学研究科環境科学専攻 (学生会員)

*2 新潟大学 自然科学系 (農学部) 准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 新潟大学 自然科学系 (農学部) 教授 博士 (農学) (非会員)

*4 熊本大学大学院 自然科学研究科 教授 工学博士 (正会員)

表-1 コンクリートの配合

セメント	最大粒径 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				AE 剤 (cc)
						W	C	S	G	
普通ポルトランド セメント	20	55	43.1	7.9	6.3	182	331	746	1204	133

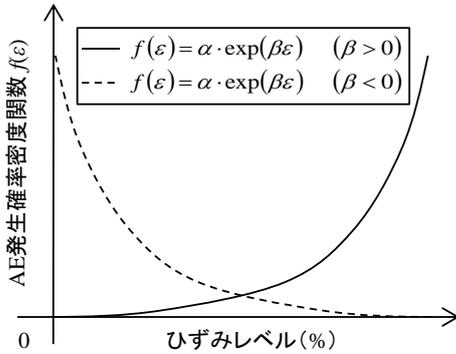


図-1 AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ とひずみレベルの関係

関する評価指標とした。AE 発生確率密度関数 $f(\varepsilon)$ とひずみレベルの関係を図-1 に示す。

2.2 損傷パラメータによる力学特性評価

応力 - ひずみ挙動におけるコンクリート損傷の定量化には、初期接線弾性係数 E_0 と割線弾性係数 E_c の関係から導出される損傷パラメータ λ を用いた。

損傷力学では、材料損傷の程度を示す指標として損傷変数 Ω が用いられ、弾性係数の相対値として以下の式より定義されている。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (3)$$

ここで、 E : 損傷を受けた材料の弾性係数、 E^* : 損傷を受けていない健全な材料の弾性係数である。

Loland⁵⁾ は、損傷変数である Ω と圧縮応力下でのひずみ量 ε の関係を式(4)として定義した。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (4)$$

ここで、 Ω_0 : 初期損傷度、 A_0 、 λ : 材料定数である。

式(3)および式(4)から式(5)が導出される。

$$\sigma = (E_0 - E^* A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \quad (5)$$

式(5)および図-2 から以下の式が得られる。ここで、図-2 の ε_c : 最大ひずみである。

$$\frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} = E_0 - E^* A_0 \varepsilon_c^\lambda = E_c \quad (6)$$

$$\left. \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = E_0 - (\lambda + 1) E^* A_0 \varepsilon_c^\lambda = 0 \quad (7)$$

式(6)と式(7)より損傷パラメータ λ が得られる⁶⁾。

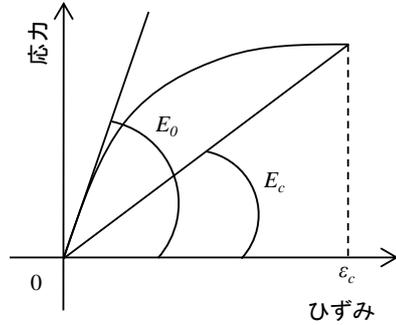


図-2 応力 - ひずみの関係

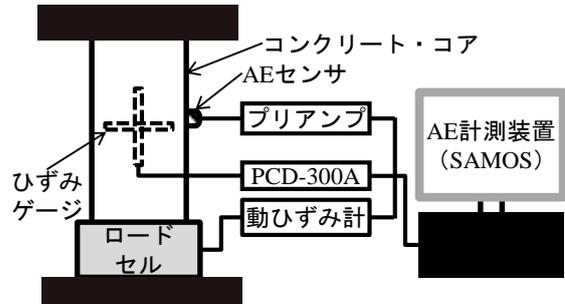


図-3 圧縮強度試験概要図

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (8)$$

本研究では、式(8)より算出される損傷パラメータ λ と圧縮応力下における AE 発生挙動の定式化により得られる β 値からコンクリートの損傷度評価を試みている。

3. 実験方法

3.1 供試体

実験的検討に用いた供試体は、損傷状況の異なる 115 本のコンクリート・コアである。供試体の構成は、水中凍結融解試験により人工的に損傷を与えたコンクリート・コア (以後、モデル試験と称す) 60 本と損傷を与えていないコンクリート・コア (以後、無損傷サンプルと称す) 18 本、実構造物より採取したコンクリート・コア (以後、実構造物と称す) 37 本である。実構造物のコンクリート・コアでは、摩耗損傷や凍害損傷、硫化水素による劣化が顕在化したものである。本論では、水中凍結融解試験を施したサンプルを「モデル試験」と称し、後述する物性値の評価からモデル試験をモデル試験 (無損傷域) とモデル試験 (中間域) に分類し、考察している。

水中凍結融解試験では 100, 200, 300 サイクルの 3 種類の実験条件で行った。水中凍結融解試験に用いたコンクリートの配合を表-1 に示す。

3.2 P 波速度試験

コンクリート・コアの物性評価のため、コアの P 波速度を計測した。計測装置は Pundit Lab を使用した。入力超音波は 54 kHz である。探触子にはグリスを薄く塗布し、コンクリート・コアとの密着性を高めた。P 波速度の計測は無損傷のコンクリート・コア 4 本、人工的に損傷を与えたコンクリート・コア 28 本、実構造物より採取したコンクリート・コア 25 本、計 57 本を対象に実施した。

3.3 圧縮強度試験

本研究では、圧縮強度試験に AE 計測を導入し、圧縮破壊過程に発生する AE を検出した。計測装置は SAMOS である。計測はコンクリート・コアの側面部にひずみゲージおよび AE センサを設置して行った。しきい値は 42 dB とし、60 dB の増幅をプリアンプとメインアンプで行った。AE センサは 150 kHz 共振型センサを用いた。実験の概要図を図-3 に示す。

4. 結果および考察

4.1 損傷パラメータ λ と β 値を用いた損傷度評価

AE 計測を導入した圧縮強度試験より、損傷パラメータ λ と β を算出した。

λ は式(8)より定義され、初期接線弾性係数と割線弾性係数の関係式より導出される。コンクリート標準示方書⁷⁾において提案されている応力-ひずみ曲線では $\lambda=1.0$ となることが確認されている。 λ は、初期接線弾性係数と割線弾性係数の差分 ($E_0 - E_c$) が低下することにより評価値が増加する。 β は式(2)の AE 発生挙動とひずみレベルの関係式から導出される評価値であり、コンクリート損傷の進行に伴って β は低下する。

コンクリート・コアの損傷度評価には、 λ と β の関係からコンクリートを「損傷域」、「中間域」、「無損傷域」に区分し評価している (図-4)。本論では、無損傷域のしきい値を水中養生 28 日のコンクリート・コアにより設定した。評価値 λ と β の正規性を仮定し、正規分布より無損傷域のしきい値を決定した。コンクリート標準示方書[設計編：本編]⁷⁾では、材料の設計強度に材料強度の特性値が用いられている。特性値の算出には材料強度のばらつきを想定し、正規分布において試験値が特性値を下回る確率を 5%としている。本研究では、評価値の安全性を考慮し、評価値の平均値から標準偏差を反映した値をしきい値として設定した。図-5, 6 は、 λ および β のヒストグラムと正規分布の確率密度関数 $f(x)$ を表したものである。

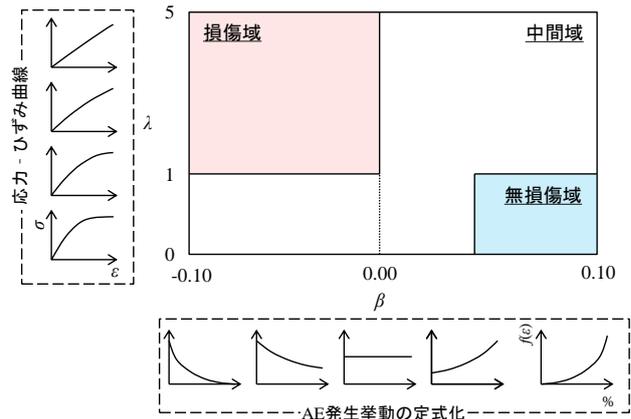


図-4 コンクリート損傷度評価の概要図

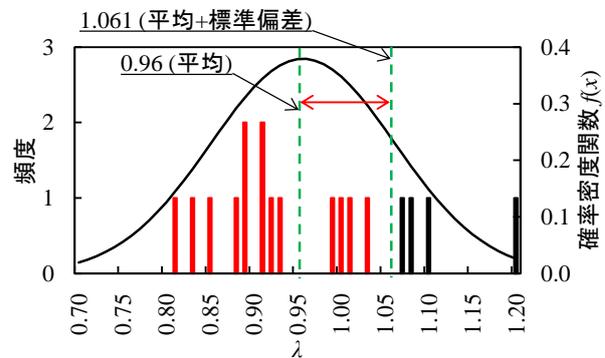


図-5 λ のヒストグラム

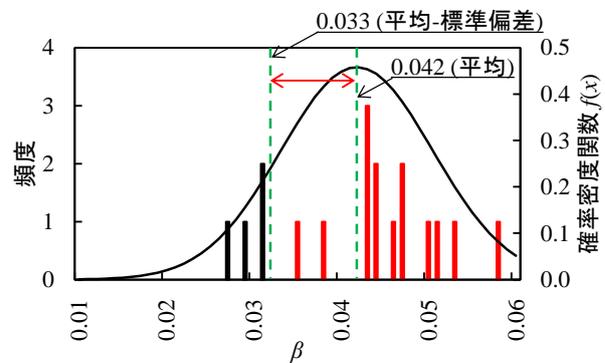


図-6 β のヒストグラム

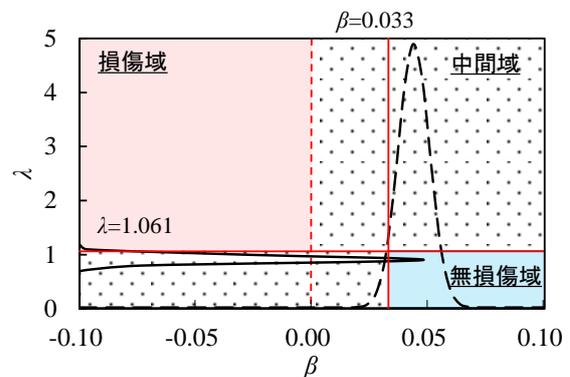


図-7 コンクリートの損傷度評価モデル

表-2 コンクリート・コアの力学特性

	最大応力 (N/mm ²)	最大ひずみ (μ)	初期接線弾性係数 (GPa)	割線弾性係数 (GPa)	λ	α	β	サンプル サイズ
無損傷サンプル	36.9 [6.0]	2,420 [390]	32.0 [2.8]	15.3 [1.2]	0.92 [0.06]	0.002 [0.001]	0.051 [0.009]	11
モデル試験 (無損傷域)	38.4 [5.1]	2,475 [131]	31.8 [4.2]	15.6 [2.3]	0.96 [0.08]	0.001 [0.001]	0.044 [0.009]	18
モデル試験 (中間域)	38.2 [5.1]	2,175 [219]	32.2 [3.5]	17.6 [2.1]	1.24 [0.27]	0.002 [0.003]	0.041 [0.015]	49
実構造物	22.4 [7.9]	1,548 [822]	27.3 [15.3]	18.6 [10.6]	2.37 [0.91]	0.083 [0.173]	-0.009 [0.026]	37

※ 数値は平均[標準偏差]を示す。

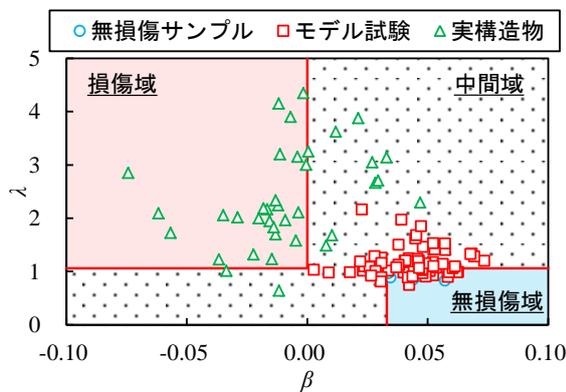


図-8 コンクリートの損傷度評価

λ の場合、応力-ひずみ曲線における弾性係数の変化量 ($E_0 - E_c$) が低下すると共に、評価値は増加することから、無損傷域のしきい値は、平均値に標準偏差を足し合わせた値 ($\lambda=1.061$) を上限とした (図-5)。 β の場合、コンクリート損傷の進行に伴って評価値は低下することから、平均値から標準偏差を差し引いた値 ($\beta=0.033$) を下限とするしきい値を設定した (図-6)。以上の検討結果から、無損傷域を $\lambda \leq 1.061$ かつ $\beta \geq 0.033$ の範囲とした。

損傷域は、 λ のしきい値 ($\lambda=1.061$) を上回る範囲とし、 β では 0.00 未満の範囲と設定した。損傷域と無損傷域の条件に該当しない範囲を中間域と設定した。損傷度評価モデルを図-7 に示す。

損傷状況の異なるコンクリート・コアを用いて、 λ と β の関係から損傷度を評価した結果を図-8 に示す。図に明記した無損傷サンプルは、損傷を与えていないコンクリート・コアであり、無損傷域に評価されたサンプルである。モデル試験は水中凍結融解試験により損傷を与えたコンクリート・コアであり、中間域から無損傷域に評価された。実構造物は、既設構造物から採取したコンクリート・コアであり、損傷域から中間域に評価された。

本研究では、無損傷サンプル、モデル試験 (中間域)、モデル試験 (無損傷域)、実構造物を対象に力学特性評価

を行うとともに、評価値 λ と β の分布特性を正規分布より評価した。

4.2 コンクリートの力学特性

コンクリート・コアの力学特性を表-2 に示す。最大応力の平均値は、無損傷サンプルで 36.9 N/mm²、モデル試験 (無損傷域) で 38.4 N/mm²、モデル試験 (中間域) で 38.2 N/mm²、実構造物で 22.4 N/mm² となった。無損傷サンプルはモデル試験 (無損傷域) の 96.1 % であり、モデル試験 (中間域) は 99.4 % であった。無損傷サンプルとモデル試験の差は最大で 3.9 % と低く、最大応力の平均値は同程度であることが確認された。

最大ひずみの場合、無損傷サンプルで 2,420 μ 、モデル試験 (無損傷域) で 2,475 μ 、モデル試験 (中間域) で 2,175 μ 、実構造物で 1,548 μ となった。無損傷サンプルとモデル試験 (無損傷域) の差は 55 μ であり、モデル試験 (中間域) との差は 245 μ であった。

モデル試験 (中間域) では、最大ひずみの低下が確認されたものの、最大応力と初期接線弾性係数は無損傷サンプルと同程度であり、力学特性において明確な差は確認されなかった。

4.3 評価値 λ と β の分布特性評価

評価値 λ と β の分布特性を正規分布により評価し、t 検定より評価値の有意差を検証した。コンクリートのような脆性材料では、評価値がばらつくことが想定される。各サンプルの評価値の差は、ばらつきにより偶然生じる可能性がある。このため、t 検定を用いて、各サンプルの有意差を P 値により定量的に評価した。

λ では、無損傷サンプルとモデル試験 (無損傷域) 以外の組み合わせにおいて有意水準 5 % で有意差が確認された (表-3)。図-9 から無損傷サンプルとモデル試験 (無損傷域) では λ の分布範囲が重複し、平均値と標準偏差が類似していることが確認された。

β の場合、有意差はモデル試験 (無損傷域) とモデル試験 (中間域) 以外の組み合わせにおいて確認された (表

表-3 λとβのt検定

データセット		λ	β
無損傷サンプル	モデル試験（無損傷域）	1.28×10^{-1}	$3.55 \times 10^{-2*}$
無損傷サンプル	モデル試験（中間域）	$5.45 \times 10^{-10*}$	$2.12 \times 10^{-3*}$
無損傷サンプル	実構造物	$1.26 \times 10^{-11*}$	$5.41 \times 10^{-15*}$
モデル試験（無損傷域）	モデル試験（中間域）	$1.33 \times 10^{-8*}$	3.40×10^{-1}
モデル試験（無損傷域）	実構造物	$2.73 \times 10^{-11*}$	$2.77 \times 10^{-17*}$
モデル試験（中間域）	実構造物	$5.52 \times 10^{-9*}$	$6.10 \times 10^{-15*}$

※ 数値はP値を示す。

有意水準は5%であり、P値<0.05で帰無仮説を棄却する。

表-4 凍結融解サイクルと損傷パラメータの関係

サイクル	λ		β		サンプルサイズ
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
0	0.96	0.11	0.042	0.009	18
100	1.09	0.19	0.043	0.018	21
200	1.24	0.28	0.044	0.012	18
300	1.18	0.16	0.049	0.014	17

表-5 クリギング処理の条件

座標データ	β, λ
測定データ	P波速度
セミバリオグラムモデル	球形モデル
分割数	縦 30×横 30

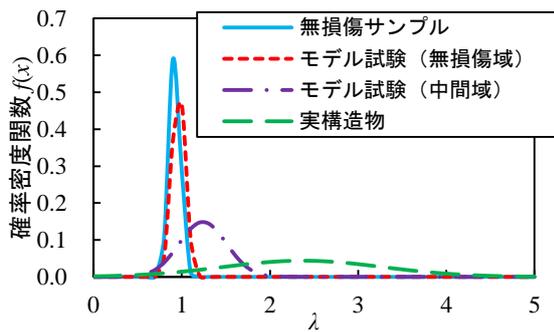


図-9 λの分布特性

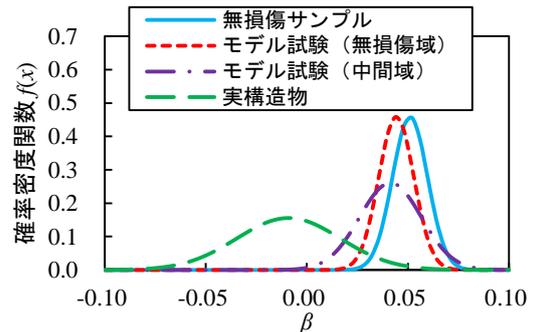


図-10 βの分布特性

-3)。βの分布特性からモデル試験（無損傷域）とモデル試験（中間域）の平均値は類似しているものの、分布形状は異なることが確認された（図-10）。

λとβの分布特性から、モデル試験（無損傷域）と無損傷サンプルの分布範囲は概ね一致していることが確認された。モデル試験（中間域）では、分布形状が異なるものの無損傷サンプルおよびモデル試験（無損傷域）の分布範囲と重複しているが確認された。

モデル試験は水中凍結融解試験により人工的に損傷を与えたコンクリート・コアであり、凍結融解のサイクルを100～300に設定した。表-4は各サイクルにおける評価値の統計量である。λの平均値は、200サイクルの1.24が最も大きく、0サイクルの0.96が最小であった。200サイクルは0サイクルの1.3倍であった。βの場合、0サイクルで0.042となり、300サイクルで0.049となった。300サイクルは0サイクルの1.2倍であり、λと同様に明確な差は確認されなかった。以上のことから、モデ

ル試験における評価値のばらつきは小さく、無損傷サンプルとの相違が明確に表れなかったものと推察される。

実構造物では分布形状および分布範囲が無損傷サンプルやモデル試験と大きく異なることが確認された。これは、既設構造物より採取したことに起因していると考えられる。実構造物では損傷要因が複数あり、損傷の進行が異なることから、無損傷サンプルやモデル試験の分布特性と明確に異なったものと考えられる。

4.4 P波速度計測によるコンクリート損傷度評価

コンクリート・コア 57本を対象にP波速度を計測した。無損傷サンプルでは、P波速度 3,632～3,850 m/s（平均値：3,778 m/s）を記録し、モデル試験（無損傷域）では 3,710～4,080 m/s（平均値：3,857 m/s）となった。モデル試験（中間域）では 3,370～4,080 m/s（平均値：3,725 m/s）となり、実構造物では 1,680～3,971 m/s（平均値：3,103 m/s）となった。無損傷域に含まれるコンクリート・コアのP波速度は3,632～4,080 m/sであることが確

認められた。

本研究では、 λ と β による損傷度評価とコンクリート物性 (P 波速度) の関係を考察した。検討の結果を図-11 に示す。図-11 では、プロットしたデータ間の P 波速度を補完するためクリギング処理⁸⁾を行った。解析条件を表-5 に示す。クリギングでは、 λ と β を座標データ、P 波速度を計測データに設定し解析を行った。

図-11 から無損傷域では P 波速度 3,700~4,100 m/s の範囲であるのに対して、損傷域では 1,700~3,500 m/s の範囲であった。P 波速度にばらつきがあるものの、損傷域の P 波速度は無損傷域と比較して低く、最大で 2,400 m/s 低下していることが確認された。

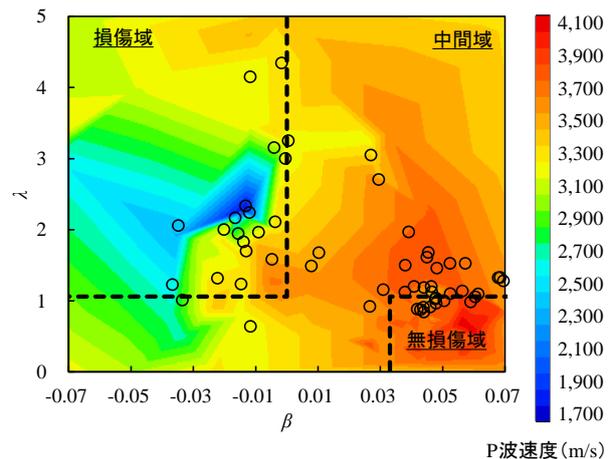


図-11 コンクリート損傷と P 波速度の関係

5. おわりに

検討の結果を以下に列挙する。

- (1) 評価指標である λ と β を用いてコンクリート・コアを「無損傷域」, 「損傷」, 「中間域」の3区分に分類し評価した。無損傷のコンクリート・コアを用いて無損傷域を設定した結果、健全は $\lambda \leq 1.061$ かつ $\beta \geq 0.033$ の範囲となった。
- (2) λ と β の分布特性を評価した。無損傷サンプルとモデル試験 (無損傷域) では平均値と標準偏差が類似していたことから分布範囲が重複していることが確認された。実構造物では、正規分布の形状や範囲が異なることから、損傷の進行が無損傷サンプルやモデル試験と明確に異なるものと示唆された。
- (3) コンクリート・コアの P 波速度と損傷度評価との関係について考察した。検討の結果、損傷域の P 波速度は、無損傷域と比較して最大で 2,400 m/s 低下していることが確認され、損傷度評価と P 波速度との関係が示唆された。

引用文献

- 1) 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, Dec. 2010.
- 2) 鈴木哲也, 池田幸史, 友田祐一, 大津政康: データベース構築に基づく AE レートプロセス解析による劣化コンクリートの定量的損傷度評価, *コンクリート工学年次論文集*, Vol.26, No.1, pp. 1791-1796, 2004.

- 3) 山岸俊太郎, 鈴木哲也, 大津政康, 緒方英彦, 森井俊広: 空間統計パラメータを用いたひび割れ損傷が進行したコンクリートの圧縮破壊過程の詳細評価, *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*, 第 13 巻, pp. 41-48, 2013.
- 4) 大津政康: *アコースティック・エミッションの特性と理論* (第 2 版), 森北出版, 2005.
- 5) Loland, K. E.: *Continuous Damage Model for Load - Response Estimation of Concrete, Cement and Concrete Research*, Vol.10, pp. 385-402, 1980.
- 6) 野口翔, 磯田俊郎, 後藤尚貴, 大津政康: 凍結融解劣化コンクリートの弾性波法による損傷度評価, *コンクリート工学会年次論文集*, Vol.30, No.1, pp.897-902, 2008.
- 7) 社団法人 土木学会: 2012 年度制定 *コンクリート標準示方書*[設計編: 本編], pp.32-34, pp.172~173, 2012.
- 8) Hans Wackernagel 著, 青木謙治監訳: *地球統計学*, 森北出版株式会社, 2004.