

博士論文

A E 波 形 解 析 に 基 づ く 農 業 水 利 施 設 の
損 傷 度 評 価 法 の 構 築 に 関 す る 研 究
- コ ン ク リ ー ト 水 利 施 設 を 対 象 と し て -

鈴 木 哲 也

目 次

第1章 序論

1.1	研究背景	1
1.2	研究目的	4
1.3	研究方法	5
1.4	既往研究	5
1.4.1	AE 指標を用いた損傷度評価技術の開発	5
1.4.2	圧縮応力場の AE を指標としたコンクリート損傷度評価	7
1.4.3	農業農村工学における AE の利用と施設機能診断	9
1.4.4	農業水利施設の性能規定化と AE 法によるモニタリング	10
1.5	本論文の構成	11
1.6	本研究の新規性・有用性	12
	参考文献	14

第2章 圧縮载荷過程に発生する AE を指標としたコンクリート材質評価

2.1	概説	22
2.2	コンクリート圧縮载荷過程の特徴と強度・変形特性	22
2.2.1	圧縮载荷過程における応力 - ひずみ挙動の特徴	22
2.2.2	ひずみエネルギー指標を用いた応力 - ひずみ挙動評価	25
2.2.3	スカラー損傷モデルを用いた応力 - ひずみ挙動評価	25
2.2.4	動弾性係数を用いた応力 - ひずみ挙動評価	30
2.3	コンクリート損傷の力学表現	31
2.3.1	損傷コンクリートの圧縮破壊特性	31
2.3.2	X 線 CT 法によるコンクリート損傷の可視化・定量化	32
2.3.3	コンクリートの圧縮破壊と AE の関係	35
2.4	材料中の AE 発生とその特徴	36
2.4.1	AE 法により検出される弾性波とその波動特性	36
2.4.2	AE 発生機構と検出システム	38
2.4.3	AE パラメータを用いた定量的波形解析	40
2.5	農業水利施設に発生する AE の特徴と工学的利用	44
2.5.1	AE パラメータの施設機能診断への応用	44
2.5.2	農業水利施設の力学的要求性能	45
	参考文献	47

第3章 ひび割れ損傷の発達したコンクリートの物性特性

3.1	概説	53
3.2	無損傷コンクリートの特性評価	53
3.2.1	供試体	53
3.2.2	実験・解析方法	55
3.2.3	実験結果・考察	55
3.3	凍害によりひび割れ損傷の発達したコンクリートの特性評価	59
3.3.1	供試体	59
3.3.2	実験・解析方法	60
3.3.3	実験結果・考察	68
3.4	ひび割れ損傷の発達が AE パラメータへ及ぼす影響評価	84
3.4.1	損傷タイプを考慮した AE 発生挙動評価	84
3.4.2	検出波のエネルギー指標を考慮した AE 発生挙動評価	84
3.5	まとめ	86
	参考文献	88

第4章 AE を用いたコンクリート損傷度評価法の開発

4.1	概説	92
4.2	AE パラメータを用いた損傷度評価指標の構築	93
4.2.1	コンクリート損傷度評価法構築の着眼点	93
4.2.2	圧縮載荷過程の AE を指標とした損傷度評価法の構築	94
4.3	無損傷コンクリートの圧縮載荷過程の AE 発生特性	102
4.3.1	応力 - ひずみ挙動とひずみエネルギーの関係	102
4.3.2	AE パラメータを用いた圧縮破壊特性の抽出	102
4.4	凍害コンクリートの圧縮載荷過程の AE 発生特性	105
4.4.1	応力 - ひずみ挙動とひずみエネルギーの関係	105
4.4.2	AE パラメータを用いた圧縮破壊特性の抽出	105
4.5	定性的損傷度評価による損傷実態の分類	109
4.6	ひび割れ損傷の蓄積が弾性波挙動へ及ぼす影響評価	110
4.7	まとめ	111
	参考文献	112

第5章 実構造物より採取したコンクリートの損傷度評価	
5.1 概説	114
5.2 開発手法の検証における試験サンプルの位置づけ	114
5.3 ひび割れ損傷が顕在化した凍害コンクリートの損傷度評価	115
5.3.1 供試体	115
5.3.2 実験・解析方法	116
5.3.3 実験結果・考察	116
5.4 ひび割れ損傷が顕在化していない凍害コンクリートの損傷度評価	124
5.4.1 供試体	124
5.4.2 実験・解析方法	124
5.4.3 実験結果・考察	124
5.5 既設道路施設より採取したコンクリート・コアの損傷度評価	133
5.5.1 供試体	133
5.5.2 実験・解析方法	134
5.5.3 実験結果・考察	134
5.6 コンクリート損傷実態と定性的損傷度評価の関係	142
5.6.1 評価指標へ及ぼす損傷蓄積とコンクリート物性の関係	142
5.6.2 定性的損傷度評価区分と AE エネルギー指標の関係	147
5.6.3 定性的損傷度評価の新規性・有用性	155
5.7 まとめ	156
参考文献	158
 第6章 結論	 160
 謝辞	 162

第1章 序論

1.1 研究背景

持続的な農業生産には、土地および水の資源化に資する適切な農業水利施設の構築が不可欠である。現況の規模は、日本国内に限定したとしても基幹的用排水路で約 50,000 km、ダムや取水堰で約 7,000 ヶ所、それらの資産価値は 18 兆円にのぼる¹⁾。近年、長期供用に伴う農業水利施設の劣化・損傷の進行が顕在化し、農業水利システムの調査診断や更新に関する技術開発が急務となっている（図 1.1.1）。既存施設の性能低下は、2011 年 3 月に発生した東北太平洋沖地震^{2)~4)}に代表される突発的地震災害や設置環境の影響を受けた経年的な劣化・損傷^{5)~9)}の蓄積により顕在化する。技術的検討は、材料レベル⁷⁾から構造物を対象とした実験⁸⁾、シミュレーション⁹⁾まで様々な取り組みが進められている。損傷の同定には、材料の力学特性（強度、弾性係数）と損傷度との関連を評価することが不可欠であり、仕様規定型設計から性能照査型設計へ移行した 2000 年代初頭から研究開発が積み重ねられている。その論点は、農業水利施設の構造設計^{10), 11)}から水路システムの構築^{12)~15)}に至る各段階において、農業水利施設群の性能評価に基づく設計手法の高度化として本格的な議論が進められている。社会基盤施設を対象とした議論との相違点は、農業水利システムの構築には構造設計に関する論点に加えて、水理学的な観点からの施設規模やシステムの検討が行われることにある。近年では、これらの材料損傷を含めた構造設計と水理学的な論点を融合した既存施設の実態調査・診断¹⁶⁾が試みられているが、統一的な方法論の構築には至っていない。この背景には、農業水利施設の構造材料に関する損傷実態が十分に明らかにされていないことに加えて、各種水理条件下での構造部材の長期耐久性能が議論されていないことにある。



(a) 凍害損傷が顕在化した水路側壁

（撮影場所：青森県弘前市）



(b) 磨耗損傷が顕在化した水路側壁

（撮影場所：神奈川県海老名市）

図 1.1.1 農業水利施設の劣化・損傷事例

農業水利施設に関する包括的な損傷実態は、2000年3月に提示された農林水産省、旧運輸省および旧建設省の3省合同による土木コンクリート構造物耐久性検討委員会報告書¹⁷⁾により明らかになった。本調査では、国内2,645件の既存施設の構造種別、竣工年、点検・補修実態、劣化状況等の調査に基づく特性評価が試みられた。その内、農業水利施設は311件（4工種、307地点）¹⁸⁾であり、一般の土木構造物と同様にコンクリート物性の低下に損傷蓄積の影響が示唆された。農業農村工学分野では、この結果を踏まえて農業水利施設の機能保全に関する指針化が2007年より進められているが、既存の損傷状態や補修後の性能回復効果に関する評価指標の明確化の必要性が指摘されている¹⁹⁾。一般の土木構造物に関する同様の研究開発や指針化は農業農村工学分野よりも先行しており、各学協会において土木構造物の性能評価のための方法論が提案されている（一例として文献^{20)~23)}）。近年では、2014年11月に（社）日本コンクリート工学会より既存コンクリート構造物の性能評価指針²⁴⁾が提示されるなど、性能評価技術の高度化が進められている。また、同年4月にコンクリート構造物の維持管理と補修に関する国際標準であるISO 16311 Maintenance and Repair of Concrete Structures²⁵⁾が制定されるなど国際的な観点からも社会基盤施設の維持管理や更新における性能評価の重要性が見直されている。

このような社会的状況を考慮すると、農業水利施設においては、既存施設が主に鉄筋コンクリート構造により構築されていることから、コンクリートを中心とした性能評価方法を検討する必要がある。農業水利施設を対象とした一般的な構造設計では、最も経済合理的な最小部材厚による構造断面が選択されている。部材の信頼性は力学指標により評価される。長期間供用された既存施設の多くは、損傷蓄積により力学特性が変質するが、現状の構造設計は農業水利施設特有の材料損傷機構を十分に考慮したものにはなっていない。

損傷同定には、非破壊試験ないし破壊試験が用いられる²⁶⁾。特に非破壊試験は、その簡便さから近年適用範囲が拡大している。非破壊試験方法は、一般的に弾性波法、電磁波法および電気化学的手法に分類され、弾性波法と電磁波法が主にコンクリート中に発達した欠損を検出することに注力されるのに対して、電気化学的手法がコンクリート中の鉄筋腐食の同定を目的として用いられている²⁷⁾。計測された非破壊試験指標は、補修や補強、更新の際に用いる場合、既存施設の構造設計が強度に代表される力学特性により行われていることから、破壊試験により評価される力学特性との関連性を明確にする必要がある。そのことにより、既存施設の効果的な保全対策の立案が可能になる。日本国内においては力学特性と非破壊試験との関連について、1980年代から90年代初頭に（社）日本コンクリート工学会²⁸⁾、²⁹⁾や（社）日本建築学会³⁰⁾において超音波法に代表される弾性波を用いた強度推定を中心に検討が行われたが、欠損の評価精度が不十分であったことに加えて、力学特性との関連が不明瞭であり、精緻な評価手法として確立はされていない。計測技術としての弾性波法は、超音波法、

衝撃弾性波法およびアコースティック・エミッション法（Acoustic Emission ; AE）に分類でき²⁶⁾、本研究では AE 法を用いた実証的検討を試みる。

AE 法に関する近年の取り組みでは、RILEM（国際材料構造試験研究機関・専門家連合）特別委員会（TC-212ACD）においてコンクリート損傷の同定方法が提案され、標準化が進められている^{31)~34)}。農業水利施設を対象に AE 法を適用した調査研究は、1980 年代から今日に至るまで、いくつかの先行研究^{35)~37)}を確認することができるが、いずれの研究成果も現状において検査技術としての普及には至っていない。農業水利施設の劣化・損傷の特徴は、前述の通り、水流に起因する磨耗損傷や欠損部での漏水事故など、送流水と構造物との相互作用の中で性能低下が顕在化することにある。その過程では、各種物理現象の影響を受けた弾性波が発生しており、それら特徴量を踏まえた AE 特性は損傷度評価に有効であると推察される。

長期供用下の農業水利施設では、コンクリートの中性化や塩害による鉄筋の腐食膨張により、ひび割れ損傷が発達する。凍結融解やアルカリ骨材反応によるひび割れ損傷の進展は、鉄筋腐食とは無関係にコンクリート中にひび割れを発達させる。損傷の蓄積した構造部材では、力学特性の変質に伴う耐久性能の低下が顕在化する。ライフサイクルコスト（Life Cycle Cost ; LCC）を考慮した場合、適切な時期に補修や補強を施すことにより再建設費の低減が可能となるが、その評価精度は材料損傷の進行度に依存している^{6), 38)}。同様の指摘は、化学プラント³⁹⁾や下水道施設⁴⁰⁾においても行われており、いずれの施設においても性能低下曲線により異時点間の構造物の性能低下と投資時期の最適化が損傷進行との関連から検討されている。これらのことから、適切な農業水利施設の運用には、構造材料に発達した損傷と力学特性との関連を明らかにする試験法の確立が不可欠である。特に、主要な構造材料であるコンクリートでは、鋼材と比較して損傷蓄積により脆性破壊が顕著になることから、損傷度の定量化技術の開発は急務であり、試験法の確立が既存施設の長寿命化や更新後の精緻な性能評価において重要な技術的課題と言える。

本研究では、以上の社会的背景を踏まえて、農業水利施設の主な構造材料であるコンクリートを対象に、その載荷過程で発生する AE に着目した損傷度評価法を開発する。AE とは、固体内部の微小な破壊あるいは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⁴¹⁾。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。評価指標には、検出波から解析的に求められる AE パラメータを用いる。特に内在する損傷と密接に関連していると考えられる検出した AE のエネルギー指標に着目した解析的検討を試みる。構造材料の損傷度は、前述の通り、破壊試験ないし非破壊試験により評価されるが、非破壊試験は一般的に破壊試験により求められる力学特性との関係から有効性や評価精度が議論される^{23), 27)}。このことから、非破壊試験法の研究開発の基礎的検討として、損傷の進行した構造材料を対象に載荷時の AE パラメータと力学特性との関連を検討すること

は、既存施設の長寿命化を進める上でも不可欠な技術的検討課題と言える。

1.2 研究目的

以上の研究背景を踏まえて、本論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に AE 法を援用した載荷試験による損傷度評価法の開発を研究目的とする。破壊試験法の確立は、その後に展開される非破壊試験法の基礎となることから、精緻な試験方法の検討と評価指標の確立は不可欠である。本研究では、上記研究目的に対して、以下に示す 4 点の具体的な研究課題を実施することにより実証的な検討を試みる。

- (1) 損傷状況の異なるコンクリート・コアを用いて圧縮載荷過程に発生する AE を検出し、AE パラメータ特性と蓄積損傷との関連を明らかにする。ひび割れ損傷の評価には X 線 CT 法を用い、空隙の発達がコンクリート物性へ及ぼす影響を実証的に検討する。その際、実験室内で打設した無損傷コンクリートについて同一の試験・計測を実施し、損傷蓄積に伴う物性の変質と AE との関連について考察する（第 3 章）。
- (2) 圧縮載荷過程に発生する AE をエネルギー指標の観点から評価し、コンクリート損傷度評価法を提案する。AE エネルギーは最大振幅値の二乗値とし、検出波規模を踏まえた AE 特性の詳細評価を試みる。その際、一連の載荷過程における AE エネルギー放出の重心点を評価し、AE エネルギー指標を考慮した蓄積損傷の定量評価方法を提案する。提案手法により定義した重心ひずみエネルギーと応力 - ひずみ曲線から求められる圧縮強度の関係からコンクリート損傷の定性評価指標を構築し、損傷実態との比較検証を試みる（第 4 章）。
- (3) 既存施設から採取した損傷実態の異なるコンクリート・コアを対象に、第 4 章で構築した定性的損傷度評価指標を適用し、評価区分（損傷、中間的損傷、無損傷）とコンクリート物性、AE パラメータとの関係を明らかにする（第 5 章）。
- (4) 上記 (1) ～ (3) を踏まえて、本研究で構築するコンクリート損傷度評価法の農業水利施設への適用性とその評価精度を検証する。

1.3 研究方法

材料損傷は、破壊過程における微視的、メソ的ならびに巨視的過程での空隙の発達と定義できる⁴²⁾。空隙の発達は、換言すれば荷重を受けることのできる有効断面の減少であり、その可視化には X 線 CT 法による非破壊試験を用いることができる^{43), 44)}。本研究では、ひび割れに代表される損傷発達がコンクリートの力学的特性へ及ぼす影響を明らかにするために圧縮載荷過程の AE を検出し、AE パラメータ解析の観点から評価指標^{45)~47)}を提案する。力学特性の評価指標には、Loland⁴⁸⁾により提示された損傷力学指標 λ に加えて、ひずみエネルギー概念を用いる。実証的検討では、既存施設より採取したコンクリート・コアを対象に一連の試験研究を実施する。特に、凍結融解作用により層状ひび割れが発達したコンクリート・コアを対象に AE パラメータの観点から損傷発達が構造材料の破壊挙動へ及ぼす影響について考察する。ひび割れ損傷の特性は、既往研究^{49), 50)}を踏まえて X 線 CT 法を用いて幾何学的特徴を抽出し、圧縮載荷過程で発生する AE と力学特性、X 線 CT 指標との関連からひび割れ損傷によるコンクリート物性の変質を評価する。

以上の実証的検討を踏まえて、農業水利施設の主な構造材料であるコンクリートを対象に、圧縮載荷過程の AE を援用した損傷度評価法を構築する。

1.4 既往研究

本節では、AE 法の特徴と AE パラメータを用いた損傷度評価に関する既往研究を概観し、農業水利施設を対象とした AE 法によるコンクリート損傷度評価法の構築の有用性と技術的課題を明らかにする。

1.4.1 AE 指標を用いた損傷度評価技術の開発

AE 法に関する技術開発は 20 世紀に開始された⁵¹⁾。1933 年（昭和 8 年）に東京大学地震研究所で行われた岸上冬彦博士による木材の曲げ破壊の際に発生する非可聴音を引張縁に挿入したレコード針で検出する試みが、科学的手法により AE を計測した最も古い記録であると考えられている⁵²⁾。海外においては 1953 年に Kaiser により行われた金属材料の引張り破壊の際に発生する AE の検出に関する研究が著名である⁵³⁾。計測機器を使用して AE の検出に成功したのは、アメリカ鉱山局の技術者であった Obert が 1938 年に鉱道内の鉱柱に関する弾性波探索中に検出したことが最初とされている⁵⁴⁾。この計測技術は当初、Micro Seismic Activity と呼ばれていたが Schofield⁵⁵⁾によって Acoustic Emission と名づけられ、今日に至っている。

本格的な AE 研究は、1950 年代に開始された压力容器やロケットなど機械工学分野

で普及が始まり、コンクリート工学分野では既存の計測技術が金属や岩石分野から導入され、Rusch⁵⁶⁾、L'Hermite⁵⁷⁾、Robinson⁵⁸⁾などの研究が歴史的に創始期のものと認められている。いずれの研究でも主破壊前に発生する微小破壊を加速度計などにより波動現象として検出できることが報告された。コンクリートの AE 研究が実用化に向けて注目され始めたのは 1970 年代後半から 80 年代初頭であり、近年では AE センサの改良や適用する構造体の拡大、コード化の推進により一般的な計測技術として実用化されつつある。特に 1980 年代には AE の波形解析に関する理論的検討が活発に実施され^{59)~62)}、SiGMA 解析手法⁶³⁾の開発が行われた。その間、米国では AEWG (Acoustic Emission Working Group) や CARP (Committee on Acoustic Emission from Reinforced Plastics) が組織され、国際会議が開催されている。EU 圏では EWGAE (European Working Group on Acoustic Emission) が同時期に組織された。日本国内では、(社) 日本非破壊検査協会に AE 特別委員会が設置され、JSNDI 規格 (NDIS) に関する検討が現在も進められている^{64)~66)}。

社会基盤施設の損傷を対象とした AE 法による調査研究は、計測方法の技術的特徴を生かして橋梁工に適用されることが多い。一例として、Gostautas⁶⁷⁾は、1965 年に開通した全長 594m の The Big John Monahan Bridge (USA) を対象に AE パラメータを用いたヘルスマonitoringを実施し、損傷部位での AE 発生頻度の上昇を計測した。検出した AE を詳細評価した結果、長期供用下にある損傷橋梁では健全度診断に AE 計測が有効であり、AE パラメータを用いた特性値の検出により損傷部位の特定が可能であることが明らかにされた。同様の試験研究は、日本国内において重石⁶⁸⁾により鉄筋コンクリート道路橋主桁を対象に試みられた。計測値は、NDIS2421 (2000)⁶⁶⁾に提案された AE パラメータである Load 比と Calm 比の関係を用いて損傷度の定量評価が試みられ、その有用性が確認された。重石らは、鋼橋⁶⁹⁾や鋼 - コンクリート複合橋⁷⁰⁾、鉄筋コンクリート橋⁷¹⁾においても同様の試験研究を試み、構造形式の相違による AE 発生挙動の違いを AE パラメータ解析の観点から明らかにした。農業農村基盤での検討は、筆者らにより損傷を有するコンクリート橋梁部材を対象とした計測・評価が行われている⁴⁷⁾。

農業水利施設に代表される水利構造物への適用を概観すると、後述 (1.4.3) する送配水パイプラインへの AE 法の適用を上げることができる。特に漏水現象^{72)~74)}や混相流^{75), 76)}、水撃圧⁷⁷⁾など水理現象起源の AE を配管表面から検出し、相互相関関数を利用した発生位置の同定や AE パラメータ解析による特性評価が試みられている。

一連の実構造物への AE 法の適用は、検出した AE を用いた発生位置の特定とその規模や特性について評価するものである。検討対象のスケールは、実構造物から部材、材料など目的に応じて選択され、各種検討が試みられている。現状の技術的課題は、検出される AE と計測対象の損傷との関連性が必ずしも明確でない点にあり、X 線 CT 法や画像解析を AE 計測と組み合わせることにより評価精度の向上が期待できる。

1.4.2 圧縮応力場の AE を指標としたコンクリート損傷度評価

本論の研究対象であるコンクリートの圧縮荷重過程に発生する AE を指標とした損傷度評価においては、AE パラメータの中でも AE 発生頻度に着目した検討が、コンクリート工学へ AE 法を適用した初期段階から現在まで数多く行われてきた。農業農村工学分野においても筆者らの他、山本ら⁷⁸⁾による既往研究がある。荷重過程で発生する AE は、材料損傷や損傷起源の破壊挙動に起因するものと考えられるため、AE 発生頻度を荷重過程の各段階で評価することにより、評価対象の損傷を含めた状態評価が行われている。材料破壊に伴う AE の特徴は、ひび割れの先端での微視組織や応力状態に依存し、その特性を変化させることにある⁷⁹⁾。AE 法の技術的特徴は、破壊過程において連続的に発生する弾性波を計測し、その特徴量をパラメータ解析により定量評価できる点にある。筆者らの既往研究では、圧縮荷重過程に連続的に検出される AE 発生を一種の速度過程 (rate-process) と考え、横堀⁸⁰⁾により提案された破壊の確率過程論に基づく AE 発生頻度の解析的検討を試みてきた。解析的検討は AE レートプロセス解析として 1988 年から Ohtsu⁸¹⁾により開始された。研究開発の初期段階では、AE 発生頻度と応力レベルの関係や発生した AE の評価パラメータである a 値 (図 1.4.1) の推移を損傷度と関連付けた検討が行われた⁸²⁾。 a 値とは、コンクリート損傷を AE 発生挙動から評価するパラメータであり、応力レベルと AE の発生頻度とを双曲線でモデル化した指標である。 a 値が正の場合は低応力下で AE の頻発が計測できる損傷状態と判断している。既往研究により、コンクリートの AE 発生挙動は、損傷の進行に伴い低応力下での AE 発生確率密度関数 $f(V)$ と a 値の増加が明らかにされた^{83), 84)}。

1990 年代半ばからは、コンクリートの空隙量と a 値の関係に着目した研究が展開され、物性値と AE レートプロセス解析結果との相関が検討された。その結果、微小ひび割れが蓄積し、細孔容積比の増加に伴う a 値の上昇傾向 (損傷の蓄積) が明らかにされた⁸⁵⁾。空隙量の評価法は、本研究で用いている X 線 CT 法ではなく、水銀圧入法に

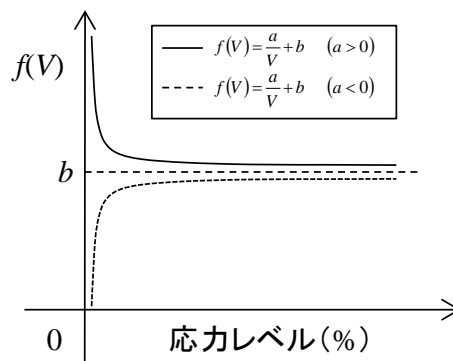


図 1.4.1 AE 発生確率密度関数 $f(V)$ と応力レベルの関係 (双曲線モデル)

よる細孔径分布試験であり、比較的微細な空隙を対象に評価が行われている。今日的課題として、その評価精度は計測技術の観点から見直す必要があると考えられている。

1990年代後半には、損傷力学理論における初期損傷度 Ω_0 の概念が導入され、圧縮応力場における応力 - ひずみ挙動のモデル化に基づく損傷度評価が試みられている。応力 - ひずみ挙動のモデル化には、CEB-FIP モデル⁸⁶⁾や Loland モデル^{48), 87)}が用いられた。1990年代後半から2000年代初頭には、初期損傷度 Ω_0 の概念から導かれる健全時の弾性係数 E^* の AE 法による推定が検討された⁸⁸⁾。2002年以降、計測値のデータベース化が進められ、推定値 (E^*) と実測値 (E_0) の関係や頻度分布が検討された^{89)~91)}。コンクリート損傷度は、推定した弾性係数 E^* を用いた相対損傷度 (E_0/E^*) と圧縮強度などの物性値との関係から検討されている⁸⁹⁾。実験的試みでは、水中凍結融解処理⁹⁰⁾、⁹¹⁾や促進中性化処理^{92)~94)}を施した供試体に加えて、アルカリ骨材反応 (ASR)⁹⁵⁾、構造体コンクリート^{96)~99)}により検証が行われた。一連の計測から解析までの流れは DeCAT (Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique) としてシステムを含めたコード化が試みられている^{100), 101)}。開発手法を用いた損傷度評価と力学特性の関係については、損傷力学の理論的観点から Nielsen モデル¹⁰²⁾による初期強度 S^* の推定が行われている¹⁰³⁾。なお、 E^* の推定については、推定方法の改善や精度向上のためにモデル化を含めた再検討の必要性が近年明らかになっている。一連の検討において推定した相対弾性係数は、弾性波動論の観点からポアソン比を考慮した動弾性係数 E_d と初期接線弾性係数 E_0 との関係により検討され、通常、室内モデル試験でのみ評価することが可能な相対損傷度 (相対動弾性係数) が圧縮強度試験においても AE 計測を導入することで推定可能であることが明らかにされた^{104), 105)}。動弾性係数の推定精度は、土木学会コンクリート委員会 326 小委員会「弾性波法の非破壊検査研究小委員会」(平成 14 年~18 年)において弾性波動論の観点から包括的に検討され、その特性から AE 法を用いた提案手法の有用性が理論的観点から明らかにされている¹⁰⁶⁾。

2008 年以降、凍結融解作用によりひび割れ損傷の発達したコンクリートを対象にコンクリート内部の損傷蓄積の特性を X 線 CT 法により可視化し、圧縮応力場の AE 発生挙動との関連から損傷コンクリートの破壊挙動の特性が評価された^{107)~112)}。AE 法を用いた材質評価において、材料内部の損傷蓄積と AE 発生挙動に関する詳細評価は重要な研究課題であり、筆者らによる実験的検討の結果、ひび割れ損傷の発達が圧縮変形の局所化とともに、載荷初期の AE を誘発することが明らかにされた^{7), 46), 108)~110)}。その特性は、空間統計パラメータであるセミバリオグラムにより定量評価が可能であり、評価指標であるシル値と局所損傷との関連が明らかにされている^{111), 112)}。

これらの一連の研究成果から、AE 計測に基づくコンクリート損傷度の定量的評価法の研究開発は、1980 年代後半から現在に至る 30 年間の検討の中でコンクリート力学特性と AE 発生頻度との関係を基礎に損傷度評価指標の検討が進められてきた。既往研究では、研究初期において AE 発生頻度のレートプロセス論によるモデル化から始ま

り、物性値と AE の関係、損傷力学理論の応用と初期損傷度概念の導入など、一連の流れがある。これらの研究開発を前提に、近年では筆者らの研究を踏まえた Huaizhi ら¹¹³⁾による類似研究が発表されるなど開発手法の普及も始まっている。

1.4.3 農業農村工学における AE の利用と施設機能診断

農業農村工学分野では、3省合同委員会¹⁷⁾が既存施設の維持管理実態を提示した2000年以降、破壊試験ないし非破壊試験に基づく農業水利施設の性能評価法^{114), 115)}が提案されている。AE法に関する調査研究は、それ以前の1984年に発表された桑原ら^{35), 116)~118)}のコンクリート構造物モニタリングを対象とした技術開発の一環として行われた実験的検討まで遡ることができる。一連の研究は、配合の異なるコンクリートとモルタルを製作し、圧縮荷重過程に発生する AE と目視により確認された表面ひび割れとの関連を評価したものである。AE 発生源に関する詳細な分析が行われていないことに加えて、圧縮破壊の進行と AE との関連が明らかにされておらず、実構造物への適用を目指した研究ではあるが、多くの検討課題が解決されずに残されている。桑原らによる試験研究が行われて以降、1980年代半ばから1990年代には農業水利施設を対象とした AE 法による調査研究は停滞し、2000年代初頭まで研究論文を確認することはできない。2000年以降、2002年に筆者ら⁸⁷⁾によりレートプロセス論と損傷力学を援用したコンクリートの損傷度評価の試みが報告されている。類似研究として、2008年に発表された山本ら³⁷⁾による EPS ビーズを添加したモルタルの荷重過程における AE 発生挙動を評価した事例がある。桑原らの先行研究が構造物モニタリングに焦点をあてたのに対して、2000年以降の筆者や山本による一連の研究開発は人工劣化^{37), 87)}、凍害⁷⁾、中性化⁹³⁾、磨耗損傷¹¹⁹⁾、地震災害¹²⁰⁾など農業水利施設に頻出する材料損傷に着目した検討が行われている点に特徴を有している。その中でも凍害損傷が進行したコンクリートの材質評価を試みた筆者ら⁷⁾の研究では、凍害が顕在化した実構造物よりコンクリート・コアを採取し、内在する層状ひび割れを対象に X 線 CT 法による損傷の可視化と定量評価を試みている。CT 値の空間分布特性と荷重時に発生する AE との関連から損傷状況を評価し、ひび割れ損傷の発達したコンクリートでは CT 値の低下と低応力下での AE の頻発が検出された。同様の検討を中性化が進行したコンクリートで試みた実験的研究⁹³⁾では、促進中性化処理に伴い顕著にサンプルの炭酸化収縮が進行し、その結果としてコンクリート中の細孔径分布の変質と荷重過程で検出される AE 特性の変化が明らかにされている。水利用条件下にある農業水利施設では、一般の社会基盤施設とは異なり凍害や中性化以外に水流磨耗に伴う表面劣化が顕在化する。コンクリート開水路を対象とした磨耗損傷に関する調査研究¹¹⁹⁾では、表面劣化の進行を AE 法と超音波計測を組み合わせた AU (Acousto-Ultrasonics) 法¹²¹⁾による表層材質評価の有効性が明らかにされた。使用した AE パラメータは平均周波数と検出波

のエネルギー値（最大振幅値，RMS 電圧，AE エネルギー）であり，それらの有用性が実構造物において確認された．一連の調査研究において，検出された AE による損傷度評価は，AE 発生頻度に基づく AE レートプロセス解析ないしデータベースを用いた相対損傷度の導出により試みられており，本研究の主題である検出した AE のエネルギー指標に基づく損傷度評価法は現状において確立されていない．

既存の農業水利施設における AE 計測は，送配水パイプラインにおいて数多く試みられているのは前述の通りである．筆者らは，パイプラインで発生する水理現象起源の弾性波を AE 法で検出し，漏水現象⁷⁴⁾や水撃圧⁷⁷⁾の同定，配管内の流動形態評価⁷⁶⁾を試み，構造材料の損傷度評価と同様，評価対象である水理現象の規模を AE パラメータにより定量評価できることを実証している．一連の検討を踏まえて，充水試験を対象に，AE パラメータによる水密性能照査法を開発している¹²²⁾．実構造物での検証の結果，提案手法の有用性を確認している．

パイプライン以外の農業水利施設に関する AE 法による実計測は，現状において行われていない．この原因には，一般的な計測技術と比較して AE 法はノイズを含めた高度な弾性波処理技術が必要であることに起因している．今後，精緻な維持管理やモニタリングの実施には AE 法による検討は有効であり，普及技術として拡大してゆくものと考えられるが，定着するためには研究成果の NDIS などによるコード化が不可欠であると推察される．

1.4.4 農業水利施設の性能規定化と AE 法によるモニタリング

近年，土木構造物の性能規定化の流れの中で ISO 規格によりアセットマネジメントの規格化（ISO55000～55002）が進められている¹²³⁾．加えて，ISO16311²⁵⁾では，前述の通りコンクリート構造物の維持管理と更新に関する初めての国際規格が 2014 年に制



(a) 漏水事故状況



(b) 漏水事故後の PC 管破損状況

図 1.4.2 農業用パイプラインでの漏水事故事例

定された。これら ISO 規格では、資産としての構造物のモニタリングが性能評価のために不可欠となっている。計測対象は構造損傷や金属部材の腐食など構造性能であることが一般的であり、要求性能を規定した後に各種破壊試験ないし非破壊試験の適用に基づく性能評価が行われる。

農業水利施設を対象とした場合、構造性能に加えて水理性能、水利用性能および社会的安定性能（耐震性能）の要求性能群¹¹⁾をモニタリングする必要がある。AE 法は弾性波を受動的に検出する方法であることから、構造破壊や水理現象など農業水利施設のモニタリングに有効な検査手法であると考えられる。特に内水圧を利用したパイプラインでは、漏水事故により性能低下が顕在化するが、その非破壊検査は人間の聴力を利用した古典的な方法^{124), 125)}により試みられることが多く、計測精度や原理に関する問題は解決されていない。新たな検査法の構築は、計測精度の向上ばかりでなく、国内外で多発している大規模な破裂事故（geyser phenomena）¹²⁶⁾を未然に防止するために社会的意義を有するものと考えられる（図 1.4.2）。

このような社会的背景を踏まえて、AE 法の高度化を含めた技術的検討は、RILEM^{31) ~33)}や（独）農研機構・農村工学研究部門（旧農村工学研究所）¹²⁷⁾などの国内外の試験研究機関において進められており、今後、既存施設の維持管理や更新の高度化に寄与するものと推察される。

1.5 本論文の構成

本論は 6 章で構成されている。第 1 章では、本研究の目的および社会的背景を AE 研究に関する近年の動向を踏まえて詳述する。第 2 章では、本研究の主題である圧縮荷重過程で発生する AE を指標とした材質評価の特徴を詳述する。第 3 章では、凍害損傷が顕在化したコンクリート・コアを対象にコンクリート中に発達したひび割れ損傷が物性値や AE 指標へ及ぼす影響を実証的に詳述する。ひび割れ損傷の可視化・定量化には、X 線 CT 法を援用し、幾何学的特徴量を抽出する。これらの検討は、第 4 章において提案する損傷度評価指標の基礎的検討となる。第 4 章では、農業水利施設に主に用いられているコンクリートを対象に損傷特性とそれを踏まえた AE による損傷度評価法を提示する。第 5 章は、第 4 章で開発した損傷度評価法をコンクリート開渠と既設橋梁 RC 床版に適用し、開発手法の有用性を検証する。第 6 章では以上をまとめ、本研究の結論を導く。

1.6 本研究の新規性・有用性

本論を執筆するにあたり、本研究の新規性と有用性を提示する。新規性は研究の特色や独創的な点、有用性は学術的または産業的な観点からの有利な点として提示する。本研究の取り組みの特徴は、第 1 に実環境下で発達した凍害起源のひび割れ損傷を X 線 CT 法および AE 法を用いて詳細に分析したことにある。既往研究では、農業水利施設に実際に発達した凍害損傷を詳細に分析評価した研究事例は少なく、効果的な既存施設の維持管理や更新においてこれら研究データが蓄積されることには社会的意義が大きい。第 2 にコンクリート内部に発達したひび割れ損傷と圧縮載荷過程で検出される AE パラメータとの関連を明確にした点である。構造材料の破壊過程と AE との関連は、AE 研究の当初より行われてきた。しかし、これら既往研究では、内部に発達したひび割れ損傷の特性と AE パラメータとの関連を十分に議論できていないが、本研究において実証的に検討した点に新規性があるものと考えられる。ひび割れ損傷の幾何学的特性の抽出には X 線 CT 法を用い、評価指標にはひび割れを含む空隙量、モルタル部の材質および形状特性の 3 つを用いた。これら評価指標と AE パラメータとの関連性を実証的に検討した後に AE を用いた損傷度評価法を提案していることが、既往研究にはない新たな取り組みといえる。

AE 法による既往の損傷度評価では、NDIS2421 (2000)⁶⁶⁾に代表されるように、損傷が蓄積した構造材料の AE 発生頻度から評価指標の構築が試みられている。本研究では、より具体的な実証的検討として、実環境で発達した凍害損傷を有するコンクリートを対象に、圧縮応力場の AE エネルギー放出に着目し、定性的損傷度評価指標を提案している。開発手法は、圧縮載荷過程での AE エネルギーの重心点を検出し、その際のひずみエネルギー値から損傷進行状況を評価する。そのことにより、圧縮載荷過程のコンクリート内部で発生する局所破壊の進行を同定し、最大応力である圧縮強度のみでは評価できないコンクリート損傷実態を実験的に明らかにできるものと考えられる。加えて、既往研究では実験室内で製作されたコンクリート・コアによるモデル試験が大多数を占めていたが、本研究では同一環境かつ同一施設から採取した損傷状況の異なる複数の供試体を用いることで、実構造物において具体的かつ同一精度での検討を行った点に本研究の特徴が有る。

開発手法の新規性を踏まえた本研究の有用性は、初期状態の不明瞭な多くの既存施設における現状の損傷度を圧縮載荷過程の AE データ解析により定性的に推定できることにある。一般的に圧縮強度試験による損傷推定は、最大応力を強度として評価し、基準値との相違から損傷の有無を推定している。この方法の問題点は、損傷判断を強度低下でのみ評価している点である。損傷の進行したコンクリートの強度は、ばらつきが大きいことに加えて、少数の供試体で評価されることが多いことから、確率論的な議論が困難である場合が多い。本研究では、少数の供試体について高い精度で損傷

状況を評価するため、圧縮載荷過程において検出される AE パラメータとひび割れ損傷との関連を詳細に分析する。また、これにより AE を導入した圧縮強度試験において損傷度の定性評価（損傷，中間的損傷，無損傷）が可能であることを明らかにする。AE 計測は，一般的な圧縮強度試験に導入可能であり，実務者への普及に基づく有用性の向上が期待できる。

参考文献

- 1) (社) 土木学会：5.5 農業水利施設，社会インフラ・メンテナンス学，pp. 379-383，2015.
- 2) 農林水産省：特集東日本大震災の発生，平成 22 年度農業白書（概要版），pp. 1-2，2012.
- 3) (社) 土木学会東日本大震災特別委員会：調査速報会報告書，2011.
- 4) (社) 日本建築学会：2011 年東日本大震災調査報告書，2011.
- 5) 森丈久，森充広，渡嘉敷勝，中矢哲郎：農業水利施設の構造機能診断手法のために調査手法，農業農村工学会誌，76（3），pp. 19-22，2008.
- 6) (社) 日本コンクリート工学会・文献調査委員会：コンクリート構造物の寿命評価事例，コンクリート工学，49（4），pp. 58-64，2011.
- 7) 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.
- 8) 九州橋梁・構造工学研究会・既設コンクリート道路橋の調査・診断法に関する研究分科会：長年月供用されたコンクリート道路橋の非破壊診断・耐荷力評価法に関する調査研究，pp. 1-285，2003.
- 9) 石田哲也：コンクリート構造物の性能予測技術の現状と展望，土木学会誌，98（11），pp. 24-25，2013.
- 10) (社) 農業土木学会：第 1 章 性能設計の現状，農業水利施設の性能設計，pp. 1-14，2006.
- 11) (社) 農業農村工学会：機能保全における性能設計入門，2008.
- 12) 中達雄，島武男，田中良和：更新・改修のための水路システムの機能診断，農業土木学会誌，69（5），pp. 453-458，2001.
- 13) 中達雄，田中良和，向井章恵：施設更新に対応する水路システムの性能設計，農業土木学会誌，71（5），pp. 51-56，2003.
- 14) 中達雄，樽屋啓之：用水路系に対する水理学的性能の基本的考え方，農業農村工学会論文集，256，pp. 9-15，2008.
- 15) 樽屋啓之，中田達，田中良和：水路システムの水利用診断のための手順，平成 23 年度農村工学研究所成果情報，pp. 19-20，2012.
- 16) 鈴木哲也，樽屋啓之，栗生田忠雄，中田達，藤山宗，中達雄：現地踏査による農業水利システムの水利性能実態の調査診断，農業農村工学会誌，83（4），pp. 11-14，2015.
- 17) 建設省・運輸省・農林水産省：土木コンクリート構造物耐久性検討委員会の提言，2000.
- 18) 藤本直也，長束勇：農業施設のコンクリート劣化の現状分析と補修の試み，農業土木学会誌，69（5），pp. 459-463，2001.
- 19) 川邊翔平，浅野勇，渡嘉敷勝，森充広，川上昭彦：農業水利施設の健全度評価の課題

- と提案, 農村工学研究所技報, 217, pp. 53-62, 2013.
- 20) (社) 土木学会: コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2001.
 - 21) (社) 日本建材産業協会: 鉄筋・鉄骨コンクリートの健全性評価方法の標準化のための調査研究報告書, 2001.
 - 22) (社) 土木学会・331 委員会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能小委員会報告書, 土木学会コンクリート技術シリーズ No. 71, 2006.
 - 23) (社) コンクリート工学会: 微破壊試験を活用したコンクリート構造物の健全性診断手法調査研究委員会報告書, 2012.
 - 24) (社) 日本コンクリート工学会: 既存コンクリート構造物の性能評価指針, 2014.
 - 25) ISO16311: Maintenance and Repair of Concrete Structures, 2014.
 - 26) (社) 日本非破壊検査協会編: コンクリート構造物の非破壊試験法, pp.1-10, 1994.
 - 27) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物の診断のための非破壊検査方法研究委員会報告書, 2001.
 - 28) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの非破壊試験法に関するシンポジウム論文集, 1991.
 - 29) (社) 日本コンクリート工学協会: コンクリートの非破壊試験法研究委員会報告書, 1992.
 - 30) (社) 日本建築学会: コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, 1983.
 - 31) M. Ohtsu, T. Shiotani, M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, J. G. M. van Mier, T. Vogel, C. Grosse, R. Helmerich, M. C. Forde, A. Moczko, D. Breyse, S. A. Ivanovich, A. Sajna, D. Aggelis, G. Lacidogna: Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic Emission and related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete Test Method for Damage Qualification of Reinforced Concrete Beam by Acoustic Emission, Materials and Structures, 43 (9), pp. 1183-1186, 2010.
 - 32) M. Ohtsu, T. Shiotani, M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, J. G. M. van Mier, T. Vogel, C. Grosse, R. Helmerich, M. C. Forde, A. Moczko, D. Breyse, S. A. Ivanovich, A. Sajna, D. Aggelis, G. Lacidogna: Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic Emission and related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete Test Method for Classification of Active Cracks in Concrete Structures by Acoustic Emission, Materials and Structures, 43 (9), pp. 1187-1189, 2010.
 - 33) M. Ohtsu, T. Shiotani, M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, J. G. M. van Mier, T. Vogel, C. Grosse, R. Helmerich, M. C. Forde, A. Moczko, D. Breyse, S. A. Ivanovich, A. Sajna, D. Aggelis, G. Lacidogna: Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic Emission and related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete, Measurement Method for Acoustic Emission Signals in Concrete, Materials and Structures, 43 (9), pp. 1177-1181, 2010.

- 34) Ohtsu, M.(Edit.), Suzuki, T., Lacidogna, G., Ohno, K., Kawasaki, Y., Mhamdi, L., Saliba, J., Vidya, R., Dumoulin, C., Oshita, H., Takeda, M., Ziehl, P., Proverbio, E. and Aggelis, D. G.: Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier, United Kingdom, pp. 1-291, 2015.
- 35) 桑原孝雄, 中谷三男, 小山修平: 単調載荷時のカウントレートおよびトータルカウント特性ーA.E.利用による構造物モニタリングシステムの開発 (I)ー, 農業土木学会論文集, 112, pp. 67-75, 1984.
- 36) 秩父顕美, 城和裕, 香川和夫, 鎌田正孝: AE による土の力学的挙動の評価, 農業土木学会誌, 55 (9), pp. 867-872, 1987.
- 37) 山本清仁, 小林晃, 青山咸康: EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動, 材料, 57 (10), pp. 1011-1018, 2008.
- 38) 皆川浩: コンクリート構造物のライフサイクル評価技術の現状と課題およびその展望, コンクリート工学, 48 (5), pp. 132-135, 2010.
- 39) 長谷川勝宣: 石油精製・石油化学プラントの高経年化, 非破壊検査, 62 (9), pp. 440-446, 2013.
- 40) 日置輝夫, 前田守彦, 鈴木裕晶: 下水道施設のアセットマネジメントにおける検査技術の適用事例, 非破壊検査, 62 (9), pp. 463-466, 2013.
- 41) Grosse, C. U. and Ohtsu, M. (Eds.): Acoustic Emission Testing, Springer, 2008.
- 42) 村上澄男: 第 1 章 材料の損傷と連続体損傷力学, pp. 2-10, 2008.
- 43) Kachanov, L. M.: 1.3 Isotropic Damage, Introduction to Continuum Damage Mechanics, pp.4-10, 1986.
- 44) 笠井芳夫編著: 10.1 空隙構造, コンクリート総覧, 技術書院, pp. 365-377, 1998.
- 45) 鈴木哲也: コンクリートの圧縮載荷時の 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.
- 46) 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.
- 47) 島本由麻, 永田瑞穂, 鈴木哲也: AE エネルギー指標に基づく道路橋 RC 床版部の蓄積損傷の同定に関する研究, 農業農村工学会農道研究部会報, 26, pp. 23-27, 2016.
- 48) Loland, K.E.: Continuous Damage Model for Load-Response Estimation of Concrete, Cement and Concrete Research, 10, pp. 385-402, 1980.
- 49) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリート材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, 30 (2), pp. 739-744, 2008.
- 50) Caliskan, S.: Use of Computed Tomography in Examining the Pore Structure of Concrete Corrosion and Void in Concrete, 11th International Conference Structural Faults+Repair-2006, CD-R, 2006.

- 51) 大津政康：コンクリート工学におけるアコースティック・エミッション（AE）研究の歴史と現状，土木学会論文集，No.496/V-24，pp.9-19，1994.
- 52) 岸上冬彦：破壊の進行に関する一実験，地震，6，pp. 25-31，1934.
- 53) Kaiser, V.J.: Knowledge and Research on Noise Measurements during the Tensile Stressing of Metals, Arkiv fur das Eisenhüttenwesen, 24, pp.43-44, 1953.
- 54) Obert, L.: The Microseismic Method of Predicting Rock Failure in Underground Mining, U.S.Bureau of Mines Report, Inv.3797, 1945.
- 55) Schofield, B. H.: Acoustic Emission under Applied Stress, Report ARL-150, Lessels and Associates, 1961.
- 56) Rusch, H.: Physical Problems in the Testing of Concrete, Zement Kalk-Gips (Wiesbaden), 12 (1), pp.1-9, 1959.
- 57) L'Hermite, R.G.: Volume Change of Concrete, Proc.4th Int. Symp. Chemistry of Cement, V-3, NBS Monograph, 43, pp.659-694, 1960.
- 58) Robinson, G.S.: Methods of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete and Its Behavior under Load Cement and Concrete Association, pp.131-145, 1965.
- 59) Wadley, H. N. G. and Scruby, C. B.: Acoustic Emission Source Characterization, Advances Acoustic Emission, Dunhart Publishers, pp. 125-153, 1981.
- 60) Pao, Y. H.: Theory of Acoustic Emission, Elastic Waves and Nondestructive Testing of Materials, AMD-Vol. 29, pp. 107-128, 1981.
- 61) 丹羽義次，小林昭一，大津政康：アコースティック・エミッションの発生機構に関する考察，土木学会論文報告集，314，pp. 125-136，1981.
- 62) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Functions in a Half Space, Journal of Acoustic Emission, 3 (1), pp. 27-40, 1984.
- 63) 大津政康，重石光弘，湯山茂徳，岡本享久：AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発，非破壊検査，42 (10)，pp. 111-117，1987.
- 64) (社) 日本非破壊検査協会：NDIS2106-1997 アコースティック・エミッション試験装置の性能測定及び表示方法，1997.
- 65) (社) 日本非破壊検査協会：NDIS2419-1997 金属製圧力容器などのアコースティック・エミッション連続監視方法，1997.
- 66) (社) 日本非破壊検査協会：NDIS2421-2000 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法，2000.
- 67) Gostautas, R., Valatka, T., Banakiewicz, P. and Zhou (Eds): Remote Structural Health Monitoring of a Fracture Critical Bridge, Progress in Acoustic Emission XV, pp. 187-192, 2010.
- 68) 重石光弘，中島猛，大津政康：鉄筋コンクリート道路橋主桁の繰返し曲げ載荷における Calm 比と Load 比について，第 14 回アコースティック・エミッション総合コンフ

- アレンス論文集, pp.165-168, 2003.
- 69) Shigeishi, M.: A Report of the Development of Acoustic Emission Application for Inspection of Bridge Superstructure, A Material of the Technical Committee on Acoustic Emission, Journal of JSNDI, 121, pp. 15-22, 2004.
 - 70) Ito, T., Shigeishi, M. and Ohtsu, M.: Acoustic Emission in Fatigue Process of Steel Plate-Concrete Composite Slab, Progress in Acoustic Emission XI, pp. 132-137, 2002.
 - 71) Shigeishi, M., Makizumi, T., Jo, H. and Ueda, J.: AE Monitoring of a Reinforced Concrete Road Bridge, Structural Faults and Repair 11, 2003.
 - 72) Anastasopoulos, A., Kourousis, D., Bolas, K. and Tsimogiannis, A.: Acoustic Emission Leak Detection of Buried Pipeline, Progress in Acoustic Emission XIV, pp.531-538, 2008.
 - 73) 鈴木哲也, 大津政康: 非破壊検査の適用による敷設後 30 年経過した PC 管路の定量的損傷度評価, 性能設計に関する勉強会報告及び研究発表会講演集, pp. 49-52, 2004.
 - 74) Suzuki, T., Ikeda, Y., Tomoda, Y. and Ohtsu, M.: Water - Leak Evaluation of Existing Pipeline by Acoustic Emission, Journal of AE, 23, pp. 272-276, 2005.
 - 75) Carmi, R., Bussiba, A., Widenfeld, G., Alon, I. and Hochbaum, I.: Experimental Study of Boiling Flow by Acoustic Emission, Progress in Acoustic Emission XV, pp. 307-312, 2010.
 - 76) 鈴木哲也, 中達雄, 樽屋啓之, 田中良和, 青木正雄: AE 法を用いたオープン型パイプラインに発生する気液二相流の特性評価, 構造工学論文集, 56A, pp. 665-670, 2010.
 - 77) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: パイプラインに発生した圧力波の非破壊検出に関する研究, 農業農村工学会論文集, 287, pp. 95-103, 2013.
 - 78) 山本清仁, 小林晃, 青山咸康: EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動, 材料, 57 (10), pp. 1011-1018, 2008.
 - 79) (社) 日本非破壊検査協会編: 2.2.2 材料の破壊による AE の特徴, アコースティック・エミッション試験 II, pp. 9-11, 2008.
 - 80) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版, pp. 6-14, 1966.
 - 81) 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.
 - 82) 大津政康, 森永浩通: AE 法によるコア供試体の劣化度判定報に関する研究, セメント・コンクリート論文集, 43, pp. 394-399, 1989.
 - 83) Ohtsu, M.: Rate Process Analysis of Acoustic Emission Activity in Core Test of Concrete, Proc. of JSCE, No.442/V-16, pp. 211-217, 1992.
 - 84) 石橋晃睦, 松山公年, 福手勤, 浜田秀則, 大津政康: レートプロセス解析の港湾構造物の老朽化評価への適用, 第 10 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 165-170, 1995.
 - 85) 大津政康, 藤岡泰作, 時任哲郎: AE 法と損傷力学に基づくコンクリートの劣化度評価, セメント・コンクリート論文集, 51, pp. 198-203, 1997.

- 86) 飯田剛史, 渡辺弘史, 友田祐一, 大津政康: AE レートプロセス解析のコンクリート損傷度評価への適用, コンクリート工学年次論文集, 22 (1), pp. 271-276, 2000.
- 87) 鈴木哲也, 渡辺弘史, 大津政康: AE 法によるコンクリートの定量的損傷度評価に関する研究, 応用力学論文集, 5, pp. 809-816, 2002.
- 88) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 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, 26 (1), pp. 1791-1796, 2004.
- 89) 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.
- 90) 米野現樹, 鈴木哲也, 大津政康: コンクリート損傷度評価への AE レートプロセス解析の適用, 材料学会誌, 54 (8), pp. 850-854, 2005.
- 91) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康: コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究, 土木学会論文集, 809/V-70, pp. 95-106, 2006.
- 92) Suzuki, T., Tomoda, Y. and Ohtsu, M.: Quantitative Damage Evaluation of Carbonated Concrete based on AE Rate Process Analysis, 3rd Kumamoto International Workshop on Fracture, AE and NDE in Concrete, Kumamoto Japan, 2003.
- 93) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康: AE レートプロセス解析に基づく中性化コンクリートの損傷度評価, 応用力学論文集, 7, pp. 1225-1232, 2004.
- 94) Suzuki, T., Komeno, G. and Ohtsu, M.: Damage Mechanics of Carbonated Concrete by AE Rate Process Analysis, International Conference of Fracture, Turin Italy, 2005.
- 95) 油野邦弘, 井上芳樹, 大津政康: AE 発生挙動の確率過程論解析によるコンクリートの劣化度評価研究, 土木学会論文集, No.520/V-28, pp. 13-23, 1995.
- 96) 鈴木哲也, 池田幸史, 友田祐一, 大津政康: AE レートプロセス解析に基づく既設コンクリート構造物より採取したコア供試体の定量的損傷度評価に関する研究, セメント・コンクリート論集, 57, pp. 172-177, 2003.
- 97) Suzuki, T. and Ohtsu, M.: Damage Evaluation of Structural Concrete in a Compression Test based on AE Rate Process Analysis, Construction and Building Materials, 18, pp. 197-202, 2004.
- 98) 米野現樹, 鈴木哲也, 大津政康: AE レートプロセス解析による既設構造物の定量的損傷度評価, 平成 17 年度土木学会全国大会要旨集, CD-R, 2005.
- 99) 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.
- 100) 鈴木哲也, 中達雄, 大津政康: AE 法を用いたコンクリート損傷度評価システム DeCAT の開発, ARIC 情報, 99, pp. 15-19, 2010.
- 101) 鈴木哲也: 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, pp. 19-27, 2012.

- 102) Nielsen, L. F.: On Strength of Porous Material: Simple Systems and Densified Systems, *Materials and Structures*, 31, pp. 651-661, 1998.
- 103) 鈴木哲也, 米野現樹, 大津政康: AE 法を用いたコンクリート力学特性の推定に基づく損傷度評価に関する研究, 第 15 回アコースティック・エミッション総合コンファレンス論文集, pp. 141-144, 2005.
- 104) 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.
- 105) 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.
- 106) (社) 土木学会: 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, *コンクリート技術シリーズ*, 73, pp. 31-36, 2007.
- 107) 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.
- 108) 山岸俊太朗, 鈴木哲也, 緒方英彦, 周藤将司: 凍害損傷の進行したコンクリートの圧縮破壊特性評価に関する研究, *コンクリート工学年次論文集*, 35 (1), pp. 385-390, 2013.
- 109) 山岸俊太朗, 鈴木哲也, 大津政康, 森井俊広, 河合隆行: 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*, 13, pp. 41-48, 2013.
- 110) 山岸俊太朗, 鈴木哲也, 森井俊広, 大津政康: 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, *コンクリート工学年次論文集*, 36 (1), pp. 2158-2163, 2014.
- 111) 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コンクリートの特性評価, *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*, 14, pp. 357-362, 2014.
- 112) 山岸俊太朗, 鈴木哲也, 森井俊広: X 線 CT 画像を用いたコンクリート内部のひび割れ特性評価, *コンクリート工学年次論文集*, 37 (1), pp. 1795-1800, 2015.
- 113) Huaizhi Z. Su, Jianjie J. Tong, Jiang Hu and Zhiping P. Wen: Experimental Study on AE Behavior of Hydraulic Concrete under Compression, *MECCANICA*, 48 (2), pp. 427-439, 2013.
- 114) (社) 農業土木事業協会: 農業水利施設の機能保全の手引き, 2007.
- 115) (社) 農業土木事業協会: 農業水利施設の機能保全の手引き・パイプライン, 2009.
- 116) 中谷三男, 桑原孝雄, 河浪秀次: A.E.利用による土木材料の破壊に関する基礎的研究 (III) 一骨材周辺部の分離に伴う A.E.発生特性について, *農業土木学会大会講演集*, pp. 498-499, 1980.
- 117) 桑原孝雄, 中谷三男, 小山修平: 繰返し荷重下における A.E.特性一A.E.利用による構造物モニタリングシステムの開発 (II) 一, *農業土木学会論文集*, 112, pp. 77-86, 1984.

- 118) 桑原孝雄, 河浪秀次, 中谷三男・小山修平: A.E.スペクトル特性ーA.E.利用による構造物モニタリングシステムの開発 (III) ー, 農業土木学会論文集, 112, pp. 87-92, 1984.
- 119) Suzuki, T., Ohtsu, M., Aoki, M. and Nakamura, R.: Damage Identification of a Concrete Water - Channel in Service by Acoustic Emission, Advance Acoustic Emission, pp. 46-51, 2007.
- 120) 鈴木哲也, 大津政康, 中達雄: 東日本大震災で被災したコンクリート構造物の非破壊損傷度評価と破壊試験による評価精度の検証, コンクリート技術シリーズ No. 100・コンクリートの非破壊評価技術の信頼性向上に関する研究小委員会 (Ⅱ期) 報告書, pp. 181-188, 2012.
- 121) H. Reginald Hardy, Jr.: Acoustic Emission / Micro Seismic Activity, Volume 1 Principles, Techniques and Geotechnical Application, A. A. Balkema Publishers, pp. 249-256, 2003.
- 122) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: 弾性波計測による損傷パイプラインの水密性評価に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 69 (2), pp. I 49- I 54, 2014.
- 123) (社) 京都ビジネスリサーチセンター: アセットマネジメント資料 (国際規格化 ISO5500X), 2011.
- 124) (財) 水道管路技術センター: 1.6 管路の診断方法, 鋳鉄管・鋼管・硬質塩化ビニル管診断手法の開発調査報告書, pp. 13-18, 1994.
- 125) (社) 農業土木事業協会: 3.3 パイプラインの機能診断調査方法の総括, 農業水利施設の機能保全の手引き・パイプライン, pp. 91-93, 2009.
- 126) Wright, S. J., Lewis, J. W. and Vasconcelos, J. G.: Physical Process Resulting in Geysers in Rapidly Filling Storm-Water Tunnels, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 137 (3), pp.199-202, 2011.
- 127) (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.

第2章 圧縮載荷過程に発生する AE を指標とした コンクリート材質評価

2.1 概説

本研究では圧縮載荷過程に発生する AE を指標としたコンクリート損傷度評価法を構築する。本章では、その前提となる既往研究を概観し、圧縮載荷過程のコンクリート破壊挙動とその際に発生する AE の特性について考察する。AE 特性に関する着目点は、本研究で主に用いる AE 発生頻度と検出波のエネルギーである。2.2 ではコンクリートの圧縮載荷過程に発生する破壊挙動の特徴について概説する。2.3 では、2.2 での議論を踏まえて材料中の AE 発生とその特徴を概観する。特に、検出した AE の信号処理方法と AE パラメータ解析による特徴量の抽出については 2.4 において詳説し、第 4 章以降の議論に関連する基礎的知見を整理する。2.5 では以上の議論を踏まえて農業水利施設へ AE 法を適用する際の技術的課題を明らかにする。

なお、本章での弾性波動や AE に関する理論的記述は、振動・騒音対策ハンドブック¹⁾、アコースティック・エミッション試験 I, II^{2),3)}、佐藤泰夫著・弾性波動論⁴⁾および筆者が既に執筆している博士論文⁵⁾を全般的に参照した。

2.2 コンクリート圧縮載荷過程の特徴と強度・変形特性

2.2.1 圧縮載荷過程における応力 - ひずみ挙動の特徴

圧縮載荷過程の特徴量は応力 - ひずみ挙動により評価される。コンクリートの応力 - ひずみ曲線の概要を図 2.2.1 に示す。応力 - ひずみ曲線は、コンクリート内部の微小破壊が応力の増大により徐々に進行するため、厳密には載荷初期から非線形となる。最大応力の記録後には、ひび割れの急激な進展によりひずみ軟化挙動を示すため、応力 - ひずみ曲線の勾配が負となる。一般的に、圧縮載荷過程の進行に伴う無損傷コンクリートの破壊挙動は、おおよそ以下のようになる（図 2.2.2）⁶⁾。

- (1) 最大応力の約 30 %の応力で粗骨材とモルタルの境界である遷移帯において微細ひび割れが局部的に発生し、剛性（弾性係数）がわずかに低下する（図 2.2.2, 第 1 段階）。
- (2) 最大応力の約 50 %の応力で粗骨材周辺に発生したひび割れがモルタル中に進展する（図 2.2.2, 第 2 段階）。
- (3) 最大応力の約 80~90 %の応力でひび割れの連結が進行する。この段階を臨界応力度と呼ぶ（図 2.2.2, 第 3 段階）。

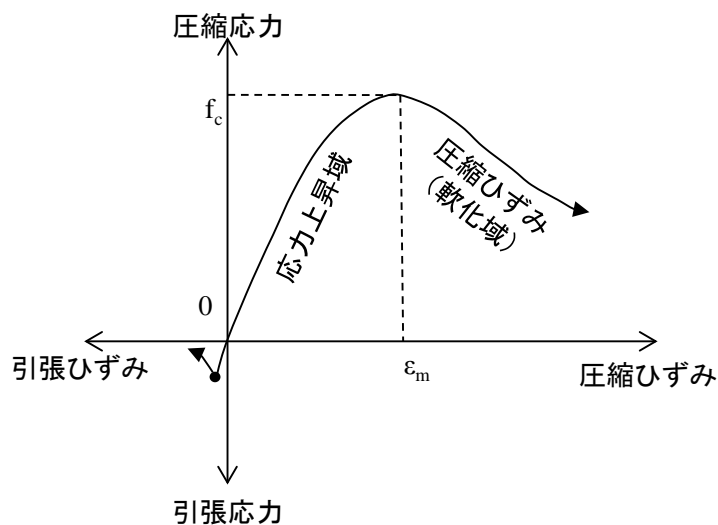


図 2.2.1 コンクリートの応力 - ひずみ挙動

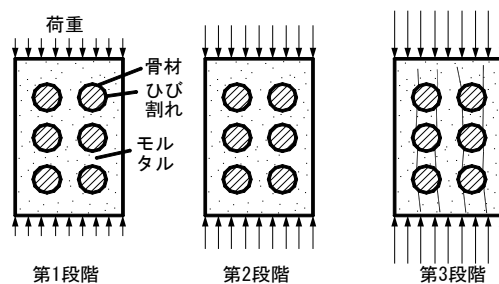
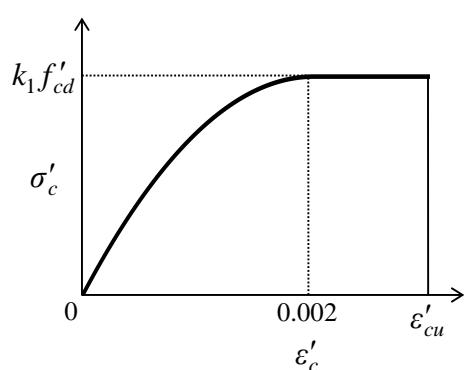


図 2.2.2 コンクリートの圧縮破壊過程

ひび割れ損傷がコンクリート中に発達した場合、ひび割れへの応力集中に伴う破壊挙動の局所化が進行する。その際、圧縮強度や最大ひずみの低下に伴う脆性化が確認できる。AE は、ひび割れ発生に伴い放出されるエネルギーが弾性波に変換されたものであることから、前述の最大応力の約 30 % から検出される。ひび割れの連結が進行する最大応力の約 80 % の応力では、内在する損傷に関係なく発達したひび割れの進展や擦れにより AE が検出される。換言すれば、応力レベル 30 % から 80 % の範囲が材質と密接した圧縮破壊過程と考えることができる。既往研究では、応力レベル 30 % から 80 % を対象に圧縮応力場に発生する AE に着目し、その発生頻度を破壊の確率過程論により評価することで、コンクリート損傷を定量評価できることを明らかにしている⁵⁾。より損傷の進行したコンクリートでは、脆性破壊が顕著になる供試体や層状ひび割れの発達に伴う圧縮ひずみの卓越が検出されるものなど、応力 - ひずみ曲線の変質が認められる。筆者らは、コンクリート・コアの圧縮応力場における AE 発生挙動をより詳細に解析するため、ひずみレベルでの検討を試み、圧縮載荷過程に発生する AE と損傷蓄積との密接な関連を明らかにしている（詳細：第 4 章）⁷⁾。

表 2.2.1 コンクリート圧縮強度へ及ぼす影響因子一覧

	分類	要因
内的 要因	(1) 配合	① 水セメント比, ② 粗骨材量, ③ 空気量 など
	(2) 打設方法	打ち込み方向と載荷方向の関係 (コンクリートの異方性の影響)
	(3) 養生条件・材齢	① 養生条件, ② 材齢, ③ 試験時の供試体の水分条件
外的 要因	(4) 供試体の形状・寸法	① 高さ - 直径比, ② 形状, ③ 寸法, ④ 加圧面の平滑度
	(5) 載荷方法	① 載荷速度, ② 端面摩擦
	(6) ひずみ試験方法	① 測定長, ② 試験機器とその取り付け位置 (接触試験の場合)



$$k_1 = 1 - 0.003 f'_{ck} \leq 0.85$$

$$\varepsilon'_{cu} = \frac{155 - f'_{ck}}{30000} \quad 0.0025 \leq \varepsilon'_{cu} \leq 0.0035$$

ここで, f'_{ck} の単位は N/mm^2

曲線部の応力ひずみ式

$$\sigma'_c = k_1 f'_{cd} \times \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \times \left(2 - \frac{\varepsilon'_c}{0.002} \right)$$

k_1 : 強度の低減係数 ε'_{cu} : 終局圧縮ひずみ

f'_{cd} : 設計圧縮強度 f'_{ck} : 特性値

図 2.2.3 応力 - ひずみ曲線モデル化の一例¹³⁾

コンクリートの応力 - ひずみ挙動に影響する要因には, 水セメント比⁸⁾や, 粗骨材⁹⁾, 養生条件¹⁰⁾, 供試体形状¹¹⁾, 供試体寸法¹²⁾, 載荷速度⁶⁾などが報告されている. 各種影響因子の一例を表 2.2.1 に示す. 応力 - ひずみ曲線の解析法は, 単調載荷と繰返し載荷で異なっているが, 実用表示法としては, 直線表示, 折線表示, 曲線表示などの方法がある. 土木学会では, コンクリートの応力 - ひずみ挙動の評価モデル (曲線表示) の一例として図 2.2.3 が提示されている¹³⁾. 応力 - ひずみ曲線は σ'_c により評価され, ひずみ量 $\varepsilon'_c = 2,000 \mu$ 時に最大値 $k_1 f'_{cd}$ となるモデルである.

損傷蓄積によるコンクリートの圧縮破壊挙動の変質は, 有効断面の減少に伴う材料物性の低下により引き起こされる. 本研究では, コンクリートの損傷度を AE 指標に加えて, 応力 - ひずみ曲線から求められるひずみエネルギーと損傷力学指標 λ を用いて評価する. ひずみエネルギーは圧縮応力場においてコンクリートがなされた仕事であり, その物理的意味と解析方法について 2.2.2 に詳説する. 損傷力学指標 λ は, 応力 - ひずみ曲線の形状的特徴を相対弾性係数として評価するものであり, スカラー損傷度 (Scalar Damage Model)¹⁴⁾概念を用いて損傷変数 Ω を導入したモデル (式 (2.1)) より

導かれるものである。2.2.3 において詳説する。

$$\sigma = E^* (1 - \Omega) \varepsilon \quad (2.1)$$

ここで、 σ ：応力、 E^* ：健全時の弾性係数、 Ω ：損傷変数、 ε ：ひずみである。

2.2.2 ひずみエネルギー指標を用いた応力 - ひずみ挙動評価

コンクリートの材料変質を考慮した損傷度評価では、圧縮強度に代表される応力 - ひずみ曲線の最大値に加えて、コンクリートに生じる圧縮応力場がなした仕事（力×変位の内積）を評価することにより、力学特性の観点から各応力場における材料物性を評価することが可能となる。本研究では、応力 - ひずみ挙動の応力値、ひずみ値を考慮した評価指標である、ひずみエネルギー¹⁵⁾を用いることにより脆性化の進行したコンクリートの力学特性評価を試みる。

応力 - ひずみ挙動の応力を σ 、ひずみを ε とし、ひずみエネルギーを U （単位：J）とすると、式（2.2）を導くことができる。

$$U = \frac{\sigma \varepsilon}{2} \cdot Al = \frac{E \varepsilon^2}{2} \cdot Al \quad (2.2)$$

ここで、 A ：試料の断面積、 l ：試料高、 E ：弾性係数である。応力 - ひずみ曲線が線形領域のみで構成されている場合、式（2.2）を適用することができる。非線形領域を有する場合、式（2.3）によりひずみエネルギーを評価する必要がある。

$$U = \int_0^{\varepsilon} (E \varepsilon) d\varepsilon \cdot Al \quad (2.3)$$

なお、本研究により開発するコンクリート損傷度評価法では、式(2.2)ないし式(2.3)により評価されるひずみエネルギーを圧縮応力場において検出された AE のエネルギー指標と比較し、それらを踏まえた「重心ひずみエネルギー」を新たに定義する。本研究では、重心ひずみエネルギーの観点からコンクリートに蓄積した損傷を定性評価する。

2.2.3 スカラー損傷モデルを用いた応力 - ひずみ挙動評価

ひずみエネルギーに加えて、本研究では応力 - ひずみ曲線の形状的特徴を評価する損傷力学指標 λ を算出する。構造材料の損傷蓄積に関する議論は、損傷力学において荷重を受けることのできる有効断面の減少として定義されている¹⁶⁾。一般的に構造損傷と力学特性（応力 - ひずみ挙動）の議論では、延性材料が主な研究対象であったことから、引張り強度試験や曲げ強度試験でモデル化されることが多い。本研究では、コ

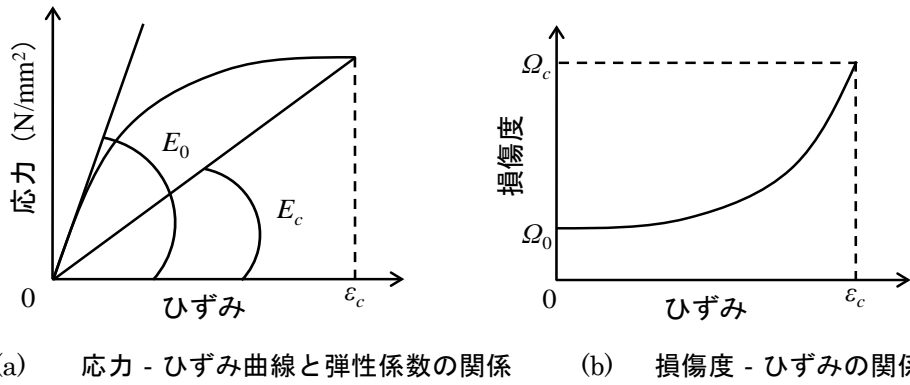


図 2.2.4 弾性係数と損傷度の関係

コンクリートの引張り応力場の応力 - ひずみ挙動に CDM (Continuous Damage Model) 概念を導入した先駆的研究である Loland ¹⁷⁾によって提案された、応力 - ひずみ挙動の定量評価指標である λ (式 (2.9)) に着目し、圧縮応力場の力学特性評価へ Loland モデルの適用を試みる。

本項では Loland モデルを概説した後に、本モデルが引張り応力場の応力 - ひずみ挙動をモデル化していることに鑑み、論文 ¹⁷⁾が発表された 1980 年から 2016 年までの被引用文献を参照し、圧縮載荷への Loland モデル適用の可否を検討する。

(1) Loland モデル ¹⁷⁾

Loland は、1980 年に Cement and Concrete Research 誌において、引張り応力下のコンクリートを対象に、損傷による有効断面の減少を考慮した応力 - ひずみ挙動の推定法を発表した。コンクリート損傷を CDM 概念により定義し、以下に示す応力 - ひずみ曲線の評価式に反映した。

損傷力学における損傷変数 Ω は、荷重を受けることのできる断面 A と有効断面 A^* との相対比として定義できる (式 (2.4)) ¹⁶⁾。応力 - ひずみ挙動の一般式から、弾性係数の相対的变化として変換でき、以下のように定義できる。

$$\Omega = 1 - \frac{A^*}{A} = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (2.4)$$

ここで、 E : コンクリートの弾性係数、 E^* : 健全時の弾性係数である。

Loland は、損傷変数 Ω と応力 - ひずみの関係を以下のように仮定している (図 2.2.4)。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (2.5)$$

なお、 Ω_0 ：初期損傷度、 A_0 、 λ ：材料固有の定数である。

式 (2.1)，(2.4) および (2.5) より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned}\sigma &= E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1}\end{aligned}\quad (2.6)$$

ただし

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (2.7)$$

$$A_0 = \frac{1}{(\lambda + 1) \varepsilon_c^\lambda} \quad (2.8)$$

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (2.9)$$

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、 ε_c ：最大応力時のひずみである。本式は、弾性係数の相対比として応力 - ひずみ曲線の形状的特徴を示すものであり、評価対象の応力 - ひずみ挙動において $E_0 = E^*$ の成立が前提となる。

本研究では、式 (2.9) に示す λ を圧縮載荷過程における応力 - ひずみ曲線の簡易的評価指標として用いる。その前提として、式 (2.5) の ε^λ が引張り破壊特有の項であることから、Loland モデルに関する被引用文献を参照し、本モデルの圧縮載荷過程への適用の可否を検討する。

(2) Loland モデルを用いた既往研究（1980 年～2016 年）

既往研究に関する文献調査は、Cement and Concrete Research 誌において Loland (1980)¹⁷⁾ が発表した論文を引用した被引用文献（1980 年～2016 年）を対象とした。調査方法は、Web of Science (Ver. 5.14) にて上記論文を引用した研究論文を抽出し、載荷条件と Loland モデルの適用方法を確認した。

調査の結果、被引用文献は 56 件（筆者らの 3 論文を含む）確認された。論旨を概観すると、損傷度評価モデルとしての CDM に関する記述が最も多く、本研究の対象である圧縮応力場におけるコンクリート損傷を考慮した応力 - ひずみ挙動を評価したものはその内 15 件である。筆者ら同様、圧縮応力場の AE を検出した事例は 3 件である。その他の先行研究は、応力 - ひずみ挙動をモデル化する際に CDM を考慮し、Loland モデルも CDM に関する研究開発の一事例として参照するものが多数を占めた。以下に各文献の概要をまとめ、圧縮応力を受けるコンクリートへ Loland モデルを用いる有効性と技術的課題を考察する。

2014 年に発表された Chen ら¹⁸⁾の研究は、岩石材料 Granite の凍結融解抵抗性を圧縮応力下の応力 - ひずみ挙動から評価した。評価指標に Loland が提案した損傷パラメータを用い、凍結融解サイクルと評価指標との関係から Granite の特性を評価した。実験的検討の結果、凍結融解サイクルの進行に伴い初期損傷度の増加を報告した。その際、Loland モデルの λ を解析的検討に考慮している。Chen らは、前年に同様の検討をコンクリートについても行っており、応力 - ひずみ挙動の詳細なモデル化を試みている (Chen ら^{19), 20)}。

2013 年に発表された He ら²¹⁾の研究は、SHCC (the Strain Hardening Cementous Composite ; ひずみ硬化型セメント複合材料) を対象に圧縮応力場と引張り応力場の応力 - ひずみ挙動に着目し、損傷パラメータを考慮した定式化を行った。提案手法は実験値との整合もよく、損傷を考慮した応力 - ひずみ挙動の実用的な評価モデルが提示された。同年に公表された Huaizhi ら²²⁾の研究は、2007 年に発表された筆者ら²³⁾の先行研究を参照し、AE 試験を含む圧縮応力下のコンクリートの応力 - ひずみ挙動と AE 発生挙動の関連について考察した。実験的検討の結果、Suzuki ら²³⁾と類似な実験結果を得た。本報においても Chen ら¹⁸⁾と同様に、圧縮応力場への Loland モデル適用に関する特別な言及は無い。

2012 年に発表された Zhou ら²⁴⁾の研究は、圧縮応力を受けるコンクリートを対象にひび割れ損傷の発達がコンクリート物性 (物質移動特性) へ及ぼす影響を実験的に検討した。コンクリート物性の変質を空隙の発達に起因するガス浸透量や吸水特性、電気抵抗性を指標に評価した。コンクリート損傷の指標には、超音波伝播を用いた損傷パラメータ (Ultrasonic Damage) を提案した。実験的検討から、吸水特性の増加した損傷コンクリートでは、損傷パラメータの増加が確認された。Loland モデルは、参照のみ行われており、モデル化の主要な先行研究とはなっていない。

2011 年に発表された Ohtsu²⁵⁾の研究は、人工的に凍結融解損傷を進行させたコンクリートを対象に P 波速度から算出される動弾性係数 E_d を用いた相対動弾性係数 (JIS A 1148) と圧縮強度試験より算出される静弾性係数を用いた相対弾性係数を比較し、両指標が類似した評価値になることを報告した。Loland モデルは、圧縮応力場の応力 - ひずみ挙動を評価する際に用いられている。

2009 年に発表された Goncalves ら²⁶⁾の研究は、2007 年に公表された筆者ら²³⁾の先行研究を参照し、モルタルを対象に圧縮載荷過程の応力 - ひずみ挙動を評価した。Loland モデルを応力 - ひずみ曲線を評価する際に損傷度評価に用いている。同一著者の 2007 年に発表した研究論文²⁷⁾では、粗骨材の異なるコンクリートの応力 - ひずみ挙動を Loland モデルで評価し、その有効性を明らかにした。

1989 年に発表された Ju ら²⁸⁾の研究は、CDM 概念を考慮したモルタルやセメントペーストの圧縮載荷過程の応力 - ひずみ挙動を実験および解析的に検討した。Loland モデルは、CDM に関する一連の研究として紹介されている。同様の検討は、Suaris ら²⁹⁾

も報告している。

Loland と同様の定式化により圧縮応力場のコンクリートを評価した事例としては 1987 年に公表された Ouyang ら³⁰⁾の研究を参照することができる。本論は、りん石膏 (Phosphogypsum) を含有するセメント材料を対象に圧縮応力場の応力 - ひずみ挙動に損傷度 (文献では ω) を考慮し、初期損傷度 ω_i と損傷度 ω の間に式 (2.10) を仮定している。Ouyang は、コンクリート載荷過程において発生する材料内部での引張応力と圧縮応力の混在する破壊現象を考慮し、Loland モデルの式 (2.4) と同一である式 (2.10) を用いた応力 - ひずみ挙動の評価を試みている。

$$\omega = \omega_i + \beta \varepsilon^n \quad (2.10)$$

ここで、 β : 材料定数、 ε : ひずみである。

式 (2.10) を考慮した応力 - ひずみ挙動は、式 (2.11) により評価されている。式 (2.10) と式 (2.11) は、Loland モデルと同様の定式化であり、材料定数である式 (2.10) 中の n 値は Loland モデルの λ (式 (2.9)) と同様の評価式である (式 (2.12))。

$$\sigma = E_n (1 - \omega) \varepsilon \quad (2.11)$$

$$n = \frac{E_{sce}}{E_i - E_{sce}} \quad (2.12)$$

ここで、 E_n : 無損傷状態の弾性係数、 E_{sce} : 割線弾性係数、 E_i : 初期接線弾性係数である。

実験的検討の結果、本モデルにより圧縮応力下の応力 - ひずみ挙動が良好に再現できることが明らかにされた。Loland¹⁷⁾の検討では引張り応力場での応力 - ひずみ挙動を実験的に証明したが、Ouyang ら³⁰⁾により同様の応力 - ひずみ挙動の評価モデルを用いることで圧縮応力場においても十分な精度で力学特性を再現可能であることが明らかにされた。

以上の Loland モデルに関連する先行研究を概観した結果、応力 - ひずみ挙動の定式化において有効断面の減少を考慮した損傷度概念 (CDM) が多用されていた。本研究対象である圧縮応力場の応力 - ひずみ挙動の定式化は、Ouyang ら³⁰⁾により Loland¹⁷⁾と同様の式展開 (式 (2.10) ~ 式 (2.12)) に基づく評価が可能であることが明らかにされた。このことから、式 (2.9) による圧縮応力下の応力 - ひずみ挙動の特性評価は可能であると考えられる。筆者らの先行研究では、無損傷コンクリートと実験室内で水中凍結融解処理を 300cycle 施したサンプルの圧縮載荷過程の応力 - ひずみ挙動に Loland モデルを適用した結果、実験値と解析値に良好な対応関係を明らかにしている

³¹⁾

そこで本研究では、圧縮載荷過程のコンクリート挙動が Loland モデルにより評価可能であることを前提に、損傷力学指標 λ を応力 - ひずみ挙動の評価指標として用いる。

2.2.4 動弾性係数を用いた応力 - ひずみ挙動評価

コンクリートの力学特性は、圧縮強度試験から求められる応力 - ひずみ曲線より材料特性として圧縮強度ないし弾性係数が評価される。弾性係数には、破壊試験から求められるものと、共鳴法³²⁾に代表される非破壊試験により評価されるものとがある。

共鳴法の概念を理論的に述べれば、超音波の伝播速度 V_1 を共振周波数 f で除して、式 (2.13) より波長が導かれる。

$$\eta = \frac{V_1}{f} \quad (2.13)$$

ここで、 η : 波長 (m), V_1 : 伝播速度 (m/s), f : 1 次共振周波数 (Hz) である。共振現象は縦波振動、たわみ振動、ねじり振動における振動モードが波長と一致するために生じるので、波長と供試体の振動モードの代表長さ L との対応から伝播速度は決定される。縦方向の振動モードの第 1 次モードでは、式 (2.14) になる。

$$V_1 = 2Lf \quad (2.14)$$

式 (2.14) により算出される伝播速度から動弾性係数を決定することができる。コンクリート標準示方書³²⁾に記載されている縦波振動に対する動弾性係数の推定式は、1 次元部材の近似式として下式となる。

$$V_1 = \sqrt{\frac{E_D}{\rho}} \quad (2.15)$$

ここで、 E_D : (式 (2.15) による) 動弾性係数 (GPa), ρ : 供試体の密度 (kg/m³) である。式 (2.15) は、ポアソン比を考慮していない。しかし、部材そのものは 3 次元物体であることからポアソン比の影響が無視されている式 (2.15) は理論的には近似式に他ならない^{33)~35)}。そこで本研究では、ポアソン比の影響を考慮した 3 次元弾性体での縦波速度の定義式 (2.16) を用いることにより動弾性係数 E_d を推定した³⁶⁾。

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (2.16)$$

ここで、 E_d : (式 (2.16) による) 動弾性係数 (GPa), ν : ポアソン比, V_p : 縦波速度 (m/s) である。式 (2.16) より評価した E_d は、 E_D (式 (2.15)) と比較して、圧縮強度試験より求められる静弾性係数との整合が良好であることが既往研究により明らかにされている³³⁾。

本研究では、超音波伝播速度試験から求められる P 波速度を用いて、損傷度評価対象であるコンクリート・コアの動弾性係数を式 (2.16) により評価する。

2.3 コンクリート損傷の力学表現

2.3.1 損傷コンクリートの圧縮破壊特性

長期間供用されたコンクリート構造物は、設置環境の影響により損傷が蓄積し、強度などの力学性能を低下させる。構造材料の損傷とは、材料内部の空隙の発達とこれに起因する有効断面の減少による力学特性の劣化であることは前述の通りである¹⁴⁾。損傷力学は、材料の損傷と破壊の進行過程を解析するための力学理論である。コンクリートを対象とした場合には、村上³⁷⁾の分類では主に微視的スケールの現象を対象とすることとなる。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層から発生するが、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ひび割れが発生する。微視的ひび割れは、モルタル層に発達し、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、モルタル層中の混合モードのひび割れとなり、終局時破壊となる（図2.2.2参照）。一連の載荷過程におけるコンクリートの圧縮ならびに引張り挙動の一例を図2.3.1に示す。いずれの載荷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が明らかになる。

コンクリート損傷の進行は、設置環境における材質劣化や載荷による影響を受けて

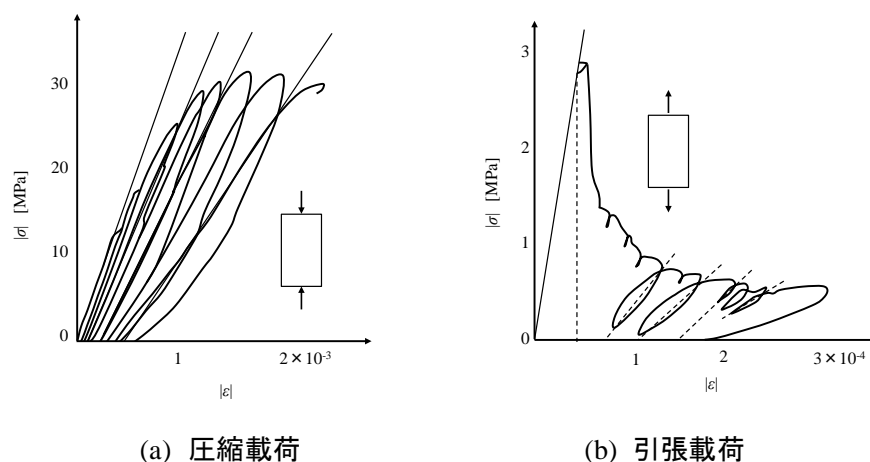


図 2.3.1 コンクリートの圧縮ならびに引張り挙動（繰返し載荷条件）

コンクリート内部でひび割れ損傷が蓄積するものである。換言すれば、評価対象となる既存施設の損傷度を定量化するには、発生したひび割れ損傷を非破壊的に検出するか、載荷条件でのひび割れ進展挙動を同定するかのいずれかが有効であると考えられる。

2.3.2 X線CT法によるコンクリート損傷の可視化・定量化

コンクリート損傷の同定は内在する空隙分布と密接に関連する。一般的にコンクリート中の空隙は、ゲル空隙（1～3 nm）、毛管空隙（3 nm～30 μm ）、エントレンドエア（30 μm ～1 mm）およびエントラップドエア（1～10 mm）で構成されている³⁸⁾。ひび割れ損傷が発達した場合、これらと同等かそれ以上の規模（幅、長さ）での空隙が確認できると考えられる。（社）日本コンクリート工学会指針で提示されている耐久性や防水性から見た補修を必要とするひび割れ幅の限度値（最大値）は0.2～0.8 mm以上であり³⁹⁾、コンクリート部材に対して顕著に影響するのはひび割れ損傷が0.2 mm(=200 μm) 以上の場合と推察される。

ひび割れを含む損傷検出には、顕微鏡観察（分解能：>1 μm ）に代表される可視化技術や水銀圧入法（分解能：3 nm～30 μm ）、ガス吸着法（分解能：1～40 nm）による空隙分布量の評価が併用されている⁴⁰⁾。近年では、X線CT法に代表される可視化とともに定量化を可能にする技術開発も進んでおり、コンクリート工学分野においても調査研究が行われている（例えば、大塚ら⁴¹⁾）。

X線CT装置の分解能は、X線源と検出器の性能および試験範囲（Focus Dimension; FD）に依存する。分解能0.1 μm 程度のものから市販されているが、コンクリート・コア（ ϕ 100 mm×200 mm）全体を試験・評価するためには既往文献より分解能50 μm ～200 μm 程度が限度となる。

先行研究を概観すると、日本国内におけるコンクリート工学分野へのX線CT法を適用した先駆的研究として、コンクリート物性と微細ひび割れとの関連について1990年代から2000年初頭に検討された大塚らの業績^{41)～44)}を上げることができる。大塚らは、コンクリート内部のひび割れ損傷を造影剤を用いたX線撮影により可視化（分解能：未記載または100 μm ，FD：100 mm×100 mm）し、ひび割れの分布特性と物性との関連から損傷蓄積と物性低下との明確な関連性を破壊進行領域⁴¹⁾や凍結融解抵抗性⁴²⁾、強度^{43), 44)}の観点から明らかにした。2000年以降、X線装置の機能向上が進むにつれて、より詳細なコンクリート内部構造の可視化と材質評価が試みられている。コンクリート損傷の進展に伴う空隙の発達に関する検討では、池田ら⁴⁵⁾が鉄筋周囲に形成される空隙を研究対象（分解能：160 μm ，FD：81.92 mm×81.92 mm×80 mm）にしているのに対して、橋本ら⁴⁶⁾は凍結融解作用を受けたモルタルの微細領域を研究対象（分解能：10 μm ，FD：5 mm×5 mm×30 mm）としている。両研究から、損傷蓄積に伴う空

隙の発達に X 線 CT 画像により可視化可能であり、それらの画像データを用いることで空隙の発達と物質移動抵抗性の低下との関係が明らかされている。筆者ら⁴⁷⁾は、橋本らと同様に凍結融解作用を対象としているが、実構造物より採取したコンクリート・コアに発達した粗大損傷の可視化と空間分布特性評価により、空間統計パラメータを用いたひび割れ分布特性の定量評価の有効性を確認している（分解能：200 μm ，FD： $\phi 75 \text{ mm} \times 170 \sim 200 \text{ mm}$ ）。天野ら^{48)~50)}や麓⁵¹⁾は、既往研究とは異なり、高強度の X 線照射性能を有する新たな装置を開発し、コンクリート中の材料構成⁴⁸⁾（分解能：140 μm ，FD： $\phi 125 \text{ mm} \times 250 \text{ mm}$ ）や載荷過程の破壊挙動を踏まえた強度特性^{49)~51)}（分解能：50 μm ）について、X 線 CT 画像を用いて可視化・定量化している。これらの実験的検討では、粗骨材とモルタル界面での微細ひび割れの発生・集積が強度特性へ及ぼす影響が明らかにされており、載荷過程における材料内部の破壊過程を詳細に検出することより、精緻な物性評価が可能になることが指摘されている。

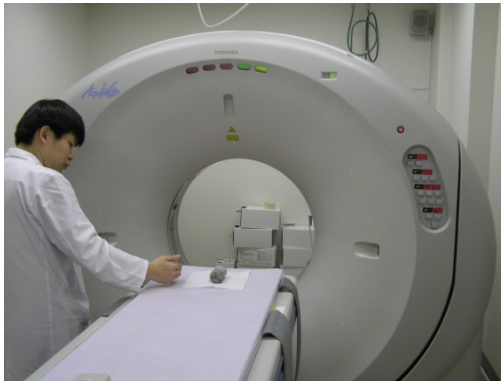
X 線 CT 法の試験技術としての特徴は、試験対象に X 線を照射し、トモグラフィ処理により物体の内部構造を可視化・定量化することにある。照射された X 線は、試験対象の物性に応じて吸収され減衰する。物体を通過した X 線は、照射位置から対面側に存在する X 線検出装置に記録される。CT データは、どの方位からどの程度の X 線が吸収されたかを表す吸収率によって評価される。吸収率の単位は、一般的に水を 0、空気を -1,000 とした HU（Hounsfield Unit）として定義されている。これによる透過率を CT 値と呼び、下式により評価される。

$$CT = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (2.17)$$

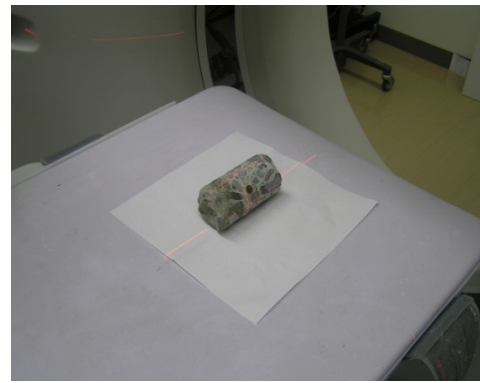
ここで、 μ_t ：試験対象の X 線吸収係数、 μ_w ：水の X 線吸収係数である。 K は任意に設定できる係数である（一般的には $K=1,000$ ）。水の CT 値は 0 となり、空気の CT 値は -1,000 となる。CT 値は物質の密度に比例するパラメータである。試験状況の一例を図 2.3.2 に示す。

X 線 CT 法により可視化したコンクリート損傷の定量化には、前述の通り、損傷力学が有効である。一般的に材料中に分布する多数の微視的空隙は、様々な劣化・損傷要因により進展する（図 2.3.3；図中の白色部がひび割れおよび空隙）。その結果、材料強度や部材剛性、靱性が低下し、最終的に破壊が引き起こされる。損傷力学とは、このような多数の微視的空隙の成長による力学的影響を評価するものである。部材断面をモデル化し、損傷（ D ）に関する上記概念を定式化すると下式となる。

$$D = \frac{A_D}{A_0} \quad (2.18)$$



(a) X 線 CT 装置

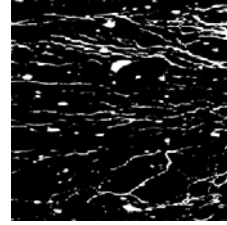


(b) 試験中のコンクリート・コア

図 2.3.2 採取したコンクリート・コアの X 線 CT 撮影状況



(a) 無損傷材料の断面



(b) 損傷材料の断面

図 2.3.3 材料損傷の X 線 CT 画像例（二値化処理後）

ここで、 A_0 ：材料の全断面積， A_D ：損傷を受け抵抗力を失った面積である．

先行研究よりコンクリート損傷の可視化・定量化には，X 線 CT 法が有効であることから，本研究ではひび割れ損傷を含めたコンクリートの材料構成が力学特性へ及ぼす影響を X 線 CT 試験から得られる空隙やひび割れ損傷の空間分布特性と圧縮破壊過程で発生する AE との関連を考察する．そのことにより，ひび割れ損傷の局所的発達がコンクリートの力学特性と AE 発生挙動へ及ぼす影響を明らかにし，本研究において提案する損傷度評価法の推定精度の向上を試みる．

2.3.3 コンクリートの圧縮破壊と AE の関係

コンクリート工学分野での AE 法の適用は 1960 年代に遡ることができる。Ruesch⁵²⁾ は、圧縮応力下でのコンクリートの AE 発生挙動を実験的に検討し、体積変化と入力超音波の減衰特性とが密接に関連していることを明らかにした。その際、破壊荷重の 75% までの範囲でカイザー効果を同定した。同様の検討を L'Hermite⁵³⁾ も行い、圧縮破壊の進行とポアソン比の上昇、AE の頻発を確認した（図 2.3.4）。Robinson⁵⁴⁾ は、これらの既往研究を踏まえてコンクリートへの X 線照射による破壊挙動の可視化と物性低下との関連を検討し、圧縮応力下での AE 発生挙動とコンクリート破壊との関連性を明らかにした。1970 年代以降、コンクリートの破壊過程は、検出された AE のパラメータから評価されることが多くなった。その対象は、モデル試験による人工損傷⁵⁵⁾ やリサイクル骨材⁵⁶⁾ を用いたものなどである。近年の研究事例では、Kencanawati⁵⁶⁾ がリサイクル骨材（RCA: Recycled Coarse Aggregate）を用いたコンクリートの材質評価を圧縮応力下の AE 発生挙動から検討している。AE 発生頻度の定量評価にはワイブル解析を用い、骨材材質とコンクリート圧縮破壊挙動との関連を AE 解析の観点から明らかにした。いずれの研究開発においても材質の異なる実験条件において、圧縮応力下で進行するコンクリート破壊と材料物性との関連を主に AE 発生頻度の観点から評価している。しかし、材料内部の損傷状況と破壊挙動との比較や損傷特性の定量化に関する検討は途上であり、前述の X 線 CT 法の開発・普及が進むにつれて X 線 CT と AE を用いた実証的検討も試みられている。Elaqra⁵⁷⁾ は S/C 比の異なるコンクリート・コア

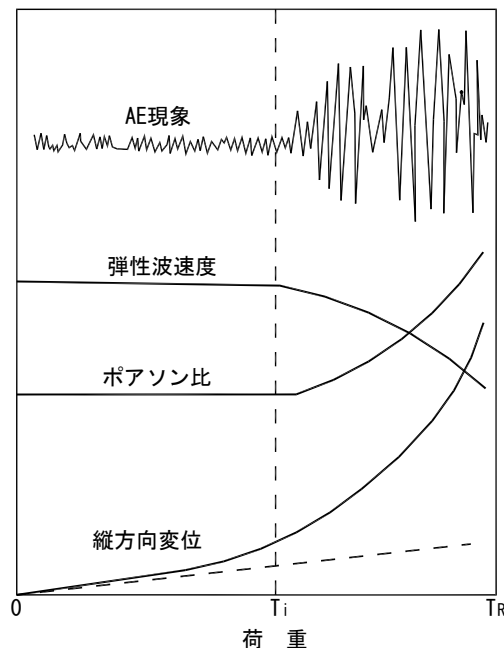


図 2.3.4 圧縮破壊過程のコンクリート非弾性挙動⁵³⁾

を作成し、圧縮応力下の AE と X 線 CT 画像との比較検討から、コンクリート破壊過程へ及ぼす S/C 比の影響を明らかにした。筆者⁵⁸⁾は、ひび割れ損傷の発達したコンクリートを対象に X 線 CT 画像と弾性波トモグラフィ法により求めた速度場との関係を比較検討し、局所損傷の発達が速度場の低下に影響を及ぼしていることを明らかにした。山岸ら⁵⁹⁾は、既往研究⁵⁸⁾の実験結果を踏まえて、圧縮応力下での AE と材料物性との関連性と低応力下での微弱な AE の検出がひび割れ損傷の指標となることを明らかにした。より詳細な検討には、X 線 CT 画像の特性値と AE との関連を考察する必要があることを明らかにした。

筆者らは、一連の研究開発において、載荷過程の AE 発生挙動を固体の破壊や損傷過程が一種の速度過程と考え、時間軸ないし処理過程における対象現象の発生頻度を破壊の確率過程論⁶⁰⁾（レート・プロセス論）によって評価している。定式化方法は検討対象により種々提案されているが、本研究では圧縮載荷過程の AE 発生頻度と AE エネルギーについて着目する。なお、その際の応力 - ひずみ挙動は、供試体への載荷方法（単調載荷、繰返し載荷）により異なるが、本研究では単調載荷を前提に損傷度評価論理を構築していることから、次節以降、議論は単調載荷に限定して進めるものとする。

2.4 材料中の AE 発生とその特徴

2.4.1 AE 法により検出される弾性波とその波動特性

AE とは材料中で解放されたエネルギーの一部が波動現象として固体中を伝播するものであり、AE 波はその発生源となった AE イベントの情報を含むものである。本研究では、圧縮載荷過程における破壊に伴うエネルギー解放がコンクリート中に発達する損傷と密接に関連し、検出された AE の特徴量によりコンクリート損傷度を評価するものである。本研究で用いる AE パラメータである発生頻度やエネルギーは、一連のエネルギー解放過程で発生する AE の特徴量を定量化したものであることから、いずれも放出された弾性波のエネルギー指標であると考えられる。AE 発生頻度が検出波数を指標としているのに対して、AE エネルギーは発生数に加えて、その規模を含めた指標である⁶¹⁾。

AE は材料中を伝播する波動であるが、媒体が移動するのではなく、媒体の変化が伝わる現象である。AE 計測の対象は弾性波であり、実体波と表面波が混在して検出される特徴を有する。媒体内を伝播する実体波には、縦波と横波がある。これらは伝播速度の相違から、到達が縦波、横波の順になる。縦波のことを Primary の頭文字により P 波、横波を Secondary より S 波と呼んでいる。縦波は、体積変化の可能な媒体を伝播する波動で、その伝播方向に粗密を繰り返しながら伝播する。横波は伝播方向に直行する面内で生じるせん断ひずみを伝える波である。ひずみの発生方向により SH 波と SV

波に分類される（図 2.4.1）．弾性体が境界面を持つ場合には，その境界面に表面波が発生する．P 波と SV 波により生成される表面波はレイリー波（Rayleigh wave）であり，SH 波により生成される表面波がラブ波（Lamb wave）である．

弾性波の伝播挙動の観点から AE 法を概観すると，検出される弾性波の時間 - 空間分布は，P 波と S 波の発生機構に依存するものである．波動伝播に関係した AE 法の特徴は，試験を物体の表面で行うことにある．物体表面では，力学的観点から面に対する法線方向の応力成分が常に 0 となる．このことから，自由表面に到達した弾性波が反射され，この結果として物体表面での AE 計測では，P 波と S 波に加えて，その反射により発生した反射 P 波と反射 S 波が混在して検出されることになる（図 2.4.2）．実際の試験では，実体波である P 波と S 波に加えて，レイリー波やラブ波に代表される表面波が検出される．表面波は，自由表面が存在することにより発生する弾性波であり，その振幅は自由表面で最大となり，表面からの距離が増加するにつれて指数的に減少する．実体波や表面波の伝播過程は，伝播する媒体の不均一性や多層構造などに影響され複雑な様相を呈するが，検出波長と比較して小さな不均一性の影響は無視できる．

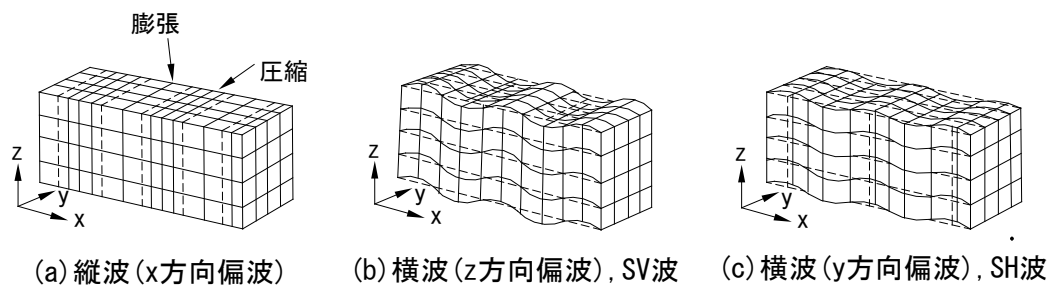


図 2.4.1 P 波と S 波の伝播挙動

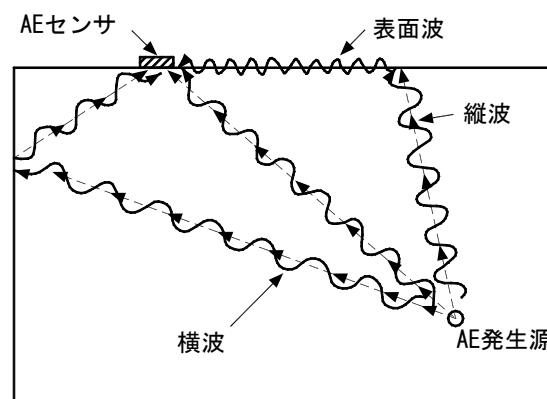


図 2.4.2 AE 波の伝播挙動

したがって、AE 法とは弾性波を検出する観点ではいずれの試験においても同一であるが、試験対象により波動成分（実体波、表面波）の構成は異なり、いずれの伝播モードにおいても固体表面の特定点における振動を検出している点に技術的特徴を有する。

本研究では供試するコンクリートをコア供試体に限定し、コア供試体（標準：φ 100 mm×H 200 mm）での AE 計測を前提とした損傷度評価法を構築する。

2.4.2 AE 発生機構と検出システム

(1) AE 法で検出される弾性波の特徴とその発生機構

AE 法により検出される弾性波は、各種波動成分が混在したものであるが、ひび割れ形成により発生する弾性波と物体に外力が作用して発生する弾性波とはその成分が異なる。AE 波動を境界要素法（BEM）により定式化すると境界 S で囲まれた物体の点 χ における時刻 t での変位 $u_i(\chi, t)$ は、式（2.19）で表すことができる⁶²⁾。

$$u_i(\chi, t) = \int_S [G_{ik}(\chi, t; \chi', t') * t_k(\chi', t') - T_{ik}(\chi, t; \chi', t') * u_k(\chi', t')] ds \quad (2.19)$$

ここで、 $t_k(\chi', t')$ ：面 S 上の応力ベクトル、 $u_k(\chi', t')$ ：面 S 上の変位ベクトル、 $G_{ik}(\chi, t; \chi', t')$ ：BEM 基本解（グリーン関数）、 $T_{ik}(\chi, t; \chi', t')$ ：グリーン関数の変位による応力ベクトル（第二種グリーン関数）である。

この式（2.19）に基づく波形解析理論は Generalized Theory of Acoustic Emission と名付けられており、検出された AE が変形ないし破壊の発生機構の特性を有していることを理論的観点から明らかにしている。

しかし、AE 計測で検出される弾性波には、各種要因により発生した波動の反射や透過による変質がある。加えて、既に述べた通り、発生した実体波の他に表面波が試験結果には含まれている。この特徴から、小規模の試験サンプルへの AE 法の適用では、高精度の破壊源探査による破壊機構の解析検討は困難であり、AE パラメータを用いた破壊過程の評価・分析の有効性が認められている⁶³⁾。

本研究では、既に存在するひび割れの挙動（擦れ、進展など）から発生する AE（二次 AE）と载荷過程で発生する新たなひび割れ起源の AE（一次 AE）を評価対象とした⁶⁴⁾。载荷過程で発生する AE は、二次 AE と比較して一次 AE が相対的に検出されるエネルギー値が大きくなる傾向にある。本研究では AE パラメータの中でも AE エネルギー指標に着目した検討を進めることにより、損傷実態を反映した AE の質的評価を試みる。

(2) AE 計測システム

AE パラメータによる検出波の定量評価を検討する際には、AE 計測における弾性波の電気信号への変換過程を明確にする必要がある。AE は、AE センサにより電気信号に変換された後に増幅器、フィルタを経て検出される（図 2.4.3）⁶⁵⁾。AE センサとして一般的に用いられている圧電素子は、 10^{-9} mm 程度の波形振幅を 10^{-6} V 程度の電圧に変換する⁶⁶⁾。AE センサには、広帯域型センサと共振型センサの 2 種類がある。広帯域型センサは、広い周波数帯を試験対象として取り扱える利点はあるが、全体として検出精度が共振型と比較して低い。各周波数帯での応答特性は一定ではなく、共振型センサと同様に複雑な応答特性を有している。それに対して共振型センサは、検出精度を確保する周波数帯域を限定することにより精度向上を実現している。計測原理から、AE 計測では弾性波自体を検出しているのではなく、センサの周波数特性によるフィルタをかけられた結果として検出されたものである。本研究の AE 計測では、全てのサンプルに関する試験条件を同一とし、試験条件の相違による試験結果への影響を除去した。

検出された AE は、プリアンプとメインアンプにより増幅される。増幅率は、式(2.20)により算出される。

$$dB = 20\log_{10}(\text{出力電力}/\text{入力電力}) \quad (2.20)$$

コンクリート材料では、プリアンプとメインアンプを合計して 60～100 dB 程度増幅することが多く、本研究では 60 dB の増幅を行なった。

一連の AE 計測における環境ノイズの除去には、ハイパスフィルタとローパスフィルタを用いることが多い。数 kHz 以下の振動雑音や環境ノイズは、ハイパスフィルタにより除去することができる。高周波成分を含むノイズは、ローパスフィルタを用いることにより除去することが可能である。より高度なノイズ除去や破壊現象起源の突発型 AE を検出する場合には、赤池情報量規準 (AIC)^{67)~69)}などの数値解析手法が用いられる。

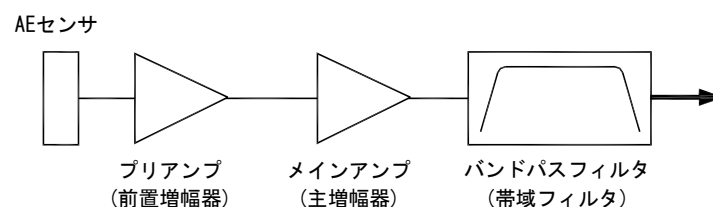


図 2.4.3 AE 計測システム⁶⁵⁾

2.4.3 AE パラメータを用いた定量的波形解析

AE 信号の処理方法には、ディスクリミネータを用いたアナログ処理に基づく AE パラメータ解析と高速波形記録装置を用いたデジタル処理に基づく AE 発生源位置標定、モーメント・テンソル解析が開発されている。2.4.3 では、AE パラメータの観点から AE 法による定量的波形解析方法について概説する。

(1) AE パラメータ解析

検出した AE の波動特性は、AE パラメータにより評価される。表 2.4.1 に AE パラメータの種類と特徴を示す。AE 発生頻度（表 2.4.1 (8)）は、一連の試験過程において発生した AE の量的指標となる。検出した AE の波動形状の特性は、信号継続時間や AE カウント、立ち上がり時間、平均周波数等で評価できる。検出波のエネルギー特性は、最大振幅値や AE エネルギー、RMS 電圧により評価できる（表 2.4.1 (1), (6), (7)）。

本研究の損傷度評価に用いる AE エネルギーは、最大振幅値の二乗を評価値とした。AE エネルギーには、定義により様々な式が提案されているが⁶³⁾、検出波特性を最も評価できる最大振幅値を用いた。2.4.3 (2) において AE エネルギー評価に関する詳細を示す。

(2) 検出波のエネルギー評価

弾性波などの物理信号を対象としたエネルギーは、式 (2.21) に示す時系列信号値 $a(t)$ の二乗の積分値として評価される。

$$E_{AE} = \int_{-\infty}^{\infty} a^2(t) dt \quad (2.21)$$

検出した AE のエネルギー値は、AE パラメータの最大振幅値同様、破壊現象の規模と関連のある評価指標として用いられている。しかし、AE センサにより電気信号へと変換された弾性波の時刻歴波形の後半部はセンサ自身の共振波形であり、検出した現象とは無関係である。このことから、本研究では最大振幅値に着目し、その二乗値による検出波のエネルギー評価を試みた。式 (2.22) に評価式を示す。

$$E_{AE} = a_{\max}^2 \quad (2.22)$$

ここで、 E_{AE} ：検出波の AE エネルギー（単位：V²）、 a_{\max} ：AE パラメータの最大振幅値（単位：V）である。

表 2.4.1 AE パラメータの種類と特徴 (ISO 12716: 2001)

名称	特徴
(1) 最大振幅値	AE 信号の最も高い信号電圧値 (a_{max} , 図 2.4.4) AE 信号振幅 (dB_{AE}) $= 20 \log (A_1/A_0)$ ($A_0: 1 \mu \text{V}$, A_1 : AE センサの出力)
(2) 信号継続時間	AE 信号の開始から終了までの時間であり, 伝播媒体の評価に用いる
(3) AE カウント	AE 信号の計測電圧値がしきい値を超えた回数
(4) 立ち上がり時間	AE 信号の開始から最大振幅値に至るまでの時間
(5) 平均周波数	AE カウントを信号継続時間で除した指標であり, FFT により求める 周波数特性とは異なる
(6) AE エネルギー	「時系列信号値 $a(t)$ の 2 乗積分値」又は「最大振幅値 a_{max} の 2 乗値」
(7) RMS 電圧	AE 信号の実効値電圧 (Root Mean Square value)
(8) AE 発生頻度 (AE ヒット)	単位時間ないし単位物理量あたりの AE 発生数

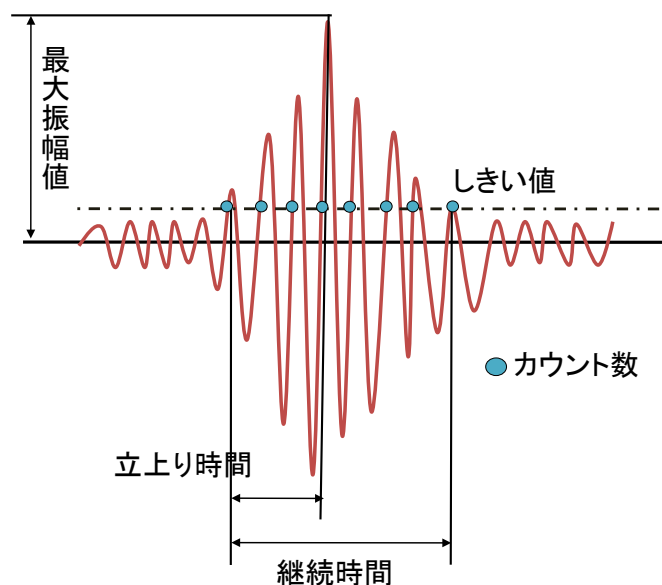


図 2.4.4 AE 波形とパラメータ

(3) 載荷時の AE パラメータを利用した材質評価・診断

AE パラメータを用いた代表的な損傷度評価規格には NDIS 2421 (2000) ⁷⁰⁾があり、本規格を事例に、載荷時に発生する AE を用いた材質評価法の特徴を概説する。

日本非破壊検査協会規格 NDIS 2421 (2000) では、載荷および除荷過程の AE 発生数の差から材料損傷を評価する新たな AE パラメータが提案されている。現状において、本規格の標準化が RILEM 特別委員会 (TC-212ACD) において現在進められている ⁷¹⁾。農業水利施設への適用は、筆者らの既往研究により土中埋設下のパイプライン施設の損傷度評価を対象に実験的検討が試みられている ^{72)~74)}。その結果、平板載荷による既設パイプライン施設への載荷および除荷に基づく AE の特徴量から損傷実態が検出され、一連の載荷過程に発生する AE を指標に損傷度評価が可能であることが明らかにされている。

載荷過程の AE を指標とした損傷度評価は、外的に加える荷重によって発生する応力場において破壊や内在するひび割れの擦れ等から発生する AE を検出し、その特徴量から損傷実態を評価するものである。NDIS 2421 (2000) に代表される技術規格や関連研究 ⁷⁵⁾において AE パラメータが多用される背景には、実構造物や試験サンプルでの調査研究において、計測した AE に多くの反射波や環境ノイズが含まれるため、詳細な破壊源探査が困難なためである。AE パラメータ解析は、破壊源探査により評価される破壊運動（せん断破壊、引張り破壊）は評価困難であるが、検出波のパラメータにより発生位置やその規模、特性を評価できる。特に AE 発生頻度は、他の既往研究と比較検討が容易であるのに加えて、AE 発生自体がエネルギー放出を起源としていることから、試験の評価指標として多用されている。

本論の研究対象である圧縮載荷過程において発生する AE と材料損傷に関する考察では、AE パラメータの中でも発生頻度に加えて、検出波の規模を示す指標であるエネルギーに着目した検討が有効である。検出波のエネルギーレベルは載荷過程により異なり、無損傷材料の場合、載荷初期と比較して終局時の AE においてエネルギー値の高い波動が検出され、破壊規模やそのメカニズムに影響を受けていることが指摘されている ^{76), 77)}。

以上のことから、載荷過程で発生する AE を用いた損傷度評価では、AE 発生頻度に加えて AE エネルギーにより、検出波規模や一連の載荷過程での主破壊点を同定することで、これまで十分に明らかにされていない材料損傷を詳細に評価できるものと推察される。

(4) AE 発生源位置標定とモーメント・テンソル解析

AE パラメータ解析の評価精度の向上には、AE の発生源位置標定が有効である。本研究では、圧縮載荷過程におけるひずみ分布と AE 発生源との関連をひび割れ損傷の進行した凍害コンクリートにおいて実験的に検討している（第 3 章 3.3）。多チャンネル計測での AE 波の到達時間差を用いることで、発生源から AE センサへの距離に応じた P 波の到達時間差が得られ、これにより発生源の空間的な位置を決定することができる^{78),79)}。加えて、発生源から放射される AE 波の振幅パターン⁸⁰⁾、逆問題⁸¹⁾へと進み、AE 波形から発生源の幾何学的情報（モーメント・テンソル）を求めれば、AE 源の位置のみではなく運動の種類、方向を決定することができる^{82)~84)}。前述の通り、AE 計測条件により検出波を用いた発生源の運動解析は困難であるが、農業水利施設への AE 源位置標定やモーメント・テンソル解析（SiGMA 解析^{67),84)}）の適用は、パイプラインに発生する漏水現象を対象に漏水波（噴流現象）の波動特性の抽出が試みられている^{5),85)}。本事例は、高内水圧条件での農業用パイプラインにおける非破壊安全性診断法の構築に関する研究開発の一環として行われたものであり、安全性診断における AE 計測とその運動解析の有効性が明らかにされている^{86)~88)}。

本研究では、AE 計測対象である圧縮破壊過程が各種破壊運動を内在化していることから、モーメント・テンソル解析に基づく運動解析ではなく、検出した AE のエネルギー特性から損傷実態を評価する。

2.5 農業水利施設に発生する AE の特徴と工学的利用

2.5.1 AE パラメータの施設機能診断への応用

農業水利施設の性能低下の特徴は、構造損傷の進行が外部環境に加えて、水理現象や水利用により影響を受けることにある。そこで、農業水利施設より発生する弾性波の特徴と AE 法によるそれらの検出に関する技術的課題を概説する。

エネルギー解放過程で発生する弾性波は、検出波の立ち上がりが明確な突発型波形と正弦波など立ち上がりが不明瞭な連続型波形に分類できる(図 2.5.1)⁶⁴⁾。AE 法では、検出波を突発型 AE と連続型 AE に分類できる。構造破壊や変形などでは突発型 AE が検出され、その運動学的な解析により発生源の同定や規模の評価が行われる。AE 法ではモーメント・テンソル解析として破壊源評価が試みられ、破壊モードの検討が行われている(例えば Grosse⁸⁹⁾)。評価方法に関する詳細は、地震波動の検出と震源特定に関する検討と同一である。連続型 AE の場合、発生源の同定には、相互相関関数を用いた検出波の類似性評価が不可欠であり、農業水利施設の場合、パイプラインの漏水評価などに用いられている^{90)~92)}。突発型 AE の検出は、既存施設の構造破壊や損傷進行を検出するための重要な評価指標であり、AE 法による一般的な計測では突発型 AE の発生特性と破壊や損傷現象との関連が議論されている。

AE 法を用いて農業水利施設の性能評価を試みる場合、試験対象とその規模を明確にする必要がある。その技術的背景には、農業水利施設の試験環境の特徴として、AE 発生源が構造破壊に加えて、水理現象が対象となるためである。構造破壊や混相流、水撃圧などエネルギー放出が明確な現象では、突発型 AE が検出されるが、満流状態や環境ノイズは一般的に連続型 AE が卓越し、同一試験条件下で波形特性の異なる弾性波が多数検出される。

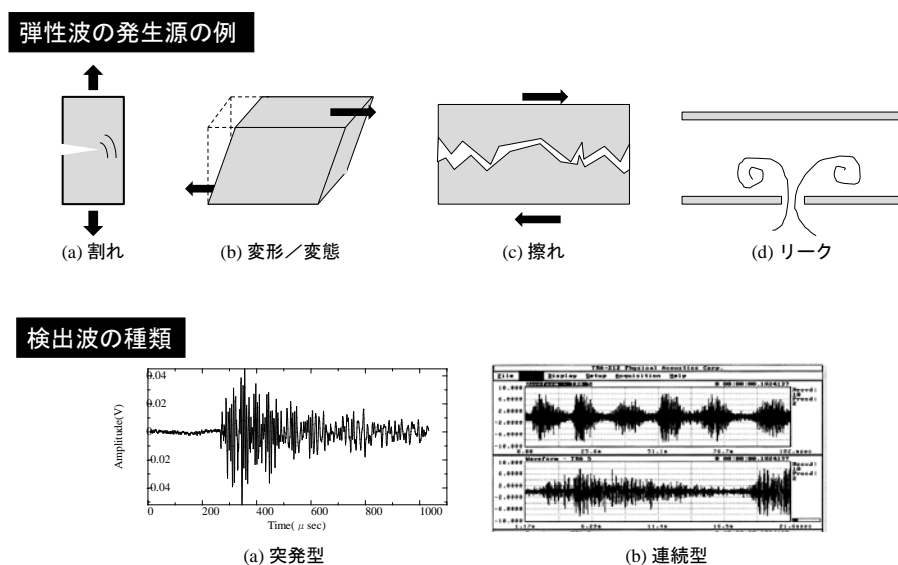


図 2.5.1 AE の発生機構と検出波特性⁶⁴⁾

本研究では、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にコア供試体を用いた AE 法による損傷度評価法を構築する。このことから、環境ノイズや水理現象起源の連続型 AE は対象ではなく、コンクリートの破壊過程で発生する突発型 AE のみが研究対象となる。その特性は AE パラメータにより抽出される。同様の試みは、橋梁工^{93)~95)}などにおいて検討されており、モニタリング技術としての AE 法の有用性と高度化への可能性が明らかにされている。既往研究では、供用中の既設橋梁に積載量の異なるダンプトラックを通行させ、積載量の増加に伴い AE 発生頻度の急増点を試験より求めている。高 AE 発生頻度の部位は、損傷の進行した部位と推察され、維持管理の重点部位と判断されている。より詳細な材質評価には、AE 計測を載荷試験に導入した損傷度評価が試みられ、構造物計測との関連性が検討されている。このことから、S/N 比の向上を含めた計測環境の改善に基づく AE 法による実構造物での損傷部位の同定に加えて、コンクリート供試体の載荷試験に基づく詳細な材質評価（損傷度評価）が実構造物の耐久性の検討において効果的であると推察される。農業水利施設の場合、上記と同様の試験方法はパイプライン施設において適用可能であり、自動車の走行荷重に変えて通水に基づく水压を考慮した検討が有効であると考えられる。

2.4.3 (3) において論じた既設パイプライン施設への平板載荷過程の AE を指標とした材質評価は、走行荷重や水压等を利用した既存施設の非破壊・非掘削による損傷度評価法の構築のための基礎的検討である^{72)~74)}。

これらのことから、農業水利施設に限らず各種弾性波を発生させている社会基盤施設における AE 計測では、AE パラメータにより評価対象の特性検出が可能であり、損傷部位の特定とその定量化に基づく性能評価において AE 法の有用性は高いものと推察される。

2.5.2 農業水利施設の力学的要求性能

AE 計測により求めた各種構造物や構造材料の損傷実態は、補修工や補強工，更新等に反映されることにより研究開発成果が有効に利用されることになる。本研究では、一連の開発過程において創出した損傷度評価指標をコンクリートの力学特性である圧縮強度と比較することにより力学特性との関連を明確にする。この判断の背景には、農業水利施設の構造設計における要求性能が基準強度である圧縮強度により規定されているためである。

農業水利施設の構造設計は、土地改良調査計画設計基準に準じて行われており、各種構造物の使用環境や要求性能により細かく力学特性が規定されている。水路工設計基準は、昭和 29 年 12 月に土地改良事業設計基準・第 3 部設計第 5 編水路工（その 1）により制定され、今日まで設計手法の高度化や新技術の導入が進められている⁹⁶⁾。設計基準強度は、構造物基礎ないし無筋コンクリートで 18 N/mm^2 であり、耐久性を必要

とする鉄筋コンクリートで 24 N/mm^2 ，一般の鉄筋コンクリートで 21 N/mm^2 である．鉄筋コンクリートに関する設計基準強度は設計基準が制定されて以降，一貫して $21 \sim 24 \text{ N/mm}^2$ が規定されていることから，農業水利施設の力学特性の基準値は 24 N/mm^2 以上が当初設計・施工時の要求性能を満たす構造物であると考えられる．

本研究では，第 4 章で議論するコンクリート損傷度評価法の構築において「耐久性を必要とする鉄筋コンクリートで 24 N/mm^2 」を標準コンクリートの基準値として検討を進める．

参考文献

- 1) (社) 日本音響材料協会編, 振動・騒音対策ハンドブック, 技報堂出版, 1982.
- 2) (社) 日本非破壊検査協会編: アコースティック・エミッション試験Ⅰ, 2006.
- 3) (社) 日本非破壊検査協会編: アコースティック・エミッション試験Ⅱ, 2008.
- 4) 佐藤泰夫: 弾性波動論, 岩波書店, 1978.
- 5) 鈴木哲也: アコースティック・エミッション法に基づくライフライン構造物の漏洩・損傷度評価法の確立に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程学位論文, 2006.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 岡田清, 六車熙監修: コンクリート工学ハンドブック, 朝倉書店, pp. 335-555, 1981.
- 9) 平松良雄, 岡田清, 岡行俊, 小柳洽, 水田義明: 剛性試験機の設計・製作とコンクリートの剛性試験について, 材料, 24(260), pp. 91-98, 1975.
- 10) 谷川恭雄, 西川公三, 小阪義夫: 高剛性変位速度制御圧縮試験機の試作・開発並びにコンクリートの塑性変形挙動に関する複合材料論的考察, 日本建築学会論文集, No.260, pp.9-18, 1977.
- 11) (社) 日本コンクリート工学協会: 破壊力学の応用研究委員会報告書, pp. 11-327, 1993.
- 12) Bazant, Z.P.: Instability, Ductility, and Size Effect in Strain-Softening Concrete, Proc. of ASCE, 102(EM2), pp. 331-344, 1976.
- 13) (社) 土木学会コンクリート委員会, 2.4 設計限界値の算定, 2012年制定コンクリート標準示方書 [設計編: 標準], pp. 172-173, 2012.
- 14) Kochanov, L. M.: 1.1 Some Type of Damage, Introduction to Continuum Damage Mechanics, Martinus Nijhoff Publishers, pp. 1-10, 1986.
- 15) 榎学: 2.5 応力 - ひずみ関係 (2) ひずみエネルギー関数, マテリアルの力学的信頼性 - 安全設計のための弾性力学 -, 内田老鶴圃, pp.35-44, 2006.
- 16) Ouyang, C.: 11.2 Phenomenological Modes based on Scholard Damage Variable, Fracture Mechanics of Concrete, WILEY INTER. SCIENCE, pp. 454-456, 1995.
- 17) Loland, K.E.: Continuous Damage Model for Load-Response Estimation of Concrete, Cement and Concrete Research, 10, pp. 385-402, 1980.
- 18) Chen, Y. L., Ni, J., Jiang, L., Liu, M., Wang, P. and Azzam, R.: Experimental Study on Mechanical Properties of Granite After Freeze-Thaw Cycling, Environmental Earth Sciences, 71(8), pp. 3349-3354, 2014.

- 19) Chen, X., Wu, S. and Zhou, J.: Analysis of Mechanical Properties of Concrete Cores using Statistical Approach, *Concrete Research*, 65(24), pp. 1463-1471, 2013.
- 20) Chen, X., Wu, S. and Zhou, J.: Experimental Study and Analytical Formulation of Mechanical Behavior of Concrete, *Construction and Building Materials*, 47, pp. 662-670, 2013.
- 21) He, R., Chen, S., Cong, P. and Ji, S.: Damage Evolution Model of Strain Hardening Cementitious Composites under the Uniaxial Stress State, *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials*, 20(2), pp.196-204, 2013.
- 22) Huaizhi Z. Su, Jianjie J. Tong, Jiang Hu and Zhiping P. Wen: Experimental Study on AE Behavior of Hydraulic Concrete under Compression, *Mechanica*, 48, pp. 427-439, 2013.
- 23) 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.
- 24) Zhou, C., Li, K. and Han, J.: Characterizing the Effect of Compressive Damage on Transport Properties of Cracked Concretes, *Materials and Structures*, 45(3), pp. 381-392, 2012.
- 25) Ohtsu, M.: Damage Evaluation in Freezing and Thawing Test of Concrete by Elastic-Wave Methods, *Materials and Structures*, 44(10), pp. 1725-1734, 2011.
- 26) Goncalves, J. P., Tavares, L. M., Toledo F. R. D. and Fairbairn, E. M. R.: Performance Evaluation of Cement Mortars Modified with Metakaolin or Ground Brick, *Construction and Building Materials*, 23(5), pp. 1971-1979, 2009.
- 27) Goncalves, J. P., Tavares, L. M., Toledo F. R. D., Fairbairn, E. M. R. and Cunha, E. R.: Comparison of Natural and Manufactured Fine Aggregates in Cement Mortars, *Cement and Concrete Research*, 37(6), pp. 924-932, 2007.
- 28) Ju, J., Monteiro, PJM and Rashed, AI: Continuum Damage of Cement Paste and Mortar as Affected by Porosity and Sand Construction, *Journal of Engineering Mechanics-ASCE*, 115(1), pp. 105-130, 1989.
- 29) Suaris, W, Shah, SP: Constitutive Model for Dynamic Loading of Concrete, *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 111(3), pp. 563-576, 1985.
- 30) Ouyang, C., Suaris, W. and Chang, WF: Effect of Sulfate Attack on Compression Properties of Cement-Based Mixtures Containing Photosphogysum, *ACI Materials Journal*, 85(2), pp. 82-89, 1988.
- 31) 鈴木哲也 : 5.2.1 応力 - ひずみ挙動評価, アコースティック・エミッション法に基づくライフライン構造物の漏洩・損傷度評価法の確立に関する研究, 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程学位論文, pp. 103-104, 2006.
- 32) 日本工業規格 : 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 (JIS A 1127 : 2010), 2010.
- 33) (社) 土木学会コンクリート委員会 : 第2部 弾性波動理論に基づいた既存の規格・基準の問題点の抽出と改善策の検討, コンクリート技術シリーズ No. 73・弾性波法の非

破壊検査研究小委員会報告書, pp. 31-37, 2007.

- 34) 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.
- 35) 鈴木哲也, 池田幸史, 米野現樹, 大津政康: コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究, 土木学会論文集, 809/V-70, pp. 95-106, 2006.
- 36) 佐藤泰夫: 3.3 等方弾性体の弾性定数, 弾性波動論, 岩波書店, pp. 29-31, 1978.
- 37) 村上澄男: 10.1.1 脆性材量の損傷, 連続体損傷力学, 森北出版株式会社, pp. 247-249, 2008.
- 38) Mehta, P. K.: Concrete: Structure, Properties and Materials, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1986.
- 39) (社)コンクリート工学会: 4.2 調査および原因推定結果に基づく判定, コンクリートのひびわれ調査, 補修・補強指針, p. 65, 2013.
- 40) 笠井芳夫編著: 10.コンクリートの組織構造と力学的性質, コンクリート総覧, 技術書院, pp. 369-374, 1998.
- 41) 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.
- 42) 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.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 池田隆徳, 濱田秀則, 佐川康貴, 多田昂平: 鉄筋周囲に形成される空隙の X 線 CT スキャナによる定量評価, コンクリート工学年次論文集, 33 (1), pp. 1085-1090, 2011.
- 46) 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.
- 47) 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.
- 48) 天明敏行, 伊藤剛, 濱崎大志, 尾原祐三: X 線 CT 法を用いたコンクリートの材料構成定量化法の提案, コンクリート工学年次論文集, 30 (2), pp. 739-744, 2008.
- 49) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治: X 線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, 32 (1), pp. 545-550, 2010.
- 50) 天明敏行, 尾原祐三, 吉永徹: X 線 CT 法による硬化コンクリートの強度に影響を及ぼす要因の分析, コンクリート工学年次論文集, 38 (2), pp. 1471-1476, 2016.
- 51) 麓隆行: 新しい機構の X 線 CT の開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用,

- 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 69 (2), pp. 182-191, 2013.
- 52) Rusch, H.: Physical Problems in the Testing of Concrete, Zement Kalk-Gips (Wiesbaden), 12 (1), pp.1-9, 1959.
 - 53) L'Hermite, R.G.: Volume Change of Concrete, Proc.4th Int. Symp. Chemistry of Cement, V-3, NBS Monograph 43, pp.659-694, 1960.
 - 54) Robinson, G.S.: Methods of Detecting the Formation and Propagation of Microcracks in Concrete, Proc. Int. Conf. on the Structure of Concrete and Its Behavior under Load Cement and Concrete Association, London, pp.131-145, 1965.
 - 55) Lacidogna, G., Carpinteri, A., Manuello, A., Durin, G., Schiavi, A., Niccolini, G. and Agosto, A.: Acoustic and Electromagnetic Emissions as Precursor Phenomena in Failure Processes, Strain, 47, pp. 144-152, 2011.
 - 56) Kencanawati, N. N., Iizasa, S. and Shigeishi, M.: Fracture Process and Reliability of Concrete made from High Grade Recycled Aggregate using Acoustic Emission Technique under Compression, Materials and Structures, 46 (9), pp. 1441-1448, 2013.
 - 57) Elaqla, H., Godin, N., Peix, G., Mili, M. R' and Fantozzi, G.: Damage Evolution Analysis in Mortar, during Compressive Loading using Acoustic Emission and X-ray Tomography: Effects of the sand/cement ratio, Cement and Concrete Research, 37 (5), pp. 703-713, 2007.
 - 58) 鈴木哲也 : X 線 CT 法に基づくひび割れの進展したコンクリートの特性評価に関する研究, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 4, pp. 283-288, 2012.
 - 59) 山岸俊太郎, 鈴木哲也, 緒方英彦, 周藤将司 : 凍害損傷の進行したコンクリートの圧縮破壊特性評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, 35 (1), pp. 385-390, 2013.
 - 60) 横堀武夫 : 材料強度学, 技報堂出版, pp. 6-14, 1966.
 - 61) (社) 日本非破壊検査協会編 : 2.2 固体材料中の AE 発生源と AE 波の特徴, アコースティック・エミッション試験 II, pp. 6-12, 2008.
 - 62) Ohtsu, M. and Ono, K.: A Generalized Theory of Acoustic Emission and Green's Function in a Half Space, Journal of Acoustic Emission, 13 (1), pp. 27-40, 1984.
 - 63) (社) 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.
 - 64) (社) 日本非破壊検査協会編 : 2.3 AE 発生源の種類と特徴, アコースティック・エミッション試験 I, pp. 7-8, 2006.
 - 65) (社) 日本非破壊検査協会 : NDIS2106-1997 アコースティック・エミッション試験装置の性能測定及び表示方法, 1997.
 - 66) (社) 日本非破壊検査協会 : NDIS2421-2000 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法, 2000.
 - 67) 大野健太郎, 下藺信一郎, 澤田陽佑, 大津政康 : AE 波初動部の自動読み取りの開発に

- よる SiGMA 解析の改良, 非破壊検査, 57 (11), pp. 531-536, 2008.
- 68) 鈴木哲也, 島本由麻, 山岸俊太郎, 稲葉一成: 赤池情報量規準を用いた環境ノイズ除去に基づく弾性波検出精度の改善, 農業農村工学会誌, 83 (10), pp. 35-38, 2015.
 - 69) 島本由麻, 鈴木哲也, 稲葉一成, 森井俊広: コンクリート水路橋に発達したひび割れ損傷の AE 波特性, 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. 337-342, 2015.
 - 70) (社) 日本非破壊検査協会: NDIS 2421-2000 コンクリート構造物のアコースティック・エミッション試験方法, 2000.
 - 71) M. Ohtsu, T. Shiotani, M. Shigeishi, T. Kamada, S. Yuyama, T. Watanabe, T. Suzuki, J. G. M. van Mier, T. Vogel, C. Grosse, R. Helmerich, M. C. Forde, A. Moczko, D. Breyse, S. A. Ivanovich, A. Sajna, D. Aggelis, G. Lacidogna: Recommendation of RILEM TC 212-ACD: Acoustic Emission and related NDE Techniques for Crack Detection and Damage Evaluation in Concrete, Measurement Method for Acoustic Emission Signals in Concrete, Materials and Structures, 43 (9), pp. 1177-1181, 2010.
 - 72) 伊藤久也, 鈴木哲也: 既設コンクリート管の平板載荷による損傷度評価, 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, 13, pp. 151-156, 2013.
 - 73) 鈴木哲也, 伊藤久也: 震災復旧に資する配管施設の非破壊損傷度診断技術の開発 - AE 法を用いた配管材の耐力診断 -, 第 49 回下水道研究発表講演集, pp. 331-333, 2012.
 - 74) 伊藤久也, 鈴木哲也: 農業用パイプラインの現地載荷試験による損傷度評価, 農業農村工学会誌, 82(1), pp. 23-26, 2014.
 - 75) Ohtsu, M.(Edit.), Suzuki, T., Lacidogna, G., Ohno, K., Kawasaki, Y., Mhamdi, L., Saliba, J., Vidya, R., Dumoulin, C., Oshita, H., Takeda, M., Ziehl, P., Proverbio, E. and Aggelis, D. G.: Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, Elsevier, United Kingdom, pp. 1-291, 2015.
 - 76) (社) 日本非破壊検査協会編: 5.4 計測データの評価と試験の記録, アコースティック・エミッション試験 I, pp. 55-61, 2006.
 - 77) (社) 日本非破壊検査協会編: 8.3.2 載荷時の AE 活動を利用した評価, アコースティック・エミッション試験 II, pp. 100-105, 2008.
 - 78) 丹羽義司, 小林昭一, 大津政康: アコースティック・エミッションによる破壊源探査, 土木学会論文報告集, 276, pp. 135-147, 1978.
 - 79) 川上泰司, 魚本健人: AE 法による 2 次元破壊進展位置標定を用いたコンクリート割裂試験の破壊挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 10 (2), pp. 385-390, 1988.
 - 80) 大津政康: アコースティック・エミッション波動の放射形式に関する考察, 材料, 32 (356), pp. 577-583, 1983.
 - 81) 大津政康: アコースティック・エミッションの波形解析理論とモーメントテンサー解

- に関する考察, 材料, 36 (408), pp.1025-1031, 1987.
- 82) Ohtsu, M.: Source Inversion of Acoustic Emission Waveform, 土木学会論文集, 398, pp. 71-79, 1988.
 - 83) Ohtsu, M., Shigeishi, M., Iwase, H. and Koyanagi, W.: Determination of Crack Location, Type and Orientation in Concrete Structure by Acoustic Emission, Magazine of Concrete Research, 43 (155), pp. 127-134, 1991.
 - 84) 大津政康, 重石光弘, 湯山茂徳, 岡本享久: AE モーメントテンソル解析のための SiGMA コードの開発, 非破壊検査, 42 (10), pp. 570-575, 1993.
 - 85) Ohno, K., Suzuki, T. and Ohtsu, M.: Moment Tensors of In-Plane AE Waves Analyzed by SiGMA-2D, Proceedings of Progress in Acoustic Emission X III, pp. 239-246, 2006.
 - 86) 鈴木哲也, 久保成隆, 飯田俊彰: 弾性波計測による損傷パイプラインの水密性評価に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 69 (2), pp. I 49- I 54, 2013.
 - 87) 鈴木哲也: 送水パイプラインの事故後復旧過程の非破壊安全性診断に関する研究, 土木学会論文集 F6 (安全問題), 70 (2), pp. I_143-I_148, 2014.
 - 88) 本田泰大, 山岸俊太郎, 鈴木哲也, 青木伸之: コンクリートパイプラインの充水・排水過程 AE モニタリング, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 5, pp. 53-58, 2015.
 - 89) Grosse, C. U., Weiler B. and Reinhardt, H. W.: Relative Moment Tensor Inversion applied to Concrete Fracture Tests, Journal of Acoustic Emission, 14 (3-4), pp. 64-87, 1997.
 - 90) Suzuki, T., Ikeda, Y., Tomoda, Y. and Ohtsu, M.: Practical Monitoring in Water-Leaked Pipeline by AE Parameter Analysis, The 3th US-Japan Symposium. On Advancing Applications and Capabilities in NDE, 2005.
 - 91) 鈴木哲也, 藤田茂, 伊藤久也: 配管施設の通水シグナルの検出による補修効果の定量的評価, 農業農村工学会誌, 75(10), pp. 907-910, 2007.
 - 92) 鈴木哲也: 農業用パイプラインにおける漏水波特性へ及ぼす内水圧の影響に関する実証的研究, 農業農村工学会論文集, 270, pp. 101-102, 2010.
 - 93) 九州橋梁・構造工学研究会・既設コンクリート道路橋の調査・診断法に関する研究分科会: 長年月供用されたコンクリート道路橋の非破壊診断・耐荷力評価法に関する調査研究, pp. 1-285, 2003.
 - 94) Fukuda, M., Shiotani, T., Nishida, T., Asaue, H., Watabe, K. and Kobayashi, Y.: Damage Evaluation for in - Field RC Bridge Deck by AE Tomography, Progress in Acoustic Emission XVIII, pp.481-486, 2016.
 - 95) 鈴木哲也, 本田泰大, 高橋航, 藤井伸之, 西脇健志, 小嶋篤志: AE パラメータを援用したコンクリート橋梁部材を対象とした非破壊損傷同定に関する実験的研究, 農業農村工学会農村道路研究部会報, 26, pp. 17-21, 2016.
 - 96) 農林水産省農村振興局監修: 第 7 章 構造設計, 土地改良事業計画設計基準 設計「水路工」技術書, pp. 289-320, 2001.

第3章 ひび割れ損傷の発達したコンクリートの物性特性

3.1 概説

農業水利施設の耐久性能は、構造材料の劣化・損傷機構と密接に関連している。コンクリートは農業水利施設の中で最も多用されている構造材料であり、本研究では、コンクリートを対象に AE 法を用いた損傷度評価法を第 4 章において構築する。本章では、その前提としてひび割れ損傷の進行がコンクリート物性へ及ぼす影響を明らかにし、損傷度評価法の構築に関する基礎的検討とする。

第 2 章 2.2 および 2.3 においてコンクリートの微視的構造と損傷特性について圧縮荷条件におけるコンクリート挙動の観点から考察した。本章では、第 2 章での議論を踏まえて、3.2 において実験室内で打設した無損傷状態のコンクリートの断面特性について X 線 CT 画像の特徴量を中心に考察する。3.3 では凍害損傷によりひび割れが発達したコンクリートのひび割れ損傷の空間的特性と圧縮荷過程の AE 発生挙動との関連について考察する。AE 発生挙動の定量化には、2.4 において詳説した AE パラメータを用いる。応力 - ひずみ挙動におけるひずみの局所化は、空間統計パラメータであるセミバリオグラム¹⁾を用いて評価する。第 2 章の理論的議論と 3.2～3.3 の実証的検討を踏まえて、3.4 において損傷コンクリートと無損傷コンクリートの AE 発生頻度と AE エネルギーに関する比較検討を試みる。3.5 は本章のまとめとして、蓄積されたひび割れ損傷がコンクリート物性へ及ぼす影響について実験結果を総括する。

3.2 無損傷コンクリートの特性評価

3.2.1 供試体

実験に用いたコンクリート・コアは、普通ポルトランドセメントを用いて、水セメント比 55%で打設し、28 日間水中養生を施したものである。粗骨材粒径、水セメント比およびセメント種類については、3.3 で検討した実構造物のコア供試体の配合設計（管理者への聞き取り調査結果）に準じている。供試体の示方配合を表 3.2.1 に示す。

本研究では、供試したコンクリート・コアを参考 1～参考 3 とした。試験項目は、力学量に加えて、X 線 CT 指標（空隙構造）および圧縮荷過程の AE である。ただし、3.2.3 では X 線 CT 特性と力学量について議論し、AE パラメータと応力 - ひずみ挙動の関係については、第 4 章において詳述する。

表 3.2.1 示方配合

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			
普通ポルチランド ^o	20	55	47.0	176	321	741	1179	128	7.3	4.0

表 3.2.2 X 線 CT 試験・条件一覧

ヘリカルピッチ	15.0
スライス厚	0.5 mm
試験速度	7.5 mm/rotation
出力	120 kW and 300 mA
Recon Matrix	512×512 pixel
視野	100-200 mm

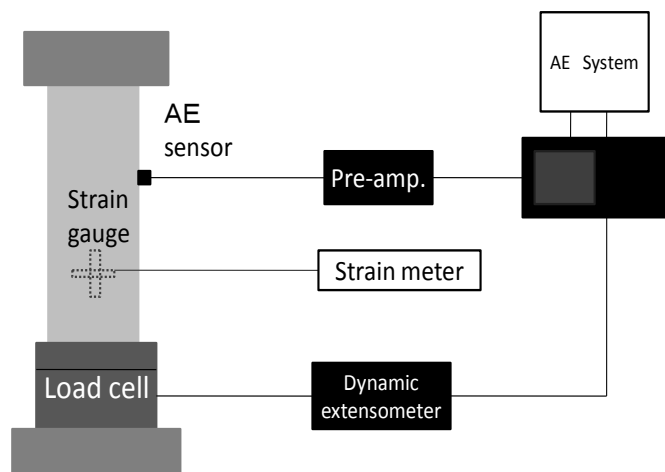


図 3.2.1 AE 計測を含む圧縮強度試験システム（無損傷コンクリートの場合）

3.2.2 実験・解析方法

(1) X線 CT 試験に基づくコンクリート内部の可視化・定量化

X線スキャナは Asteion TM（東芝製）²⁾である。試験条件は、分解能 200 μ m、解像度 512 \times 512 pixel である。検討に用いたコンクリート・コアの直径は ϕ 104 mm である。試験条件の詳細を表 3.2.2 に示す。

取得した X 線 CT 画像を二値化処理することにより空隙分布を抽出し、空隙の形状特性を評価した。二値化処理は、8 ビットグレイスケール画像を用いて彩度の閾値を調整して行った。閾値は下限値 0.0 および上限値 65 を設定した。

(2) コンクリート力学特性評価

X 線 CT 試験を実施後、透過法による超音波伝播速度試験を行った。試験装置には Pundit Lab（PROCEQ 社製）を使用し、コア断面の超音波速度を天端部から 10 mm 間隔で測定した。探触子にはグリスを薄く塗布し、供試体との密着性を高めた。入力超音波の周波数は 54 kHz である。

圧縮強度試験は、超音波伝播速度試験を実施後に AE 計測を導入して行った。その際、応力 - ひずみ挙動をロードセルとひずみゲージにより計測した。破壊過程の詳細評価は、AE 法により実施した。AE 計測は、SAMOS（PAC 社製）を用い、AE センサをコンクリート・コア側面部に設置して行った。閾値を 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 センサには 150 kHz 共振型センサを用い、コンクリート・コア中央部に 1 ヶ所設置した（図 3.2.1）。応力 - ひずみ挙動を AE 計測装置に取り込むことにより、AE 発生挙動と載荷過程との整合を取った。

3.2.3 実験結果・考察

(1) X線 CT 画像特性

本項では、ひび割れに代表されるコンクリート損傷を評価するため、無損傷コンクリートの X 線 CT 画像の特徴量を抽出する。検討断面は、コンクリート・コアにおいて直交する 2 断面（A 面、B 面）とした。X 線 CT 画像と画像中心線の CT 値分布を図 3.2.2 に、X 線 CT 画像から抽出した空隙特性を表 3.2.3 に示す。なお、図 3.2.2 の CT 値分布図は、X 線 CT 画像中に示すコア中心線（赤線）の CT 値を図化したものである。図 3.2.2 で、6 断面の CT 値の平均値は 2,070（範囲：2,016～2,108）である。コンクリートの CT 値は、通常、粗骨材が最も高く、次いでモルタル、空隙の順となる。いずれの供試体でもモルタル部は約 1,500～1,800、粗骨材では 2,500～3,000 近傍に試験値が集中した。空隙部は、一部で-500 近傍まで CT 値が低下した。この傾向は既往研究^{3), 4)}におけ

るコンクリート内部構成と CT 値の分布傾向に関する一般的な試験結果と一致する。天明ら³⁾による実証的検討では、配合設計が同一でないことから単純な比較検討は困難であるが、空隙を含むモルタル部の CT 値が約 800（水セメント比 55%）と報告されている。本研究においても、モルタル部（1,500～1,800）と空隙部（- 700（最小値））の CT 値を平均すると類似な評価値となった。このことから、X 線 CT 画像によるコンクリートの内部構成（モルタル、空隙、粗骨材）の特徴量を抽出することは可能であると考えられる。特に空隙の CT 値は、粗骨材やモルタルと比較して大きく異なるため、空隙と類似な CT 値を示すと考えられるひび割れにおいても、その特徴量の抽出は可能であると考えられる。先行研究は主にモデル試験であることから、本研究における無損傷コンクリートと損傷コンクリートの空隙の比較は初めての実用的な活用例となる。

本研究では、X 線 CT 画像を二値化処理し、空隙率、空隙面積、アスペクト比、真円度および空隙外周長の 5 項目の指標を抽出した。各評価指標の平均値は、アスペクト比 1.56、真円度 12.25、空隙面積 1.4 mm^2 、空隙外周長 3.4 mm および空隙率 1.3 %であった（表 3.2.3）。アスペクト比は長軸長と短軸長の比であり、真円の場合 1.0 となる。真円度は、真円の場合、最小値 4π となる。なお、これらの評価値は、後述する 3.3.3 (2) において凍害コンクリートとの比較検討に用いる。

(2) コンクリート力学特性

無損傷コンクリートは、実験室内で打設したものであることから、ひび割れ損傷は有していない。力学特性一覧を表 3.2.4 に示す。

破壊試験より得られた評価値の平均値は、圧縮強度 28.4 N/mm^2 （最大値～最小値： $26.4 \sim 30.8 \text{ N/mm}^2$ ）、最大ひずみ $2,147 \mu$ （ $1,380 \sim 2,880 \mu$ ）である。応力 - ひずみ曲線から求められるひずみエネルギーは 平均 51.4 J （ $29.0 \sim 72.3 \text{ J}$ ）である。この評価値は、耐久性を必要とする農業水利施設の標準値である圧縮強度 24 N/mm^2 、最大ひずみ $2,000 \mu$ より算出されるひずみエネルギー 37.7 J の 1.36 倍である。損傷力学指標 λ は、平均 2.3（ $1.1 \sim 4.6$ ）であった。また、破壊試験前に実施した P 波速度の計測では、その平均値が $4,093 \text{ m/s}$ （ $3,950 \sim 4,200 \text{ m/s}$ ）であり、コンクリートの標準値である $4,000 \text{ m/s}$ に近い値であった。

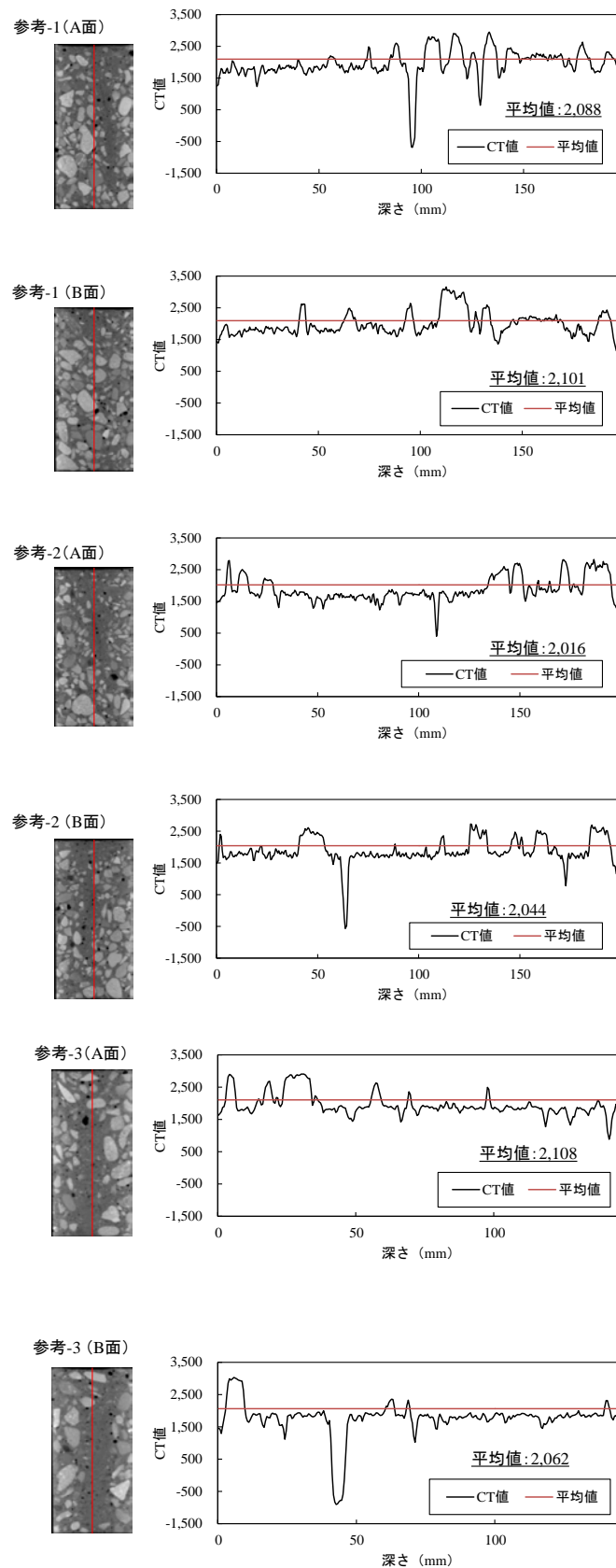


図 3.2.2 無損傷コンクリートの X 線 CT 画像と CT 値分布

表 3.2.3 空隙特性一覧（無損傷コンクリート）

サンプルタイプ (本数)	アスペクト比 (-)	真円度 (-)	空隙面積 (mm ²)	空隙外周長 (mm)	空隙率 (%)
無損傷 (n=3, 6 断面)	1.56 (0.41)	12.25 (11.86)	1.4 (8.9)	3.4 (8.7)	1.3 (0.04)

* 表中の数値は平均値（分散値）を示す.

表 3.2.4 力学特性一覧（無損傷コンクリート, n=3）

圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ	P 波速度 (m/s)
28.4 [26.4～30.8]	2,147 [1,380～2,880]	23.0 [21.3～24.4]	14.8 [11.1～19.2]	51.4 [29.0～72.3]	2.3 [1.1～4.6]	4,093 [3,950～4,200]

* 表中の数値は平均値 [最小～最大] を示す.

3.3 凍害によりひび割れ損傷の発達したコンクリートの特性評価

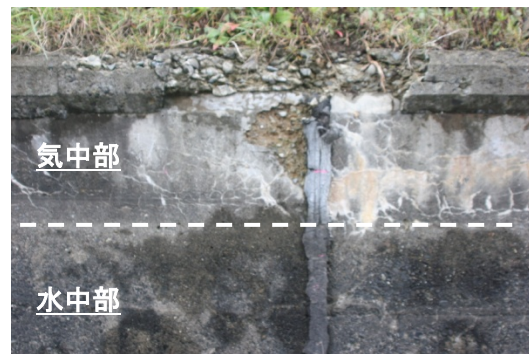
本節では、ひび割れ損傷の発達したコンクリートの特性評価を試み、ひび割れ損傷がコンクリート物性へ及ぼす影響を検討する。対象は、実環境において凍結融解作用による層状ひび割れの発達状況が異なるコンクリートである。これは、同一構造かつ同一配合の既存施設において、ひび割れ損傷の相違がコンクリート物性に及ぼす影響を比較するためである。実験では、無損傷コンクリートと同様に、X線CT法による内部構造の可視化と定量評価に加えて、弾性波法による速度分布と圧縮載荷過程のAE計測に基づく特性評価を試みた^{5),6)}。

3.3.1 供試体

調査対象施設は北海道岩見沢市の北海幹線用水路である（コンクリート開渠構造，図3.3.1(a)）。本施設では左岸側と右岸側で凍害損傷の状況が異なり，左岸側では気中部において凍害損傷が発達していた（図3.3.1(b)，図3.3.2）。これに対して右岸側では，



(a) 調査対象全景



(b) 側壁面近写（左岸，凍害損傷）

図 3.3.1 凍害損傷が顕在化したコンクリート開渠（北海幹線用水路）



(a) コア採取状況



(b) 採取面での層状ひび割れ状況

図 3.3.2 コンクリート・コアの採取と顕在化した層状ひび割れ状況

顕著なひび割れ損傷は確認されなかった。コンクリート・コアは、既存水路構造物からコンクリート側壁部の一部を寒地土木研究所（札幌市）へ移設し、コア・ドリルにより採取した（図 3.3.2 (a)）。コンクリート・コアの一例を図 3.3.3 に示す。

表 3.3.1 に示す 4 項目の試験を 6 本のコア供試体（ $\phi 104\text{ mm} \times 170 \sim 200\text{ mm}$ ）に対して実施した。現地踏査を含めて 9 本のコンクリート・コアの採取を試みたが、コア採取中の断面崩壊や圧縮強度試験中の不具合から、3 本の試験データを対象外とした。コンクリート・コアを損傷状況の異なると考えられる高さの異なる 3 カ所から採取した（図 3.3.4 (a) 緑円近傍）。サンプルタイプを X 線 CT 画像により判別されるひび割れ損傷の進展状況により Type A、Type B および Type C の 3 種類に分類した（図 3.3.4 (b)）。Type A および Type B は、ひび割れ損傷が発達した供試体である（図 3.3.3 (a)）。Type C は、ひび割れ損傷が顕在化していない供試体である（図 3.3.3 (b)）。Type A は、コア全層にひび割れ損傷が確認できる供試体（ $n=1$ ）、Type B はコア上部にのみひび割れ損傷が確認できる供試体（ $n=3$ ）、Type C は凍害環境に設置されていたが、ひび割れ損傷が確認されず微細ひび割れの蓄積が疑われる供試体（ $n=2$ ）である。

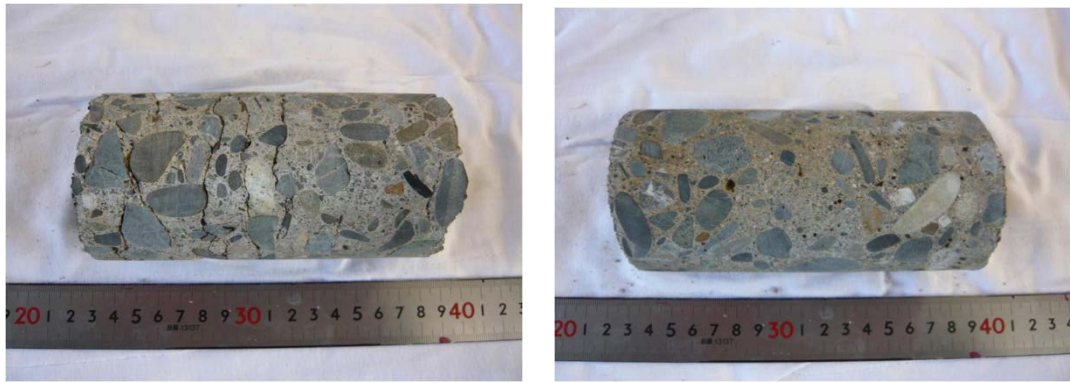
3.3.2 実験・解析方法

(1) X 線 CT 試験に基づく損傷の可視化・定量化

コンクリート・コアに対する X 線 CT 試験は、既往の研究^{3),4),9)}を参照し、前述 3.2 の無損傷コンクリートと同一の試験条件で実施した（表 3.2.2）。

X 線 CT 画像の解像度は $512 \times 512\text{ pixel}$ で、コンクリート・コアの直径は $\phi 104\text{ mm}$ であるので、各ピクセルの一辺の長さは 0.2 mm ($200\mu\text{m}$) である。X 線 CT 画像の各ピクセルの CT 値は、スライス厚 0.5 mm を考慮した $0.2 \times 0.2 \times 0.5\text{ mm}$ のボクセルにより与えられる。

8 ビットグレイスケール画像を用いて彩度の閾値を調整して X 線 CT 画像の二値化処理を行った。二値化画像と X 線 CT 画像を重ね合わせ、ひび割れ部位の画像整合が最も高くなる条件とした。各サンプルの処理条件を表 3.3.2 に示す。二値化画像から空隙率と空隙面積を求め、ひび割れと空隙を定量的に評価した。また、空隙の形状的特徴は、アスペクト比、真円度および空隙外周長により評価した。二値化画像では、粗骨材およびモルタルが黒色で、ひび割れと空隙が白色で表示される（図 3.3.5）。X 線 CT 試験では、1 本のコンクリート・コアに対して直交する 2 断面（A 断面と B 断面）の可視画像を取得した（図 3.3.6）。図 3.3.7 は空隙の評価指標に関する概念図で、ひび割れ・空隙の長径は楕円の長径、空隙外周長は楕円の外周長に対応する。

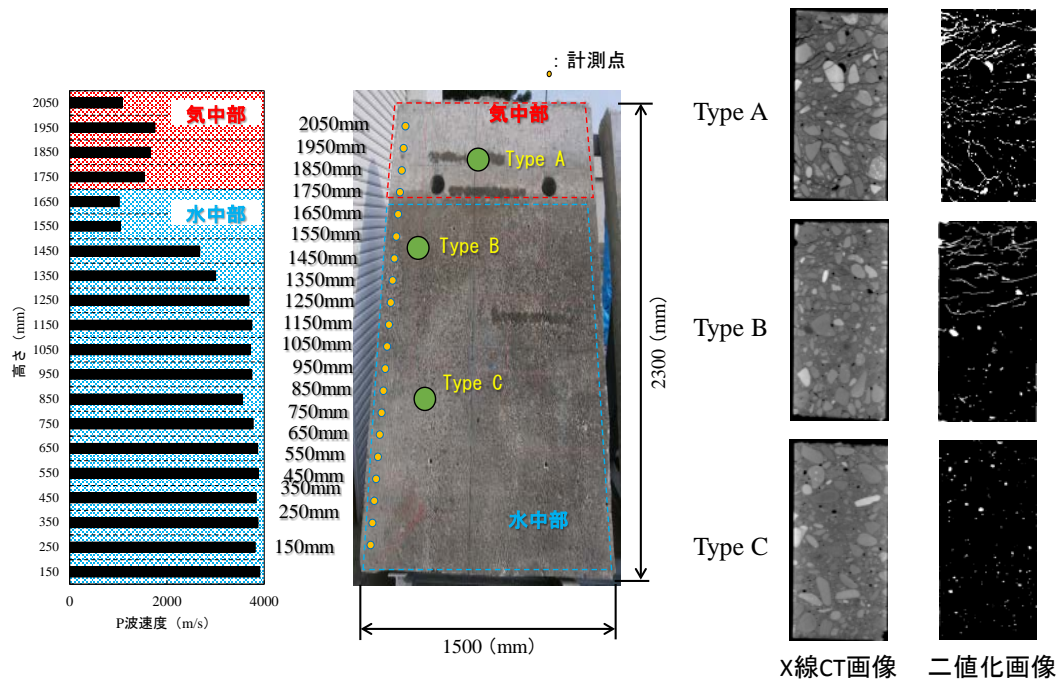


(a) ひび割れ損傷の顕在化したサンプル (b) ひび割れ損傷の未顕在化サンプル

図 3.3.3 採取したコンクリート・コア（可視画像）

表 3.3.1 試験項目一覧

No.	試験項目	規格・試験条件	数量
1	圧縮強度試験 ⁷⁾	JIS A 1108-1999	6 試料
2	超音波伝播速度試験 ⁸⁾	日本建築学会	6 試料
3	X 線 CT 試験	表 3.2.2, 表 3.3.2	6 試料 (3D) × 2 面
4	弾性波トモグラフィ試験	表 3.3.3, 表 3.3.4	6 試料 × 2 面



(a) コア採取ブロック

(b) X 線 CT 画像

図 3.3.4 採取施設・コンクリート・コア概要

表 3.3.2 X 線 CT 画像の二値化処理条件一覧

No.	サンプルタイプ	閾値（上限）	閾値（下限）
1	Type A	92	0
2	Type B	40	0
3		92	0
4		74	0
5	Type C	65	0
6		75	0

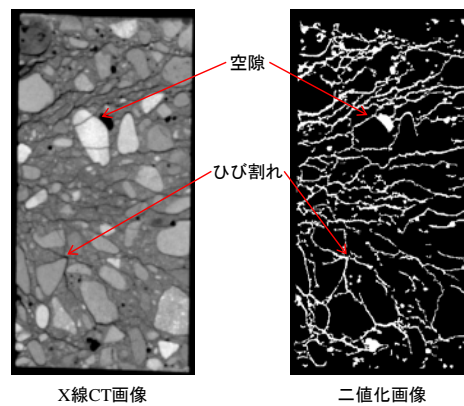


図 3.3.5 X 線 CT 画像とひび割れ空隙を対象とした二値化画像

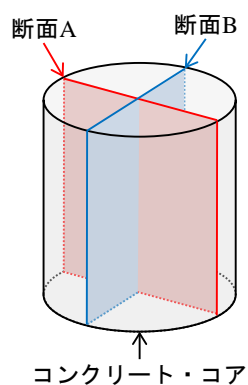


図 3.3.6 X 線 CT 試験の評価断面

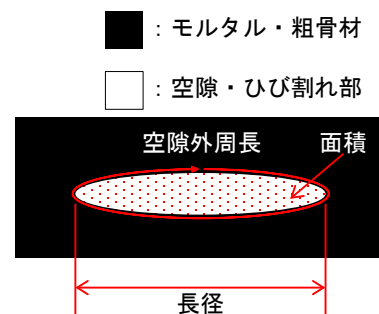


図 3.3.7 空隙評価指標の概念図

(2) 弾性波トモグラフィ法によるコンクリート速度分布の評価

X線CT試験後、弾性波法による速度分布を評価した。速度分布の評価には弾性波トモグラフィ法と超音波伝播速度法（透過法）の2種類の方法を用いた。両手法は、コンクリートの弾性波速度を評価する点では同一であるが評価原理が異なることから、弾性波トモグラフィ法により評価した速度を「弾性波速度」とし、超音波伝播速度法により評価した速度を「P波速度」と本研究では区別して記述する。

弾性波速度分布は、コンクリート・ブロックとコア供試体の2種類を対象に評価した。弾性波トモグラフィ法では、弾性波の走時を入力波に対する出力波の到達時間差から解析的に求め、得られた走時にトモグラフィ処理を施すことにより弾性波速度の断面分布（速度分布）を求めた。試験条件を表3.3.3と表3.3.4に示す。

コンクリート・ブロックでの弾性波計測では、200 kHz 超音波センサを用いて弾性波を入力し、150 kHz 共振型 AE センサにより受信した。1点の入力点に対して63点の出力点を設定した。コンクリート・コアでは、入力を打音に変更し、1 cm 間隔で計測した。弾性波の入力回数や使用センサ等のその他の試験条件は両サンプルで同一とした。試験・解析概要を図3.3.8、図3.3.9および図3.3.10に示す。

表 3.3.3 弾性波トモグラフィ試験条件一覧
(コンクリート・ブロック)

弾性波入力方法	超音波 (200 kHz)
弾性波入力回数	10 回 (スタッキング処理)
試験点	10 cm 間隔, 格子状
使用センサ	150 kHz 共振型 AE センサ
受信側試験条件	閾値 40 dB, 増幅 60 dB
解析条件	繰返し計算 10 回 (max)

表 3.3.4 弾性波トモグラフィ試験条件一覧
(コンクリート・コア)

弾性波入力方法	打音棒
弾性波入力回数	10 回 (スタッキング処理)
試験点	1 cm 間隔, 供試体長辺方向
使用センサ	150 kHz 共振型 AE センサ
受信側試験条件	閾値 40 dB, 増幅 60 dB
解析条件	繰返し計算 10 回 (max)

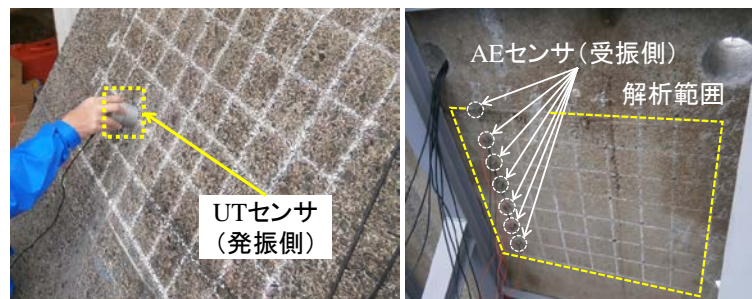
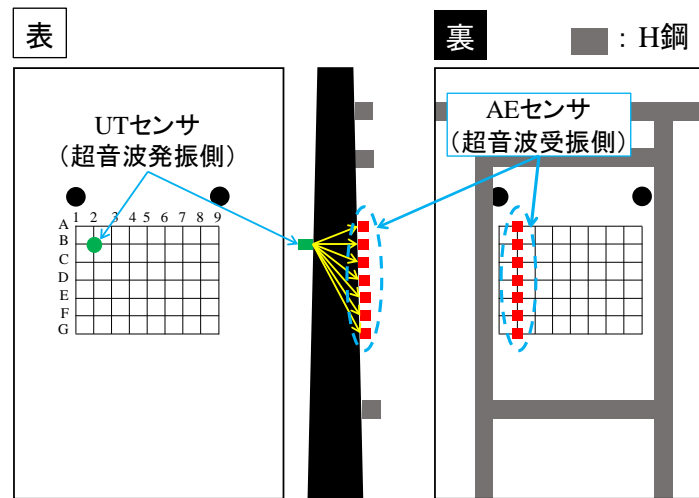


図 3.3.8 弾性波トモグラフィ試験概要 (コンクリート・ブロック)

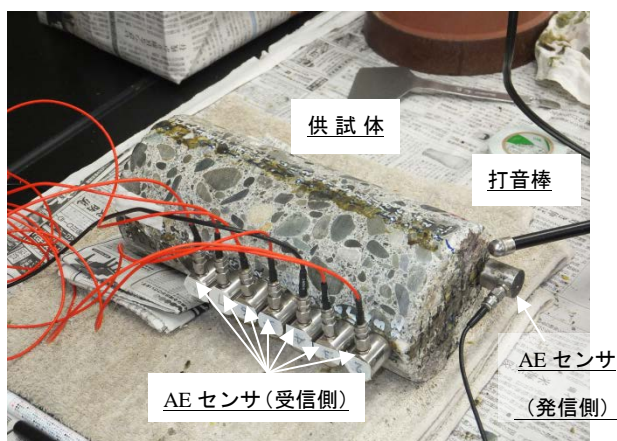


図 3.3.9 弾性波トモグラフィ試験概要
(コンクリート・コア)

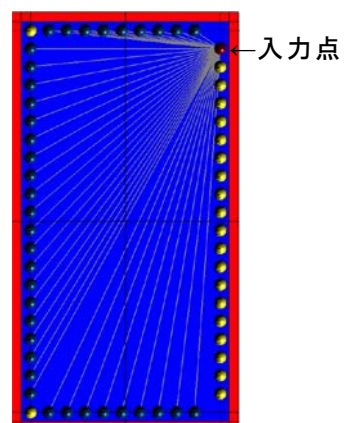


図 3.3.10 解析モデル
(弾性波トモグラフィ)

(3) 超音波伝播速度試験

超音波伝播速度試験は、超音波発生装置 Pundit Lab (PROCEQ 社製) を使用し、無損傷コンクリートと同一方法により実施した。コア断面の天端部から 10 mm 間隔で P 波速度を測定した。入力超音波は 54 kHz である。

(4) AE および DICM による圧縮応力場の局所破壊計測

圧縮強度試験では、AE と DICM (デジタル画像相関法) の計測を同時に行った (図 3.3.11 (a) ~ (c))。DICM の計測原理は、2 台の CCD カメラで計測対象表面のランダム模様の動きを 3 次元で追跡し、変形前後の点 (画素) の移動量から変形方向とその量を推定するものである。坂本¹⁰⁾らの先行研究では 1 台のカメラによる計測が用いられているが、この方法では面外方向への変形挙動を正確に検出することは困難である。本研究における 2 台の CCD カメラを用いた実験状況を図 3.3.11 (c) に、計測機器条件を表 3.3.5 に示す。

損傷コンクリートにおいて実施する圧縮強度試験の特徴は、供試コアにおいてひび割れ損傷が進展している点にある。一般的な圧縮強度試験では、応力 - ひずみ曲線のひずみ計測をひずみゲージにより点的に実施するが (図 3.3.11 (a))、この方法では損傷コンクリートの載荷初期段階の局所ひずみを計測することは困難である。載荷初期段階では、ひび割れ損傷が発達した部位や材料弱部において局所ひずみが進行する。このため点的な計測では局所的に発達するひずみを捉えることができない場合がある。したがって、損傷コンクリートでは、画像解析などにより局所化したひずみ現象を同定することが必要である。既往研究では、局所ひずみの同定に複数本のひずみゲージを設置する方法 (例えば、渡辺ら¹¹⁾) や画像による方法 (例えば、坂本ら¹⁰⁾) が試みられている。本研究ではデジタル画像相関法¹²⁾により局所化したひずみを非接触にて計測した。計測結果は、AE により検出した弾性波と関連させ、損傷状況の評価に用いた。

AE 計測では、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、図 3.3.11 (b) に示すようにコンクリート・コアの側面部に設置した。閾値を 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 センサには 150 kHz 共振型センサを用いた。

(5) AE 波の信号処理方法 - イベントとヒット-

対象となる AE は、材料中を伝播する実体波とその他の波動成分 (例えばレイリー波など) が合成されて検出される (第 2 章 2.4)。実験的な検討により検出される AE は、時間と振幅値のどちらの観点においても規則正しい確定信号ではなく、各波動成分の合成された不規則信号である¹³⁾。検出された AE からは、AE パラメータである「単位時間あたりの AE 発生数 (ヒット数)」「AE 発生頻度」ないし AE 発生源の位置標定に基づく「AE イベント」を用いることにより詳細評価を行うことができる。

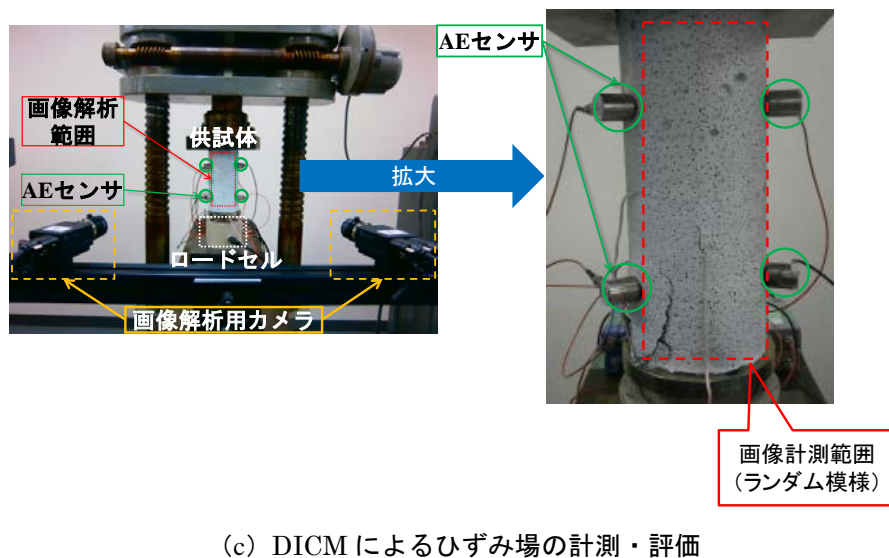
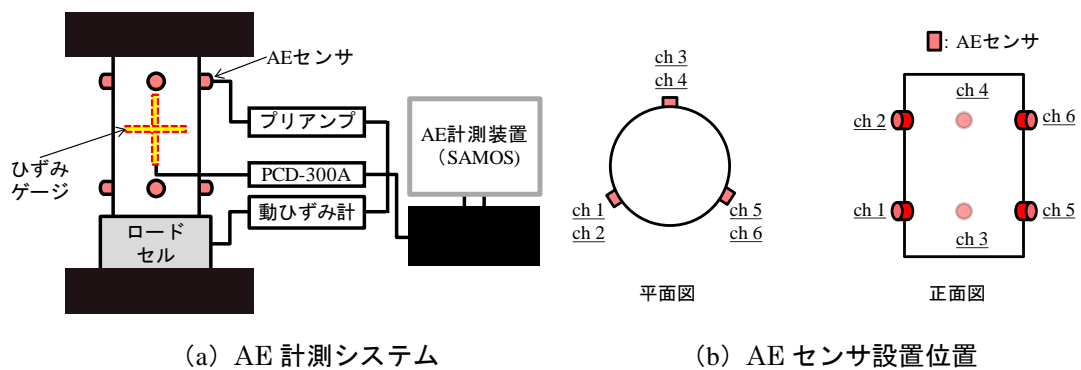


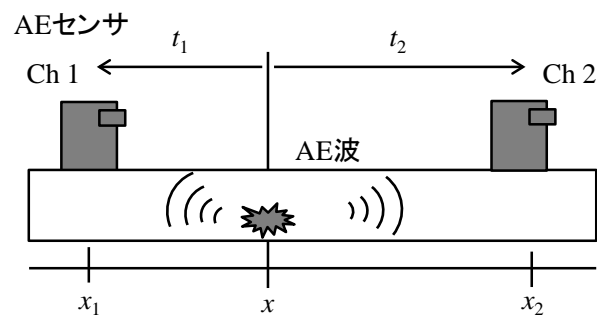
図 3.3.11 圧縮強度試験システム

表 3.3.5 DICM に用いた試験機器（仕様）

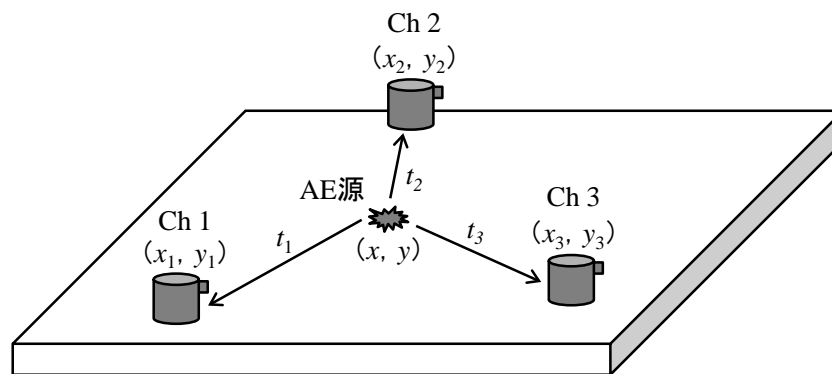
CCD カメラ	型番：CRAS-14S5M-C（Point Grey Research 社製） 解像度：1384×1036 pixel 画素サイズ：6.45×6.45 μm シャッター速度：0.02 ms～10 s
レンズ	型番：Xenoplan 1.4/17（Schneider Kreuznach 社製）
パソコン	CPU：Core i7 980 @ 280 GHz メモリ容量：6.00 GB HDD：1 TB

AE 源の位置は，センサの幾何学的位置情報と試験対象の弾性波速度および同一現象から発生する AE 波の到達時間差から標定することができる¹⁴⁾．図 3.3.12 に概念図を示す．評価精度は，試験対象の均質性に依存し，ひび割れ損傷の発達した不均質材料の場合，局所損傷の影響により精度が低下する．

本研究では，AE を発生源位置標定が可能な 6 チャンネル試験を実施した(図 3.3.11)．その際，DICM を用いることで局所損傷個所を同定し，それを避けることで発生源位置の標定精度を高めた．



(a) AE 源の 1 次元位置標定



(b) AE 源の 2 次元位置標定

図 3.3.12 AE 発生源位置標定概念図

3.3.3 実験結果・考察

(1) コンクリート・ブロックの損傷実態

ここでは図 3.3.4 に示す北海幹線用水路側壁部のコンクリート・ブロックについて、弾性波トモグラフィ法と超音波伝播速度試験による計測結果から速度分布と損傷との関係を考察する。図 3.3.13 は弾性波トモグラフィ計測結果であり、右側に弾性波速度の平面分布を、左側にその頻度を示す。なお、図中の朱塗り部分は、通常のコンクリート構造物において計測される弾性波速度 3,000~4,000 m/s の範囲を示したものである。

検討の結果、解析範囲上部（気中部側）の弾性波速度は 975~2,500 m/s の範囲に分布しており、解析範囲下部（水中部側）と比較して弾性波速度が顕著に低かった。コンクリートの標準的な弾性波速度は 4,000 m/s¹⁵⁾であるので、気中部の損傷蓄積を示唆するものと考えられる。

図 3.3.14 は超音波伝播速度試験より求めた P 波速度と弾性波トモグラフィ法により求めた弾性波速度との比較結果である。P 波速度が低下している壁高 1,550~1,650 mm の気中部において弾性波速度の顕著な低下が見られ、両手法の有効性が確認された。

農業水利施設における超音波伝播速度試験の観点からの同様の試験結果は、緒方ら¹⁶⁾や石神ら¹⁷⁾による実験研究においても報告されている。緒方ら¹⁶⁾は、農業用 RC 開水路の凍害損傷の発生形態を詳細に調査し、最多頻度水位よりも上部での凍害損傷の進行を報告している。最多頻度水位は本研究の定義では気中部に相当し、緒方らの成果は本研究の試験結果を支持するものである。石神ら¹⁷⁾は、緒方らと同様に農業用 RC 開水路を対象にコンクリートの吸水性と超音波伝播速度との関連を実験的に検討し、ひび割れ損傷の蓄積と速度低下、吸水率の上昇を明らかにしている。いずれの既往研究においても凍結融解作用に起因する損傷蓄積によりに発達した空隙層が超音波の伝播挙動を阻害し、P 波速度が低下したものと推察される。図 3.3.4 (b) に示す採取コアの X 線 CT 画像では、気中部より採取した Type A が水中部下より採取した Type C と比較してひび割れ損傷が発達していることがわかる。気中部では水中部と比較して気相率が上昇して速度低下が検出されたものと推察される。

緒方や石神らの一連の研究^{16)~22)}では、いずれも現地ないしコンクリート・コアによる透過法での超音波伝播速度試験が中心であり、本研究での取り組みであるトモグラフィ解析に基づく弾性波の面的な速度分布を実証的に試験・評価した事例は無い。このことから、本研究成果は寒冷地における農業水利施設の損傷蓄積に関する特徴を面的に明らかにしており、有用な計測事例になるものと考えられる。

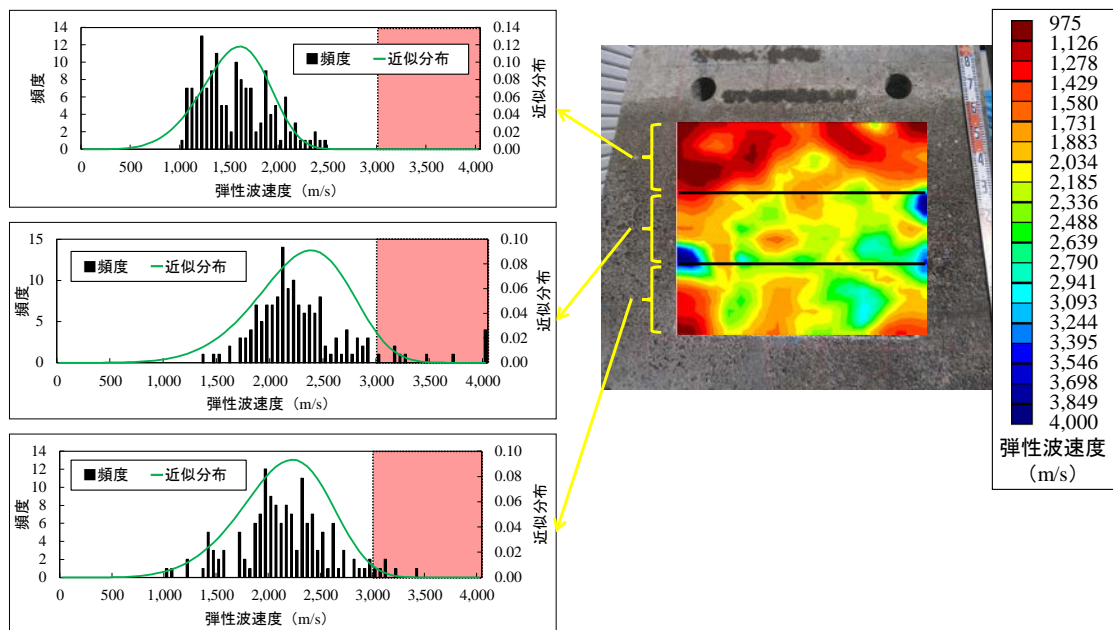


図 3. 3. 13 弾性波トモグラフィ解析結果（コンクリート・ブロック）

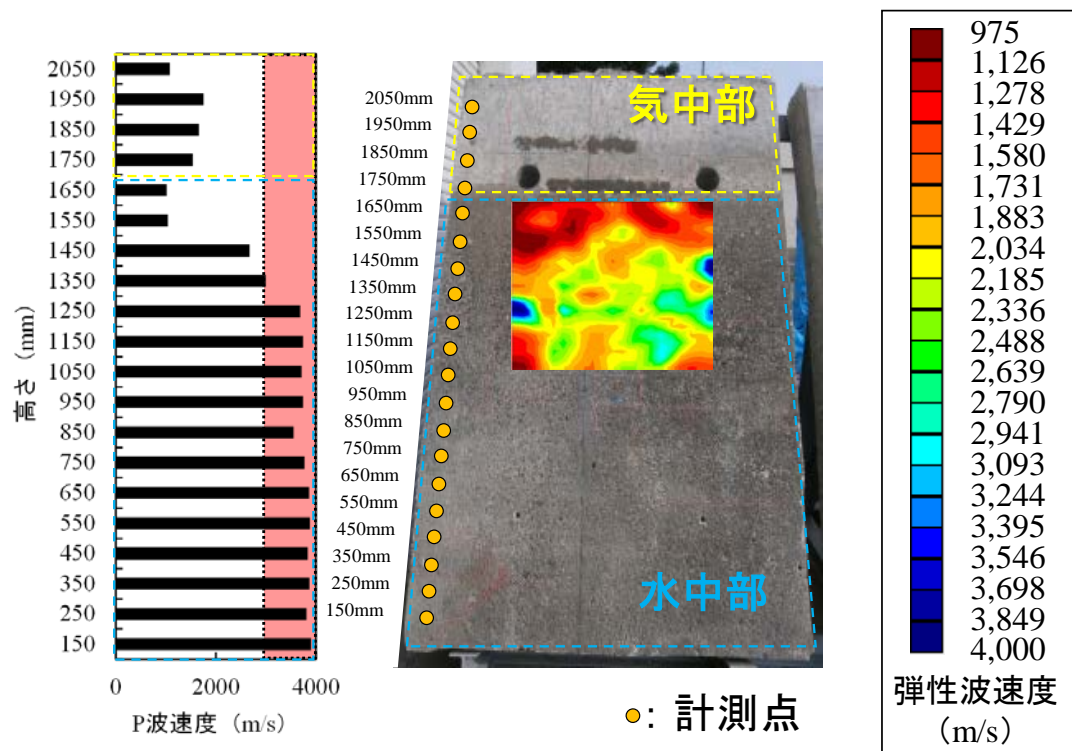


図 3. 3. 14 弾性波トモグラフィ解析結果と P 波速度の比較

(2) X 線 CT 画像を用いたひび割れ損傷の特性評価

ここでは、弾性波速度分布を評価したコンクリート・ブロックからコア供試体 (Type A~C) を採取し、X 線 CT 法を用いてひび割れ損傷を含む空隙構造の定量評価を試みる。Type A~Type C に関する X 線 CT 画像の二値化処理後に抽出したひび割れ損傷の評価値を表 3.3.6 に示す。表中の無損傷とは 3.2 において提示した実験室内で打設した無損傷コンクリートである。ひび割れと空隙の量的指標には、空隙率と空隙面積を用いた。形状的特徴は、アスペクト比、真円度および空隙外周長により評価した。

検討の結果、無損傷コンクリートに比べてアスペクト比、真円度、空隙外周長のいずれもが、ひび割れ損傷の蓄積に伴い増加した。特に空隙外周長は、Type A で無損傷コンクリートの平均値の 9.1 倍を示し、ひび割れ損傷の蓄積に伴う増加傾向が顕著であった。凍害進行に伴う指標値の変化に関しては、橋本ら²³⁾による試験結果においても確認されている。石神ら²⁴⁾は、農業用コンクリート開渠の側壁の一部を X 線 CT 試験に供試し、コンクリート内部のひび割れ密度と超音波伝播速度との関連性を明らかにした。X 線 CT 試験による凍害損傷の可視化・定量化に関する筆者らの一連の研究^{5), 25)~31)}では、発達したひび割れ損傷は、コンクリート打設時に混入するエントレンドエアやエントラップトエアとは幾何学的形状が異なるため、空隙面積や空隙外周長、真円度等の評価指標により区別できることを明らかにしている。これら評価指標は、空隙の連続性を評価するもので、従来からコンクリート工学分野で行われている気泡間隔係数の評価や細孔径分布試験などでは十分に検出することが困難である。一連の研究から、X 線 CT 法により粗大ひび割れの幾何学的特徴を抽出可能であることが明らかになった。損傷蓄積に伴う評価値は、いずれの指標値も無損傷<Type C<Type B<Type A の順に増加し、目視で確認できるひび割れ損傷の量的な増加傾向と一致した。

凍害コンクリートの空隙外周長と粗骨材外周長の特性を図 3.3.15 に示す。粗骨材外周長では、各タイプでの相違は見られなかった。それに対して、空隙外周長は Type C と比較して Type B、Type A と評価値の上昇が見られた。ひび割れ損傷が顕著な Type A および Type B と比較して Type C において 10 mm 以上の空隙外周長の頻度が低下した。Type A では、空隙外周長 10 mm から 50 mm の範囲に多数のひび割れ損傷が確認された。空隙外周長の増加は、ひび割れ損傷によると推察されることから、X 線 CT 画像の二値化処理により顕在化損傷の定量化が可能になるものと考えられる。各タイプにおける粗骨材外周長の類似性は、粗骨材分布が建設当初の配合設計に依存するため、分布に相違がなかったものと考えられる。空隙量の指標である空隙面積と空隙率は、ひび割れ損傷の増加に伴い評価値が上昇し、無損傷サンプルに比べて空隙面積で 9.4 倍、空隙率で 8.8 倍であった。

以上より、ひび割れ損傷は、X 線 CT 画像により定量化し、その特性を抽出することが可能である。実証的検討から表 3.3.6 に示す評価値と圧縮載荷過程で発生する AE との関係を実験第 4 章において検討する。

表 3.3.6 空隙特性一覧

サンプルタイプ (本数)	アスペクト比 (-)	真円度 (-)	空隙面積 (mm ²)	空隙外周長 (mm)	空隙率 (%)
Type A (n=1)	3.46 (6.62)	78.62 (47,548)	13.2 (2,499.6)	30.9 (10,639.3)	11.4 (13.0)
Type B (n=3)	2.68 (4.91)	26.14 (1,742)	3.4 (127.6)	8.3 (413.6)	4.8 (3.5)
Type C (n=2)	1.66 (0.63)	13.66 (31)	1.8 (7.2)	4.3 (9.4)	1.0 (0.03)
無損傷 (n=3)	1.56 (0.41)	12.25 (12)	1.4 (8.9)	3.4 (8.7)	1.3 (0.09)

*1 表中の数値は平均値（分散値）を示す.

*2 平均値，分散値ともに X 線 CT 試験面である A 面，B 面の検討結果を含む（1 サンプル 2 面）.

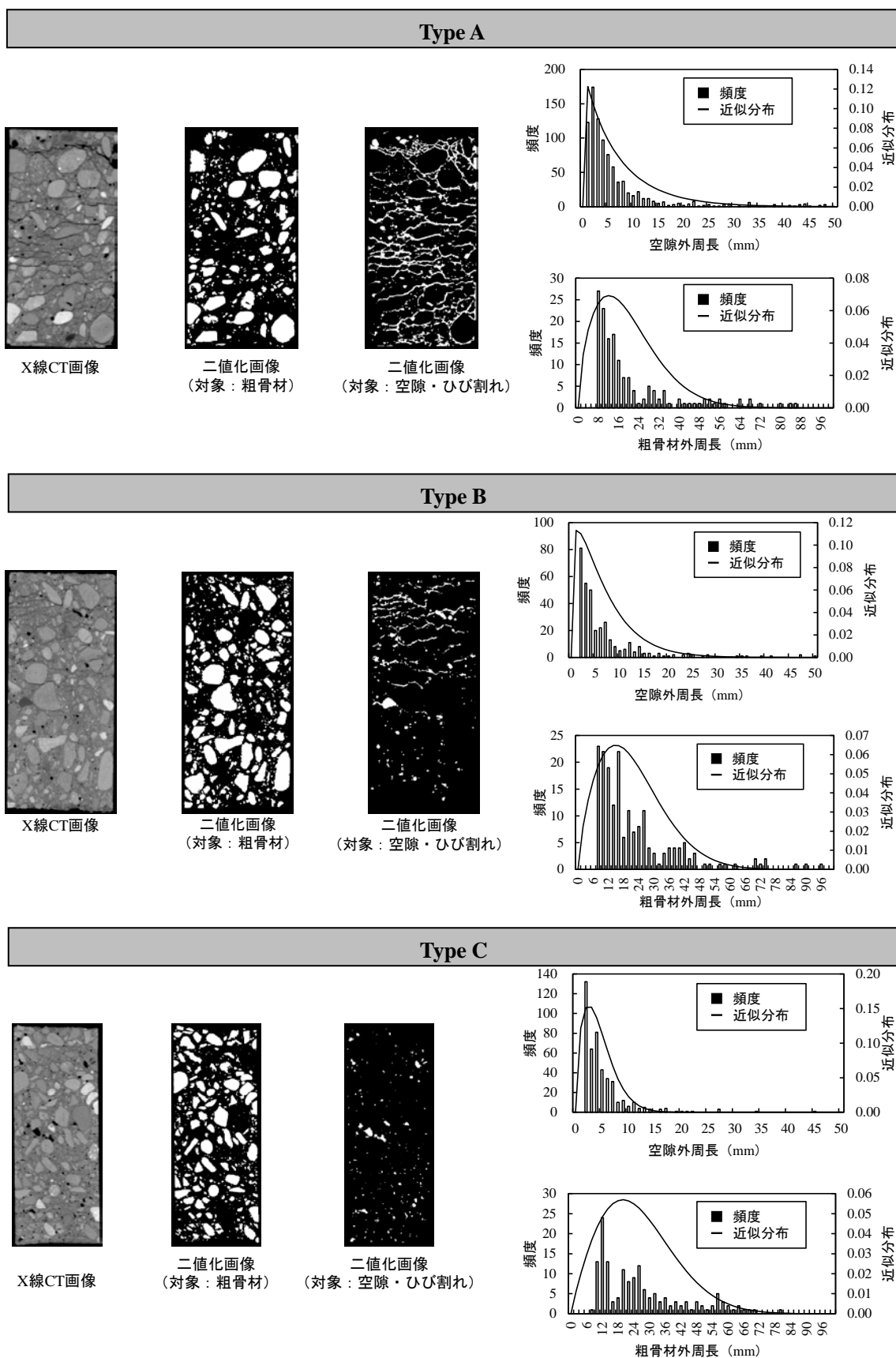


図 3.3.15 X 線 CT 画像による空隙と粗骨材の外周長特性

(3) コンクリート・コアのひび割れ損傷と物性値の関係

ここでは、ひび割れ損傷が異なる 3 タイプの代表的サンプルの A-1, B-1 および C-1 を用いて、ひび割れ損傷の発達状況とコンクリート物性の関係を比較検討する。X 線 CT 画像とその二値化処理結果を図 3.3.16 に示す。

Type A では層状ひび割れが全層に発達しており、二値化処理後の断面画像を詳細に観察するとモルタル面でのひび割れ発達が顕著に認められた。Type B では、供試体表面から 10 cm 程度まで層状ひび割れが検出されたが、10 cm 以下では顕著なひび割れは見られなかった。Type A と Type B のひび割れ分布状況の相違は、水利条件の違いによる凍害損傷に影響したためと考えられる。凍害損傷は、コンクリート内部の水分凍結による凍結圧に起因し、局所的な引張り応力の卓越がひび割れを進展させる³²⁾。Type A は気中部より採取した供試体であり、Type B は水中部であるが限りなく気中部に近いところから採取した供試体である。Type C は、Type A や Type B とは異なり、水中部下部より採取された供試体である（図 3.3.4 (a) 参照）。X 線 CT 画像からひび割れ損傷は検出されず、Type A や Type B とは明確に異なる状態である。各サンプルは、同一配合のコンクリートであるが、気中部では農業的水利用を含めたコンクリート表面の水分と温度環境が影響し、凍結融解作用に起因するコンクリート損傷が顕在化したものと推察された。以上より、農業水利施設では同一施設においても環境条件や水利利用条件によって長期耐久性が左右されることが考えられる。本研究では、各タイプの相違に加えて、1 本のサンプル内においても表層から背面までの断面方向において、ひび割れの分布特性の相違が見られた。

そこで、P 波速度を超音波伝播速度試験より 10 mm 間隔で計測した（図 3.3.17）。凍害損傷によるコンクリート物性への影響は、通常、共鳴法による相対動弾性係数により評価される^{33), 34)}。既存施設の動弾性係数は、超音波伝播速度試験による P 波速度とコンクリートのポアソン比より式 (2.16) を用いて計算され、圧縮強度試験で求められる初期接線弾性係数との関連が明らかにされている^{35)~39)}。本研究では、弾性波速度を指標にコンクリートの損傷実態を物性値の観点から考察する。

検討の結果、Type A では全層の低速度化が進行しており、P 波速度は 2,275~3,398 m/s であった。これは、ひび割れ損傷の影響と考えられる。コンクリートの標準的な弾性波速度が 4,000 m/s であることから、損傷に伴い速度低下が顕著になったと推察される。Type B は、ひび割れ損傷は部分的で、P 波速度は 3,239~3,714 m/s であった。Type C は P 波速度が 3,412~3,686 m/s で、標準的値に近い値となった。同一供試体において、AU (Acousto-Ultrasonic) 法により求めた AE パラメータ（平均周波数、AE エネルギー）においても、ひび割れ損傷の進行に伴い平均周波数と AE エネルギーが低下した⁹⁾。ひび割れ損傷の進展は、コンクリート中の空隙の発達であり、内在する空気層が入力超音波の低周波数化や低速度化、エネルギー減衰の誘因になるものと推察される。

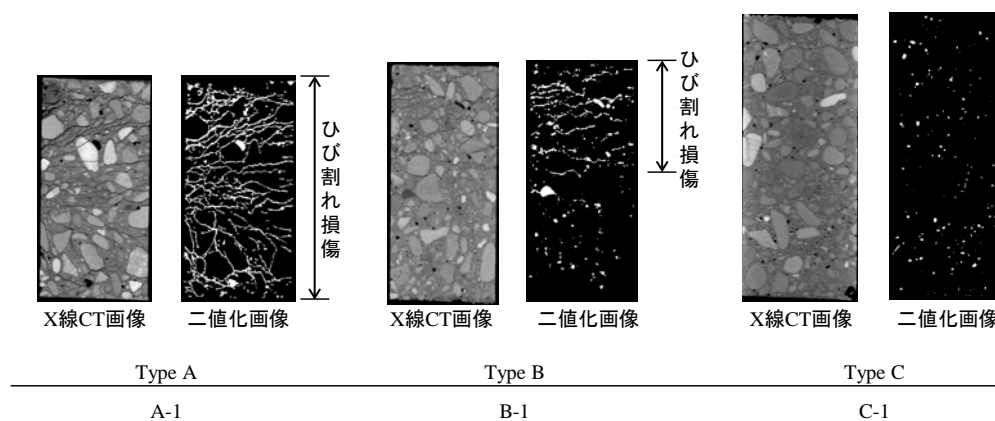


図 3.3.16 供試したコンクリート・コアの X 線 CT 画像と二値化処理によるひび割れ検出

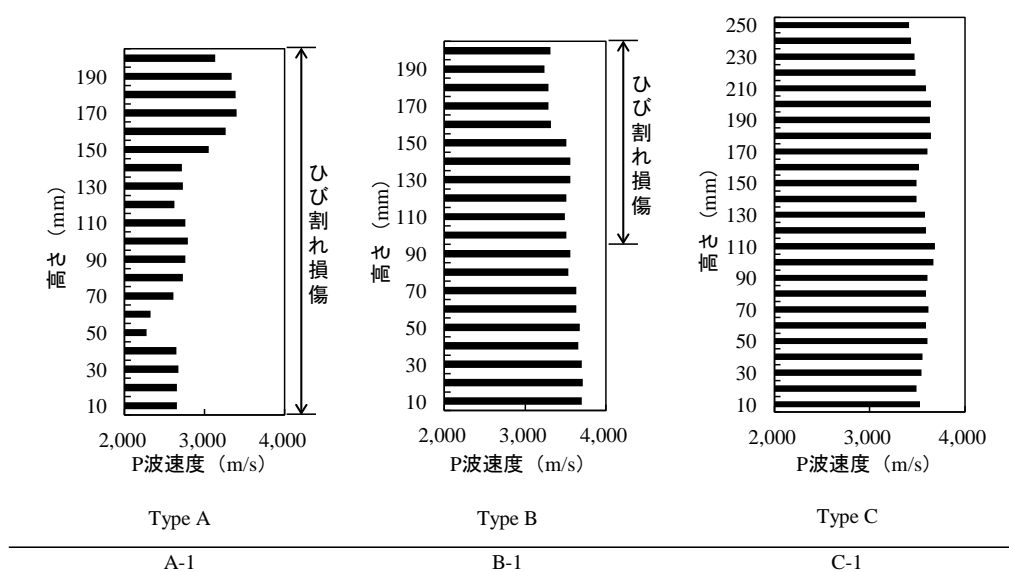


図 3.3.17 コンクリート・コアの P 波速度分布

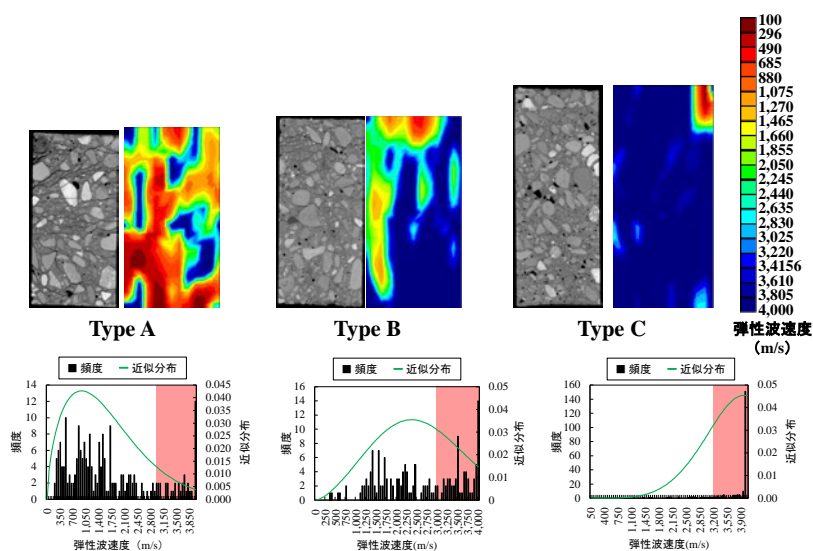


図 3.3.18 コンクリート・コアの弾性波トモグラフィ解析結果

したがって、超音波伝播速度試験から得られる P 波速度は、コンクリート中に発達するひび割れ損傷の程度を評価できる指標と考えられる。ただし、P 波速度による方法は、点的な評価であるため、本研究ではコンクリート・コア内部の速度分布を面的に検出するため弾性波トモグラフィ法を用いた。超音波は一般的にその指向性から直線的な挙動を示す⁴⁰⁾。弾性波トモグラフィ法は、入力した弾性波を複数のセンサ（本研究では AE センサを使用、3.3.2 (2) 参照）により検出し、トモグラフィ解析に基づく面的な速度分布を求めるものである。弾性波トモグラフィ法による速度分布は、異方的に発達したひび割れ損傷の実態を分析するのに有効である。検討結果を図 3.3.18 に示す。

弾性波トモグラフィ法による速度分布においても Type A では、顕著な速度低下が見られた。一方、Type B と Type C では、弾性波速度 3,000~4,000 m/s（図 3.3.18 朱塗り部分）の頻度が増加していることがわかる。このことから、弾性波トモグラフィ法の試験結果からも、ひび割れ損傷が顕著なコンクリートでは、弾性波速度が極度に低下することが明らかになった。コンクリート中の弾性波伝播は、ひび割れや空隙、粗骨材、モルタルの影響を受ける。P 波速度と弾性波トモグラフィ試験における速度値の相違は、P 波速度の計測値が特定の 1 断面における値であるのに対して、弾性波トモグラフィでは複数の波線を考慮しているために生じたものと推察される。

以上より、ひび割れ損傷の幾何学的特徴量は、P 波速度に代表される弾性波指標と密接に関連しており、コンクリート損傷度を検出・評価するための有効な指標値であると考えられる。

(4) 圧縮応力を受けるコンクリート・コアの AE 発生特性

ここでは、ひび割れ損傷が発達したコンクリート・コアの圧縮破壊と AE との関係を考察する^{41),42)}。検討に用いた供試体は、損傷状況の異なる Type A~Type C の 3 種（6 試料）である。

1) コンクリート力学特性

供試したコンクリート・コアの力学特性を表 3.3.7 に示す。表中の「無損傷」は無損傷コンクリートである。圧縮強度は平均値で Type A : 7.0 N/mm², Type B : 5.3 N/mm² および Type C : 27.9 N/mm² であった。無損傷コンクリートが 28.4 N/mm² であることから、凍害コンクリートと無損傷コンクリートの圧縮強度の相違は Type A で 0.25 倍、Type B で 0.19 倍および Type C で 0.98 倍であった。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との関係について考察している。一例として幸左ら⁴³⁾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。本研究においても、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。なお、本研究に供

表 3.3.7 力学特性一覧（凍害コンクリート、コンクリート・コア）

サンプル (本数)	圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ^{*2}	P 波速度 (m/s)
Type A (n=1)	7.0 [-]	3,000 [-]	5.9 [-]	2.3 [-]	19.5 [-]	0.7 [-]	2,079 [-]
Type B (n=3)	5.3 [4.2~7.4]	2,797 [1,100~3,925]	2.5 [0.2~5.3]	2.4 [1.1~4.0]	4.1 [1.4~6.1]	3.1 [-]	3,164 [2,944~3,433]
Type C (n=2)	27.9 [27.7~28.2]	1,125 [800~1,450]	35.8 [27.7~44.0]	23.0 [19.1~26.9]	21.3 [10.2~32.4]	1.9 [1.6~2.2]	3,986 [3,971~4,000]
無損傷 (n=3)	28.4 [26.4~30.8]	2,147 [1,380~2,880]	23.0 [21.3~24.4]	14.8 [11.1~19.2]	51.4 [29.0~72.3]	2.3 [1.1~4.6]	4,093 [3,950~4,200]

*1 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。

*2 応力 - ひずみ曲線の不具合により算出されたエラー値は除く

試したコンクリート・コアは、層状ひび割れが発達していることから、幾何学的形状の異なるコア長軸方向にひび割れが内在する場合、ひび割れ形状が载荷軸と平行であることから本検討結果よりも早期に応力集中に基づく圧縮破壊の進展が検出されたものと推察される。

Type C は、無損傷コンクリートと比較して圧縮強度の相違は見られなかったが、最大ひずみは 800~1,450 μ であり、凍害損傷の蓄積に伴う脆性化が示唆された。一般的に損傷蓄積の有無やその程度は圧縮強度により評価されることが多く、農業農村工学分野においても新設構造物ではコンクリート強度として圧縮強度が基準値として採用され、損傷は設計基準値に対する評価値の大小により判断されている。現在の機能保全の手引きでは 21 N/mm² が基準強度として採用されている⁴⁴⁾。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、強度の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。

これらのことから、コンクリートに代表される脆性材料では、損傷蓄積により応力 - ひずみ曲線が変質し、局所破壊に伴う脆性化が顕著になる。Type C は、ひび割れ損傷が顕在化していないことから、圧縮強度の低下まで損傷蓄積は進行していないが、X 線 CT では検出できない微細損傷に起因する脆性化により、最大ひずみの低下が見られたものと考えられる。脆性材料の損傷蓄積の特徴は、ひび割れ損傷の発達と力学特性や圧縮ないし引張破壊の異方性にある⁴⁵⁾。換言すれば、局所的に発達した損傷部位に応力 - ひずみ曲線が影響を受ける。圧縮強度のみで損傷状況の評価することは、コンクリートの脆性化を十分に考慮していないことになる。したがって、コンクリートの損傷度評価では、圧縮強度に加えて、実験的に求めた応力 - ひずみ曲線の特性を評価する必要がある。本研究では、応力 - ひずみ曲線から算出できるひずみエネルギー（式 (2.2)）を求めること

により、コンクリートに生じる圧縮応力場がなした仕事(力×変位の内積)を評価した。加えて、応力 - ひずみ曲線の形状的特徴を表す損傷力学指標 λ (式 (2.9)) を求め、両指標から損傷評価を試みた。

ひずみエネルギーは、凍害コンクリートにおいて平均 4.1~21.3 J (Type A~Type C) だったのに対して、無損傷コンクリートでは平均 51.4 J であった。Type C は、無損傷コンクリートと圧縮強度がほぼ同一であったが、ひずみエネルギーの低下により無損傷コンクリートとの顕著な相違が明らかになった。Type A と Type B では、ひずみエネルギーの平均値が 4.1~19.5 J であり、ひずみエネルギーの観点からも損傷蓄積が明らかである。

損傷力学指標 λ は、初期接線弾性係数と割線弾性係数の相対比であり、コンクリートの標準的な応力 - ひずみ曲線の場合、 $\lambda=1.0$ となる。無損傷コンクリートでは平均 2.3 (1.1~4.6) となった。それに対して、Type C では平均 1.9 (1.6~2.2)、Type B : 3.1、Type A : 0.7 となった。無損傷コンクリートと比較して Type C は、ほぼ類似な評価値を得た。Type B では、評価値が上昇した。本指標は、応力 - ひずみ曲線の形状的特徴を評価するものであり、極度の損傷進行 (Type A) や微弱な未顕在化損傷 (Type C) の場合、損傷実態と評価値とがかけ離れたものと考えられる。

以上のことから、コンクリート中にひび割れ損傷が発達することで圧縮強度の低下に加えて、ひずみエネルギーが減少するものと推察される。ひずみエネルギーは、応力 - ひずみ曲線の最大応力と最大ひずみを評価式において考慮していることから、強度の低下にまでは至っていない既存施設において微細な損傷蓄積を評価できるものと推察され、損傷度評価指標として有効な物理量であると考えられる。

2) 圧縮応力場での AE 発生挙動とひずみ分布の関係

ここでは、提案する損傷度評価法の前提として、ひび割れ損傷の発達したコンクリート・コアから発生する AE を AE パラメータ (AE 発生挙動, 最大振幅値 (検出波のエネルギー指標)) と AE 発生源位置標定の観点から評価し、第 4 章の基礎的検討とする。

AE 発生挙動は、応力 - ひずみ挙動における各段階で検出された AE の総数を AE ヒットとして評価する。AE 発生源位置標定は、4 センサ以上で検出された AE の到達時間差と試験したコンクリート・コアの P 波速度から算出する。発生位置が同定された AE は AE イベントであり、本研究ではこれら AE ヒットと AE イベントの両面から圧縮載荷過程の AE 発生挙動を考察する。

AE は、材料破壊に起因する一次 AE とひび割れ損傷の発達に伴いひび割れどうしの擦れなどに起因する二次 AE に分類でき、既往研究によれば一次 AE と比較して二次 AE のエネルギー値が低い傾向にあることが報告されている⁴⁰⁾。図 3.3.19 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により求めたひずみ分布の合成画像である。検出した AE イベントを、最大振幅値を基準に 3 段階 (42~59 dB, 60~79 dB, 80~99 dB) に分類し、プロットサイズを変えて標記した。

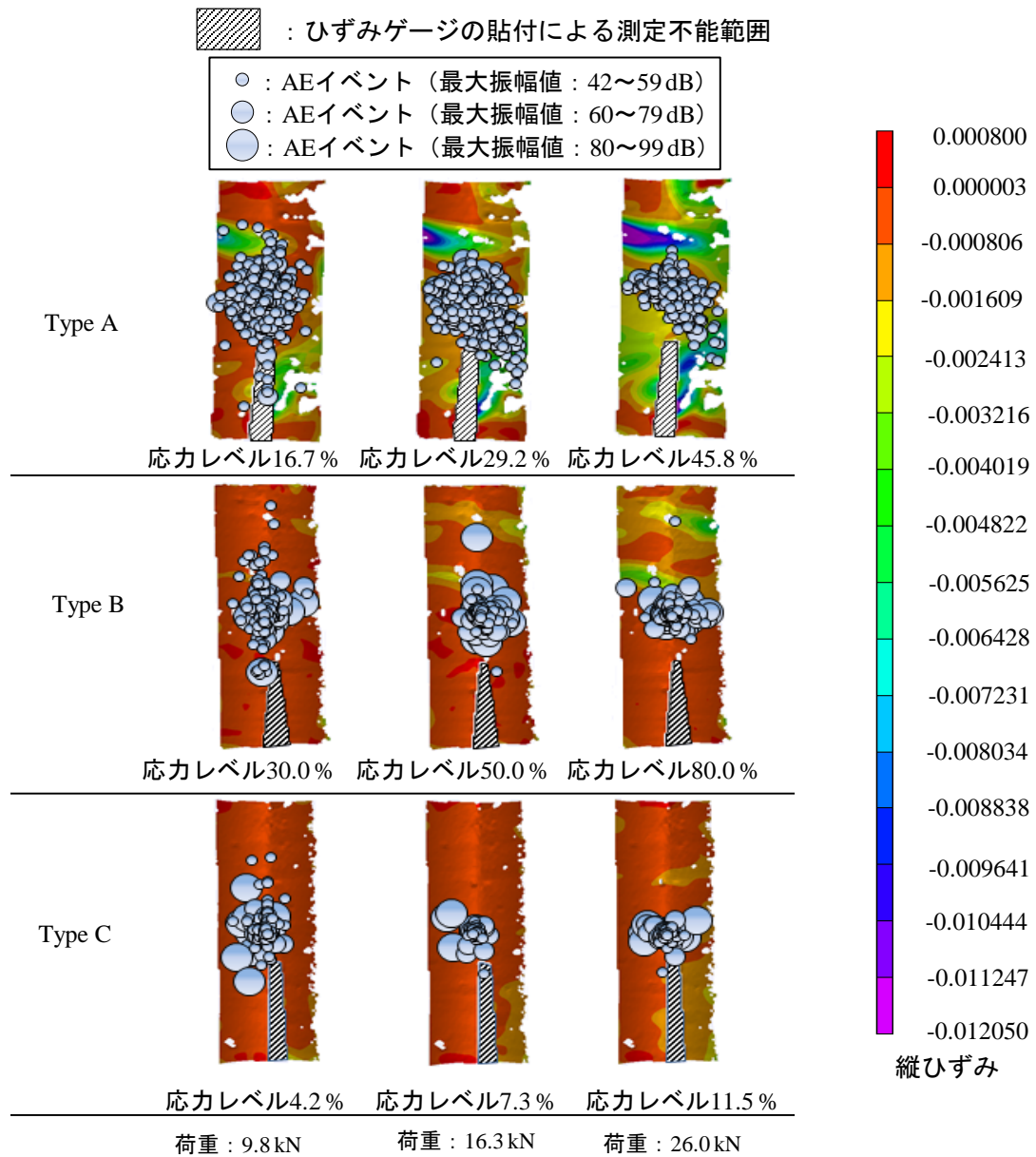


図 3.3.19 圧縮載荷過程の AE 発生源位置とひずみ分布の関係

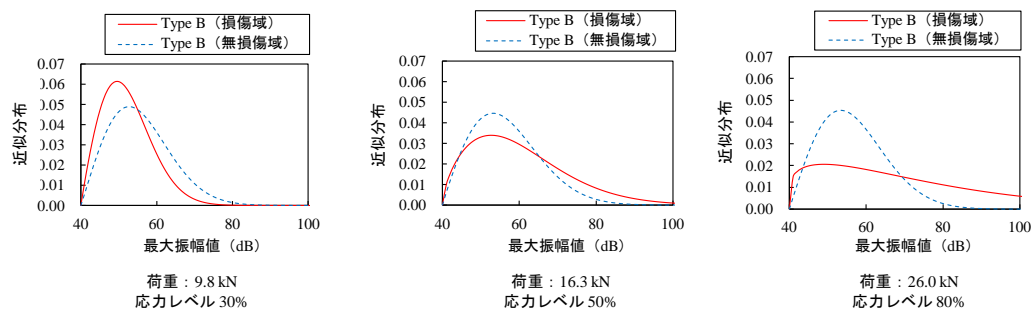


図 3.3.20 最大振幅値の分布特性（ワイブル解析，Type B）

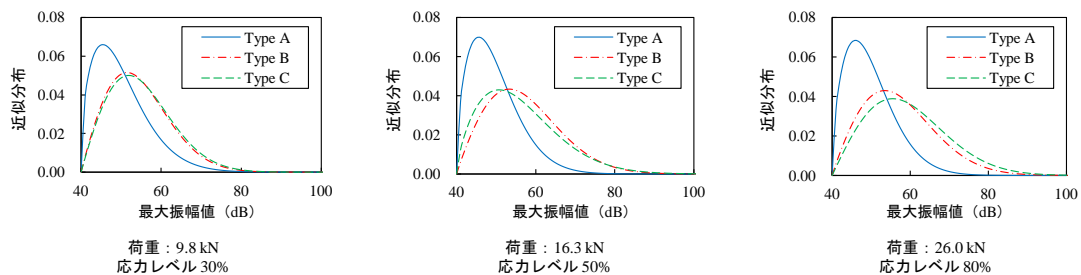


図 3.3.21 最大振幅値の分布特性（ワイブル解析，Type A～Type C）

検討の結果，Type A では比較的振幅値の小さい（42～59 dB）AE が高頻度に検出され，コア中央部と変形部分に集中していた．载荷過程の進行に伴い，AE はコア中央部に集中し，むしろひび割れが著しい部位で検出される AE が比較的少なかった．これは，一次 AE や二次 AE が発生しても気相部（ひび割れ損傷，空隙）で波動の伝播が妨げられたことから，载荷重の増加によりひび割れが進展し，AE 源の検出ができなかったためと考えられる．同様の試験結果は渡辺ら^{47), 48)}においても報告されている．

そこで，AE 発生源が明確な 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 3.3.20 は，Type B の場合，ひび割れ損傷を有する部位（Type B-1；Type B 上部）とそれ以外の無損傷部位（Type B-2；Type B 下部）において検出される AE の特性が異なることを示している．

図 3.3.21 は 3 タイプでの最大振幅値の分布特性の比較である．Type A では，いずれの荷重においても，分布形状は同様であり，約 45 dB に最大振幅値が偏在していた．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 はひび割れの擦れなどによる二次 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）に影響されたものと考えられる．Type A と Type B，Type C の間に明確な相違が確認されたことから，ひび割れ損傷の進行が圧縮载荷過程のひずみと AE パラメータの双方に影響を及ぼすと考えられる．

以上のことから，長期供用下にある既存施設のコンクリート材質を評価する場合，圧縮強度などの最大値だけではなく，圧縮载荷過程における変形挙動の空間的ばらつきや

AE パラメータから検討することが損傷度を詳細に評価する上で有効と考えられる。AE パラメータ解析の結果，AE の発生頻度に加えて，そのエネルギーレベルに対応する最大振幅値は有効な指標であると考えられる。

3) ひび割れ損傷に起因する局所変形のセミバリオグラム解析

局所的なひび割れ損傷が，圧縮載荷過程での AE へ影響することが示唆されたことから，ひずみ挙動について空間統計パラメータであるセミバリオグラム⁹⁾により，その特性を考察した。

本検討では，試験値のばらつきを試験点の空間分布によるものと仮定した。解析画像より抽出したひずみ量と試験点の座標データを用いて，セミバリオグラムにより局所化したひずみ分布を抽出した。以下にセミバリオグラムモデルを概説し，この検討結果を示す。

空間統計学では，データを確率場における実現値と見なし，領域 A 上の確率場 $Z(x)$ を考える。試験位置 x_1, x_2, \dots, x_n における確率変数 $Z(x_1), \dots, Z(x_n)$ を試験データとした場合，空間統計学を適用するには，以下に示す 2 つの仮定が成立する必要がある。

$$\textcircled{1} \quad E[Z(x)] = \mu$$

対象とする領域で変数の期待値が一定であること。

$$\textcircled{2} \quad E\{[Z(x) - Z(x+h)]^2\} = 2\gamma(h) < \infty$$

ベクトル h だけ離れた 2 点間の変数値の差の期待値は有限であり， h のみの関数である。 2γ がバリオグラム (variogram) であり， γ がセミバリオグラムである。ここでは，セミバリオグラムモデルを用いて検討を行う。セミバリオグラムを用いた空間構造評価は，環境管理や土壌物性値評価，鉱物資源評価など，時・空間的変動する物理量を定量的に評価する手法として用いられている。

空間統計学において物理量の空間依存性に関する解析には，一般的にセミバリオグラムが用いられる (図 3.3.22)。これは，横軸にラグ (lag, h : サンプル間隔)，縦軸にセミバリアンス (semi-variance, $\gamma(h)$) をとり，両者の関係を描いたものである。ラグ h の時のセミバリアンス $\gamma(h)$ は，距離 h だけ離れた全ての組み合わせ $N(h)$ の評価値間のばらつきの程度を表す。

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (3.1)$$

式 (3.1) より，直線上を等間隔に n 点試験を行い，地点 x_i, x_{i+h} での試験値がそれぞれ $Z(x_i), Z(x_{i+h})$ である場合には，式 (3.2) が得られる。

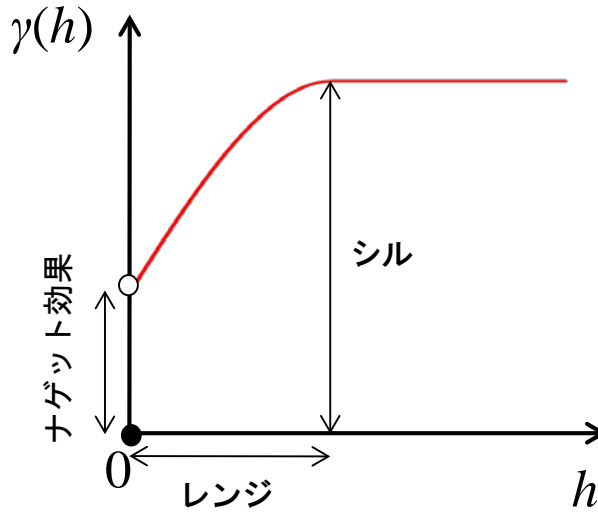


図 3. 3. 22 セミバリオグラム概念図

$$\gamma(h) = \frac{1}{2(n-h)} \sum_{i=1}^{n-h} [Z(x_i) - Z(x_{i+h})]^2 \quad (3.2)$$

本研究対象である X 線 CT 画像では、局所的な損傷や粗骨材などが空間的連続性に影響を及ぼすと考えられる。評価対象が均質な場合、セミバリオグラムは連続し、図 3. 3. 22 の形状となる。セミバリアンスは、ラグの増加に伴い上昇し、ある特定の距離で最大値に達する。この最大値をシル (sill) といい、データの内在的なばらつきを表す。シルに達する時のラグをレンジ (range) という。レンジは空間依存性の限界を表す。換言すると、データの内挿が可能な範囲を示すものである。ラグ 0 におけるセミバリアンスをナゲット (nugget) と呼び、実験誤差等の偶然のばらつきを示している。

各パラメータは、ラグとセミバリアンスの関係から最小 2 乗法による回帰分析により求められる。一般的には、球形モデル、指数モデルおよび直線モデル等が用いられている。本研究では、以下に示す指数モデルを用いる。

$$\gamma(h) = C_0 + C \left(1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right) \right) \quad (h > 0) \quad (3.3)$$

ここで、 C_0 : ナゲット、 $C_0 + C$: シル、 a : レンジである。

検討結果の代表例として Type B の損傷域 (Type B-1) と無損傷域 (Type B-2) のセミバリオグラムを図 3. 3. 23 に示す。損傷域は X 線 CT 画像と P 波速度の試験結果から、ひび割れの発達と P 波速度の低下が確認された領域とし、コア高さ 100~200 mm の領

域であった（図 3.3.17）。得られた画像データから格子状に解析点を設定した。解析間隔（ラグ）の最小値を縦 10 mm，横 9 mm とした。本モデルでは，ラグが小さい場合，セミバリオグラムモデルによる推定が不安定となる。逆にラグが大きい場合，空間構造の評価が困難となる。既往研究^リでは，組み合わせ数 $N(h)$ が 30 以上となるラグが目安として提案されていることから，本研究においても $N(h) \geq 30$ を基準とした。図 3.3.23 の左図は荷重 9.8 kN における解析結果である。Type B の損傷域と無損傷域を比較した結果，損傷域の $\gamma(h)$ の最大値（シル）は 6.2×10^{-8} ，無損傷域は 2.7×10^{-8} であり，損傷域は無損傷域の約 2.3 倍であった。荷重 16.3 kN における検討の結果，損傷域のシルは 2.2×10^{-7} ，無損傷域は 2.7×10^{-8} であり，損傷域は無損傷域の約 8.1 倍であった。荷重 26.0 kN では，損傷域 9.1×10^{-7} ，無損傷域 1.2×10^{-8} であり，損傷域は無損傷域の約 78.5 倍であった。いずれの荷重条件においても損傷域のシルは，無損傷域と比較して 2 倍以上の値が示された。シルとはひずみの内在的なばらつきを示すパラメータであることから，応力レベルの増加に伴い局所損傷の影響が顕在化したものと考えられる。圧縮載荷過程におけるコンクリートの変形挙動は，無損傷の場合，粗骨材とモルタルの界面において局所的に進行する。これに対して，ひび割れ損傷の進行したコンクリートの場合，変形はひび割れの界面で局所的に進展する。無損傷域におけるシルの増減は，粗骨材とモルタルの界面で発生した局所変形が影響したものであると考えられる。これに対して，損傷域におけるシルの増加にはひび割れ界面の局所変形が影響したものと考えられる。

Type B での局所変形をセミバリオグラムモデルで評価できることが明らかになったことから，ひび割れ密度の異なる Type A から Type C について比較検討した（図 3.3.24）。その結果，ひび割れ密度の高い Type A，Type B および Type C の順に $\gamma(h)$ が低下した。

図 3.3.25 より評価指標であるシル値を用いることにより，ひび割れ密度の異なるコンクリート・コアの変形挙動の特性を抽出できることが示唆された。シル以外の評価パラメータであるレンジおよびナゲットについては，Type A から Type C において明確な差異は認められず，ほぼ類似な評価値を示した。

以上のことから，ひび割れ損傷を有するコンクリートの圧縮載荷過程では，ひび割れの空間分布特性がひずみの局所化や AE 発生挙動へ影響する。セミバリオグラムによる検討は，ひずみ分布に関する特徴量を抽出する方法として有効であると推察される。

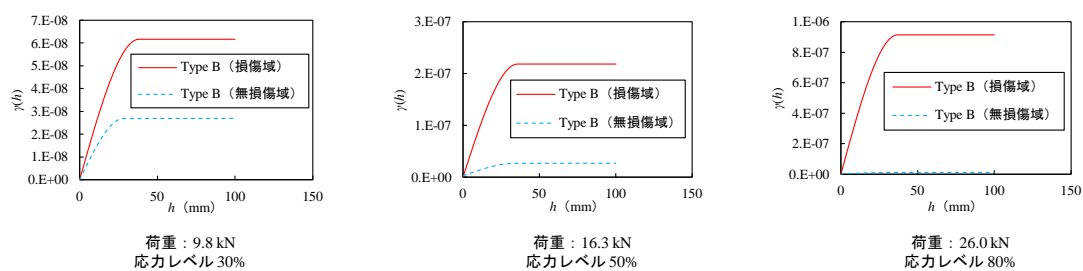


図 3.3.23 ひずみのセミバリオグラム (Type B)

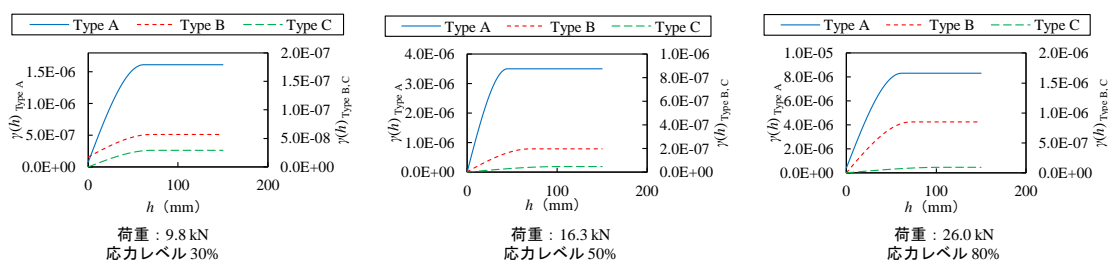


図 3.3.24 ひずみのセミバリオグラム (Type A～Type C)

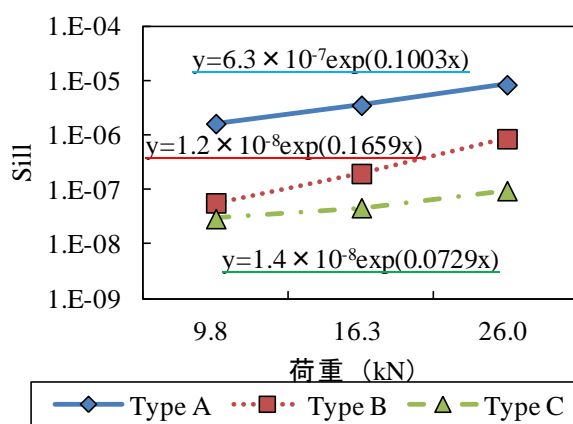


図 3.3.25 各荷重条件下のシル値の推移 (Type A～Type C)

3.4 ひび割れ損傷の発達が AE パラメータへ及ぼす影響評価

3.1 から 3.3 において、ひび割れ損傷の蓄積が圧縮強度などの力学特性や AE パラメータへ及ぼす影響を明らかにした。そこで本節では、最大振幅値の二乗値である AE エネルギーを算出し、無損傷コンクリートと凍害コンクリート (Type A~Type C) の AE エネルギー特性を比較し、損傷蓄積の影響を考察する。

3.4.1 損傷タイプを考慮した AE 発生挙動評価

図 3.4.1 に無損傷コンクリートと損傷コンクリート (Type A~Type C) の AE ヒット数の比較図を示す。図中の「0~200 μ 区間」は、ひずみ 0~200 μ の載荷初期に検出した累積 AE ヒットである。総 AE ヒットは、一連の圧縮強度試験で検出された AE ヒットの総数である。相対 AE ヒットは、総 AE ヒットに対するひずみ 0~200 μ 区間の累積 AE ヒットの割合である。図中の数値は平均値である。

検討の結果、損傷コンクリートでは、載荷初期において高頻度の AE ヒットが検出された。載荷初期における高 AE 発生頻度は、既往研究³⁹⁾の結果と合致する。無損傷コンクリートでは、相対 AE ヒットが 0.44 %で、損傷コンクリートの 6.4~27.1 %に比べてはるかに小さな値となった。このことから、無損傷コンクリートの特徴として、相対 AE ヒットが極めて小さな値となることを挙げることができる。

3.4.2 検出波のエネルギー指標を考慮した AE 発生挙動評価

そこで AE エネルギーの観点から AE 発生頻度との比較検討を試みる。図 3.4.2 に AE エネルギーに関する検討結果を示す。

総 AE エネルギーは、損傷実態により異なっていた。総 AE エネルギーの最も高い供試体は、ひび割れ損傷が顕在化していない Type C で、最も低い供試体は無損傷コンクリートであった。Type A と Type B は中間的挙動を示した。載荷初期における累積 AE エネルギー (0~200 μ) も総 AE エネルギーとほぼ同様の傾向で、特に無損傷コンクリートの初期 AE エネルギー放出率は 0.05 %で、著しく小さな値であった。

損傷コンクリートでは、圧縮載荷過程に発生する AE が低ひずみ状態 (0~200 μ) で比較的多く検出される。特に Type C において顕著な傾向が検出された。無損傷コンクリートでは、低ひずみ段階では AE は検出されず、載荷過程の進行に伴い終局時近傍で AE が頻発した。Type A と Type B では、Type C と無損傷コンクリートの中間的な傾向が見られた。AE 発生頻度と AE エネルギーにおいて、いずれも類似な傾向が見られたが、より顕著な傾向が AE エネルギーにおいて検出された。そこで、第 4 章では、AE エネルギーを評価指標としてコンクリート損傷度評価法の構築を試みる。

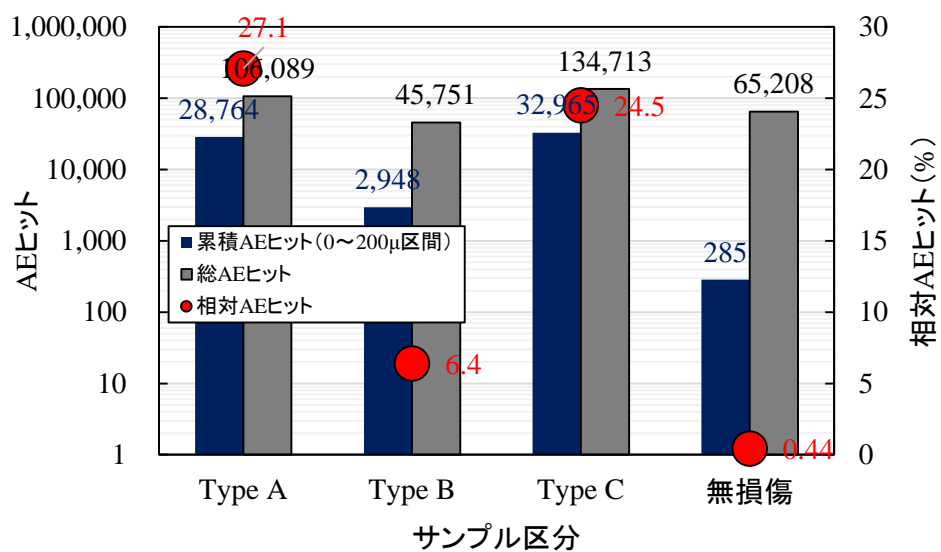


図 3. 4. 1 AE 発生頻度を指標とした無損傷コンクリートと損傷コンクリートの比較

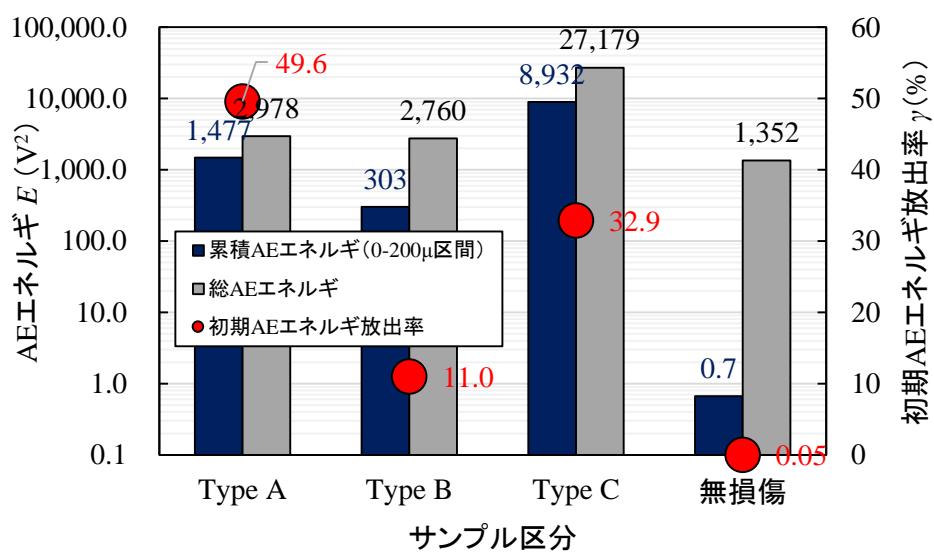


図 3. 4. 2 AE エネルギーを指標とした無損傷コンクリートと損傷コンクリートの比較

3.5 まとめ

第3章では、コンクリート中に発達したひび割れ損傷が力学特性と圧縮載荷過程における AE パラメータへ及ぼす影響を実証的に検討した。検討結果を以下に列挙する。

- (1) 本実証的検討で供試した凍害コンクリートは、北海道岩見沢市で採取した凍害損傷の顕在化したコンクリート製開水路側壁部（コンクリート・ブロック）で、壁高 2.3 m、幅 1.5 m である。壁面の変色から、底版より 1.7 m までの通水位が認められた。それ以上の範囲では、通水の影響は無く気中状態であった。本研究では前者を水中部と定義し、後者を気中部とした。透過法による超音波を用いた P 波速度試験の結果、水中部では 4,000 m/s 近傍のコンクリートの標準値に近い試験値が得られた。それに対して気中部では、P 波速度で 2,000 m/s を下回る計測値となった。弾性波トモグラフィ法により面的な速度分布を評価した結果でも、ひび割れ損傷の発達が懸念される気中部と気中部近傍の水中部において顕著な速度低下が検出された。これらのことから、農業水利施設の損傷は、環境条件やコンクリート材質に加えて、農業的水利用による影響が大きいことが判明した。
- (2) コンクリート・ブロックより採取したコア供試体に対し、X 線 CT 法による損傷の可視化と定量評価を試みた。気中部と水中部とでひび割れ損傷の形態的特徴が異なっていた。気中部より採取したコンクリート・コアでは、コア全層に層状ひび割れ損傷が発達していたが、水中部下部より採取したコンクリート・コアでは、ひび割れ損傷は見られなかった。気中部近傍の水中部より採取したコンクリート・コアでは、表層から 10 cm 程度の範囲にひび割れ損傷が発達し、それより深部の範囲ではひび割れは見られなかった。
- (3) 無損傷コンクリートの X 線 CT 特性は、コンクリート・コア全体の平均値で CT 値 2,000 以上であり、モルタル部と空隙部のみでは試験値 1,800 以下であった。凍害コンクリートでは、無損傷コンクリートと比較して、空隙特性の評価パラメータであるアスペクト比や真円度、空隙面積、空隙外周長、空隙率の評価値が上昇した。これは、ひび割れ損傷の進行が影響していたと考えられる。
- (4) 弾性波法により検出したコンクリート・ブロックとコア供試体の速度分布の特徴から、ひび割れ損傷の発達が弾性波速度の顕著な低下を引き起こすことが明らかになった。
- (5) 圧縮載荷過程に発生する AE を検出した結果、ひび割れ損傷を有するコンクリート・コアでは、載荷初期に AE パラメータである最大振幅値 42~59 dB の AE が卓越することが明らかになった。ひび割れが顕在化していない供試体では、

最大振幅値 42～59 dB の AE に加えて，载荷初期においても最大振幅値 80～99 dB の AE が検出され，AE 特性の相違が明らかになった．その際，画像解析によるひずみ分布を評価した結果，ひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアでは，ひび割れ部におけるひずみが著しく，AE 発生位置とも一致した．

- (6) 圧縮応力場で検出される AE パラメータからコンクリート損傷度評価を試みた．損傷コンクリートでは，低ひずみ状態 ($0\sim 200\ \mu$) から AE が検出され，载荷過程の進行により AE の検出頻度が増加した．その傾向は Type C において顕著であった．無損傷コンクリートでは，低ひずみ段階では AE は検出されず，载荷過程の進行に伴い終局時近傍で AE の頻発が検出された．一連の実験から AE の発生頻度やそのエネルギー特性はコンクリート損傷と深く関係し，特に $0\sim 200\ \mu$ 区間における AE 発生特性の相違はコンクリート損傷度評価法を構築するために有効な着目点になると考えられる．

参考文献

- 1) Hans Wackernagel 著 (青木謙治監訳) : 地球統計学, 森北出版株式会社, 2004.
- 2) 杉原直樹, 原田智和 : 全身用 X 線 CT 装置 Aateion TM デュアルスライスシステム, 東芝レビュー, 56 (5), pp. 60-63, 2001.
- 3) 天明敏行, 尾原祐三, 堤知明, 村上祐治 : X 線 CT 法による硬化コンクリートの特性評価, コンクリート工学年次論文集, 32 (1), pp. 545-550, 2010.
- 4) 麓隆行 : 新しい機構の X 線 CT の開発とポリマーコンクリートの圧縮試験への適用, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), 69 (2), pp. 182-191, 2013.
- 5) 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.
- 6) 鈴木哲也, 緒方英彦, 高田龍一, 佐藤周之 : 凍結融解損傷が進行したコンクリートの材質評価, セメント・コンクリート論文集, 63, pp. 204-211, 2009.
- 7) (社) 土木学会 : コンクリートの圧縮強度試験方法 (JIS A 1108:2006), 2007 年制定・コンクリート標準示方書 [規準編], pp. 427-429, 2007.
- 8) (社) 日本建築学会 : コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル, pp. 28-41, 1983.
- 9) Caliskan, S.: Use of Computed Tomography in Examining the Pore Structure of Concrete Corrosion and Void in Concrete, 11th International Conference Structural Faults+Repair-2006, CD-R, 2006.
- 10) 坂本陽一, 三木朋広, 二羽淳一 : 画像解析によるコンクリートの局所的圧縮破壊領域の同定, コンクリート工学年次論文集, 29 (3), pp. 43-48, 2007.
- 11) 渡辺健, 二羽淳一郎, 横田弘, 岩波光保 : 圧縮破壊を考慮したコンクリートの応力 - ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, No.725/V-58, pp. 197-211, 2003.
- 12) Sutton, M. A., Orteu, J. J. and Schreier, H. W.: Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements, Springer, pp. 81-118, 2009.
- 13) (社) 日本非破壊検査協会, 2.5.3 AE 信号の識別, アコースティック・エミッション試験 I, pp. 14-15, 2006.
- 14) (社) 日本非破壊検査協会, 4. AE 源位置標定, アコースティック・エミッション試験 II, pp. 36-41, 2008.
- 15) (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.
- 16) 緒方英彦, 高田龍一, 野中資博, 服部九二雄 : RC 開水路の凍害, 農業農村工学会誌,

76 (9), pp. 819-822, 2008.

- 17) 石神暁郎, 佐藤智, 周藤将司, 蒔苗英孝: 凍結融解を受けたコンクリートの吸水性と超音波伝播速度に及ぼす影響, セメント・コンクリート論文集, 67, pp. 413-420, 2014.
- 18) 石神暁郎, 佐藤智, 周藤将司, 緒方英彦: 農業水利施設のストックマネジメントの現状と今後 - 7 コンクリート開水路の凍害劣化の発生形態とその診断手法, 農業農村工学会誌, 83 (10), pp. 835-838, 2015.
- 19) 周藤将司, 緒方英彦, 兵頭正浩, 土居賢彦: コンクリート水利構造物を対象にした現地非破壊試験による一次共鳴振動数の測定方法に関する研究, 農業農村工学会論文集, 295, pp. 69-75, 2015.
- 20) 緒方英彦, 山崎大輔, 周藤将司, 兵頭正浩: シラン低圧注入によるコンクリートの微細ひび割れ検査法の現地実証試験, 農業農村工学会論文集, 295, pp. 85-90, 2015.
- 21) 久保元樹, 井上真澄, 佐藤智, 石神暁郎: 機械インピーダンス法を用いたコンクリート開水路の凍害診断手法の検討, コンクリート工学年次論文集, 36, No. 1345, 2014.
- 22) 石神暁郎, 蒔苗英孝, 石岡浩一, 佐藤智: コンクリート開水路の断面修復における凍害ひび割れ発生範囲の特定に関する検討, コンクリート工学年次論文集, 36 (1), pp. 1030-1035, 2014.
- 23) 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.
- 24) 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.
- 25) 鈴木哲也, 奥津広太, 青木正雄, 大津政康: コンクリート損傷度評価へ及ぼす空隙特性の影響に関する研究, コンクリート工学協会年次論文集, 31, pp. 2089-2094, 2009.
- 26) Suzuki, T., Ogata, H., Takada, R., Aoki, M. and Ohtsu, M.: Acoustic Emission and X-Ray Computed Tomography Testing for Damage Evaluation in Freeze-Thawed Concrete, the 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, 2009.
- 27) 奥津広太, 鈴木哲也, 青木正雄: X 線 CT 法を用いた損傷コンクリートのひび割れ分布特性評価, 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, 10, pp. 123-128, 2010.
- 28) 鈴木哲也: X 線 CT 法に基づくひび割れの進展したコンクリートの特性評価に関する研究, コンクリート構造物の非破壊検査論文集, 4, pp. 283-288, 2012.
- 29) 山岸俊太郎, 鈴木哲也, 大津政康, 森井俊広, 河合隆行: 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, 13, pp. 41-48, 2013.
- 30) 山岸俊太郎, 鈴木哲也, 森井俊広: X 線 CT 画像を用いたコンクリート内部のひび割れ特性評価, コンクリート工学年次論文集, 37 (1), pp. 1795-1800, 2015.

- 31) 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.
- 32) (社) 日本コンクリート工学協会：4.2 凍害メカニズム，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，pp. 66-73，2008.
- 33) (社) 日本コンクリート工学協会：4.3 凍害劣化の評価，コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関する研究委員会報告書，pp. 75-87，2008.
- 34) 日本工業規格：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 (JIS A 1127：2010)，2010.
- 35) (社) 土木学会コンクリート委員会：第 2 部 弾性波動理論に基づいた既存の規格・基準の問題点の抽出と改善策の検討，コンクリート技術シリーズ No. 73・弾性波法の非破壊検査研究小委員会報告書，pp. 31-37，2007.
- 36) (社) 日本コンクリート工学会：第 1 編 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 8. 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，pp. 47-54，2015.
- 37) 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.
- 38) 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.
- 39) 鈴木哲也，池田幸史，米野現樹，大津政康：コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究，土木学会論文集，809/V-70，pp. 95-106，2006.
- 40) 川嶋紘一郎：6.2.2 超音波ビーム，超音波非破壊材料評価・検査，養賢堂，pp. 62-66，2009.
- 41) 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.
- 42) Suzuki, T. and Ohtsu, M.: On-Site Damage Evaluation by AE and CT in Concrete, *Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures - State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 239-MCM-*, pp. 157-171, 2016.
- 43) 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.
- 44) 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.
- 45) 村上澄男：10.1.2 コンクリートの損傷挙動，連続体損傷力学，森北出版株式会社，pp. 248-250，2008.

- 46) (社)日本非破壊検査協会, 2.5.3 AE 信号の識別, アコースティック・エミッション試験 I, pp. 55-61, 2006.
- 47) 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.
- 48) 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.

第4章 AE を用いたコンクリート損傷度評価法の開発

4.1 概説

第3章では、無損傷コンクリートと凍害によりひび割れ損傷の進行したコンクリートを用いて、X線CTによる材料内部の詳細評価に基づく損傷蓄積とコンクリート物性、AEパラメータとの関連を明らかにした。圧縮載荷過程で検出されるAEは損傷蓄積により変質し、無損傷コンクリートと比較してひずみ0~200 μ 区間におけるAEの頻発が見られた。その際、ひび割れ損傷が顕在化したものと比較して未顕在化損傷コンクリートにおいて、その傾向が顕著であることが明らかになった。そこで第4章では、第3章での検討結果を踏まえて、圧縮載荷過程のAEエネルギー指標に着目し、コンクリート損傷度評価法の構築を試みる。

AE法により検出した弾性波のエネルギーを評価するため、本研究では検出波の最大振幅値の二乗値をAEエネルギーとして用いる¹⁾。著者は、既往研究においてAEパラメータの中でもAE発生頻度に着目し、横堀²⁾により提案された破壊の確率過程論(レート・プロセス論)に基づく解析的検討から評価指標(β (式(4.5)))を提案した³⁾。実験的検討の結果、評価指標 β がコンクリートのひび割れ発達と密接に関連していることを明らかにした。その際、AE発生頻度は、検出されたAEの規模によらず、その発生数にのみ着目した評価指標であるため、破壊挙動を十分に説明できないことが判明した。そこで、本研究では、より詳細に圧縮破壊過程を評価するため、検出波規模に着目し、その指標であるAEエネルギーを用いた損傷度評価を試みる。AEエネルギーを用いる利点は、AE発生頻度と比較してコンクリート・コアの主破壊点を高精度に同定できることにある。

そこで、本研究では4.2において提案手法の特徴と着目点を概説した後に、構築する損傷度評価法について詳述する。4.3と4.4では、無損傷コンクリートと凍害コンクリートを用いてひび割れ損傷の蓄積とAEとの関係を検討する。その際、圧縮強度と損傷力学指標 λ ⁴⁾、ひずみエネルギーとの関係も検討する。4.5では以上の検討結果を踏まえて、圧縮強度と圧縮載荷過程に発生するAEエネルギーの重心点におけるひずみエネルギー U_{cog} (重心ひずみエネルギー, cog: center of gravity)を提案し、これより定性的な損傷度の評価(損傷, 中間的損傷, 無損傷)を試みる。更に、初期AEエネルギー放出率 γ を定義し、本指標と損傷度との関係を調べる。4.6は以上のまとめとする。

4.2 AE パラメータを用いた損傷度評価指標の構築

4.2.1 コンクリート損傷度評価法構築の着眼点

(1) 開発指標の特徴と着眼点

圧縮強度試験は、コンクリートの力学特性を評価する際の最も一般的な試験方法であり、農業水利施設の機能診断においても、圧縮強度が劣化ないし損傷実態評価の指標値として用いられている⁵⁾。しかし、圧縮強度は応力 - ひずみ曲線の最大応力であり、圧縮強度のみで微細な損傷蓄積やそれに伴う低ひずみ状態での脆性破壊を十分に評価することはできない。本研究の開発手法は、AE 計測を圧縮強度試験に導入することにより、圧縮破壊過程で発生する弾性波から詳細な損傷状況の評価を試みるものである。既往研究では、1.4.1 および 1.4.2 で詳述した通り AE 発生頻度に着目した検討が数多く試みられている。AE 発生頻度では一連の载荷過程における AE の発生と応力ないしひずみとの関係が議論できるのみであり、検出した AE の質的評価は十分に行えない。

開発指標の着眼点は、圧縮载荷過程で発生する損傷の影響を受けた微小破壊起源の AE を検出し、そのエネルギー特性から損傷実態を評価することにある。载荷過程での AE エネルギーを連続的に評価することにより、エネルギー放出の重心点として圧縮破壊の主破壊点が推定可能になる。本研究では、主破壊点までのひずみエネルギーを重心ひずみエネルギーとして評価し、圧縮強度と重心ひずみエネルギーによるコンクリートの定性的損傷度評価指標を提案する。

(2) AE エネルギー指標による損傷度評価精度の改善とその意義

AE 現象の時間頻度に関する情報は、種々の材料や構造物の特性を調査診断する際に重要な評価指標となるが、発生頻度に加えて検出波のエネルギーを考慮することにより AE 発生規模の評価ができる⁶⁾。検出された AE の特性は、開放されるエネルギー量により、圧縮破壊過程を詳細に評価できる。渡辺ら⁷⁾の既往研究では、角柱供試体を用いて AE 法による圧縮破壊領域とそれ以外の部位の抽出が実験的に試みられている。検出された AE の特徴量は、最大振幅値や AE エネルギーにより評価されるとともに、複数の AE センサを評価対象に設置することで AE 源位置標定による破壊位置の同定が試みられ、AE パラメータによる圧縮破壊領域の同定精度の向上が認められている。本研究では、損傷度評価への AE エネルギー指標の導入を前提として、ひび割れ損傷が発達したコンクリート・コアの圧縮载荷過程における AE 発生源位置標定と検出波の最大振幅値分布を 3.3.3 (4) において比較し、損傷進行に伴う特徴量の抽出を試みている⁸⁾。検討の結果、損傷進行に伴って低振幅 AE の検出頻度が増加し、AE エネルギーにより圧縮载荷過程の特徴量が抽出可能であることが示唆された。AE エネルギー指標を用いることによりコンクリート損傷度評価法の精度改善が期待できるものと考えられる。一般的

に破壊過程の AE を用いた解析的検討では、検出波の立ち上がり時間の差異から求められる破壊源位置標定に加えて、SiGMA コードに代表される運動解析⁹⁾が行われ、応力場における具体的な破壊挙動が議論される。本研究で対象とするコンクリート・コアでは、センサ間距離が短く、AE 発生に供試体形状やその大きさが顕著に影響していることが明らかになっていることから¹⁰⁾、検出波の AE パラメータ解析のみを実施する。

以上のことから、コンクリートの圧縮載荷過程で発生する AE エネルギーを指標に、その特性から損傷度を評価することは既往研究からも十分に技術開発可能であると推察される。残された技術的課題は、コンクリート内部に蓄積された損傷実態と AE エネルギーとの関連を明確にするとともに、損傷度評価指標の設計計画への適用を考慮する必要があると考えられる。本研究では、損傷実態と AE 計測結果との関連を 4.5 において詳述し、損傷度評価指標の設計計画への適用について、損傷蓄積とコンクリート物性（動弾性係数）、AE エネルギーの観点から 4.6 において詳述する。

4.2.2 圧縮載荷過程の AE を指標とした損傷度評価法の構築

(1) AE エネルギーを用いた圧縮載荷過程の主破壊点推定

開発手法によるコンクリート損傷度評価は、コンクリート・コアを用いた実験的検討により応力 - ひずみ曲線と AE データを取得する（図 4.2.1）。AE データから、検出波のエネルギー特性を式 (4.1) に示す AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみ ε の関係により評価し、圧縮載荷過程における主破壊点を推定する。

$$f_e(\varepsilon)\Delta\varepsilon = \frac{\Delta E_{AE}(\varepsilon)}{E_{AE}} \quad (4.1)$$

ここで、 $\Delta E_{AE}(\varepsilon)$ ：単位ひずみ（本研究では 20μ ）において発生した AE エネルギー、 E_{AE} ：一連の圧縮載荷過程で発生する総 AE エネルギーである。本研究では AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ の累計値を累積 AE エネルギー発生割合と定義し、式 (4.2) により評価する。

$$F_e(\varepsilon) = \sum_0^{\varepsilon_{\max}} \frac{\Delta E_{AE}(\varepsilon)}{E_{AE}} \quad (4.2)$$

一連の圧縮載荷過程における AE エネルギー放出特性は、3.4 での検討結果を踏まえて、総 AE エネルギーとひずみ $0 \sim 200\mu$ 区間に発生する累積 AE エネルギーの割合である初期 AE エネルギー放出率 γ により評価する。

$$\gamma = \frac{E_{AE0 \sim 200\mu}}{E_{AE}} \times 100 \quad (4.3)$$

ここで、 $E_{AE0 \sim 200\mu}$ ：ひずみ $0 \sim 200\mu$ 区間に発生する累積 AE エネルギー、 E_{AE} ：一連の圧縮

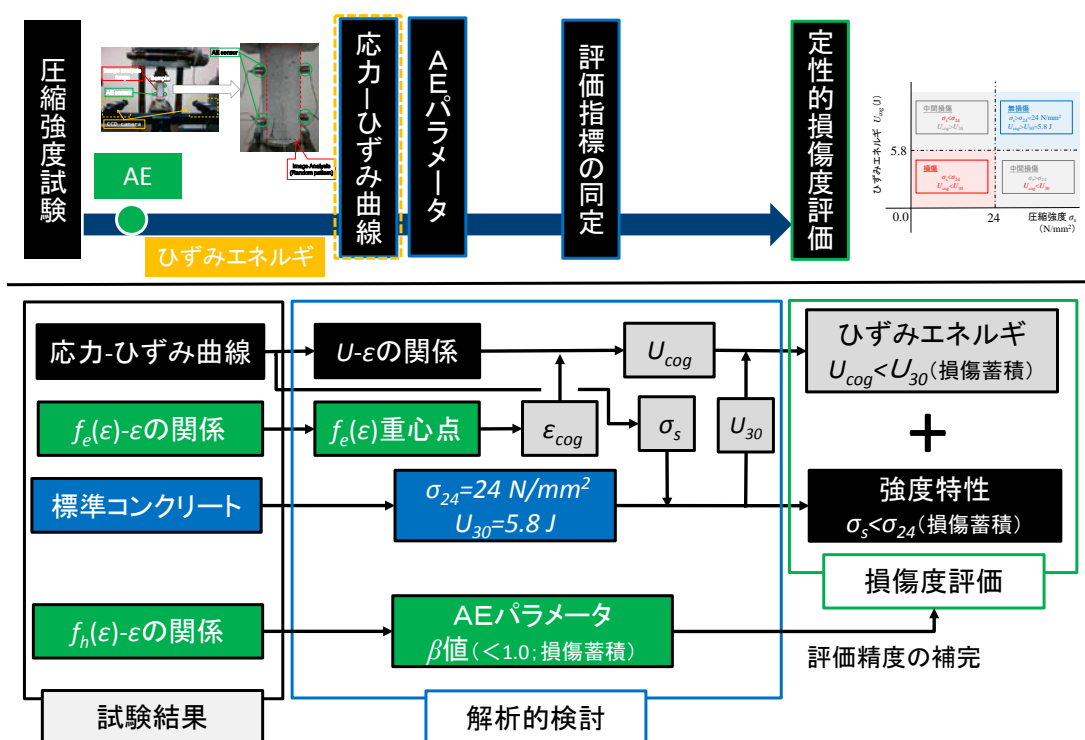


図 4. 2. 1 開発手法によるコンクリート損傷度評価の流れ

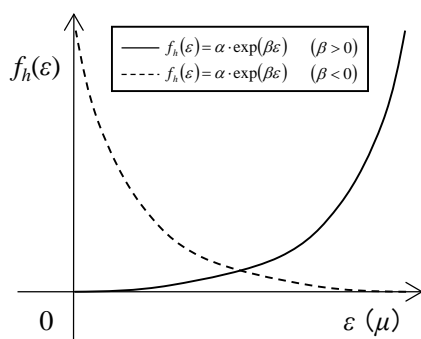


図 4. 2. 2 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ と β の関係

載荷過程で発生する総 AE エネルギーである。

既往研究では，AE 発生頻度を発生頻度割合で評価した式 (4.4) を定義している³⁾。

$$f_h(\varepsilon)\Delta\varepsilon = \frac{\Delta N(\varepsilon)}{N} \quad (4.4)$$

ここで， ΔN は単位ひずみにおける AE ヒット数， N は総 AE ヒット数である。本研究では，式 (4.4) の AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ を，図 4. 2. 2 に示す $f_h(\varepsilon)$ とひずみ ε の関係を以下の指数関数と仮定し，定数である β を指標に AE 発生頻度の観点からもコンクリート損傷を評価する。

$$f_h(\varepsilon) = \alpha \cdot \exp(\beta \varepsilon) \quad (4.5)$$

なお、 α と β は定数である。式(4.5)に示すコンクリート損傷度評価指標 β は一連の圧縮載荷過程に発生するAEの傾向を反映し、 β の正負によりAEの発生傾向が異なるモデルになっている。 $\beta > 0.0$ が正ならば、低ひずみレベルの段階でAE発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ が低いことを意味し、コンクリートが無損傷状態であることが評価できる。 β が負ならば、ひずみレベルの低い段階でAE発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ が高いことを意味し、損傷が進行した状態であると評価することができる。

各種応力場における主破壊に至る一連の過程では、微細ひび割れの発生から終局近傍におけるひび割れ連結、加速度的なひび割れ発生が各種材料に共通して確認できる。その際、ひび割れの発生・発達に伴いエネルギー規模の異なるAEが発生する。AE発生頻度に着目した既往研究では、一連の載荷過程においてAEが検出されること自体を蓄積された損傷の特性を反映したエネルギー放出と考え、AE発生頻度と各種物性値との関連を考察している^{3), 11)}。地震や材料破壊に起因する弾性波動は、主破壊に代表される規模の大きな現象は数少なく発生し、小さな現象は数多く発生することが明らかにされている(Gutenberg-Richter式)^{12)~14)}。検出波のAEエネルギーを考慮することにより、AE発生頻度において十分に考慮されていない検出波の1波あたりのエネルギーレベルを反映した損傷度評価が可能になる。本研究では、式(4.1)に示すAEエネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみ ε との関係における重心位置のひずみを重心ひずみ ε_{cog} と定義し、式(4.6)により評価した。なお、本研究では、標準的なコンクリートの圧縮応力場における最大ひずみ $2,000\mu$ を100分割した 20μ を単位ひずみとして評価した。

$$\varepsilon_{cog} = \frac{\sum_0^{\infty} \varepsilon f_e(\varepsilon) d\varepsilon}{\sum_0^{\infty} f_e(\varepsilon) d\varepsilon} \quad (4.6)$$

AEエネルギーの重心位置 ε_{cog} は、一連の載荷過程における圧縮破壊挙動の主要な破壊点(主破壊点)と考えることができる。損傷が進行したコンクリートでは、この ε_{cog} の値が小さくなる。

本研究では、ひずみエネルギー概念(式(2.2))を導入し、圧縮強度以外のもう一つの指標を提案する。重心ひずみ ε_{cog} により、ひずみエネルギー(重心ひずみエネルギー U_{cog} (式(4.7))を評価した。重心ひずみエネルギーは、供試体が主破壊点までになされた仕事をひずみエネルギー概念から評価した指標値である。

$$U_{cog} = \frac{E \varepsilon_{cog}^2}{2} \cdot A l \quad (4.7)$$

ここで、 A : 試料の断面積、 l : 試料高、 E : 弾性係数である。重心ひずみエネルギー同定までの一連の流れを図4.2.3に示す。

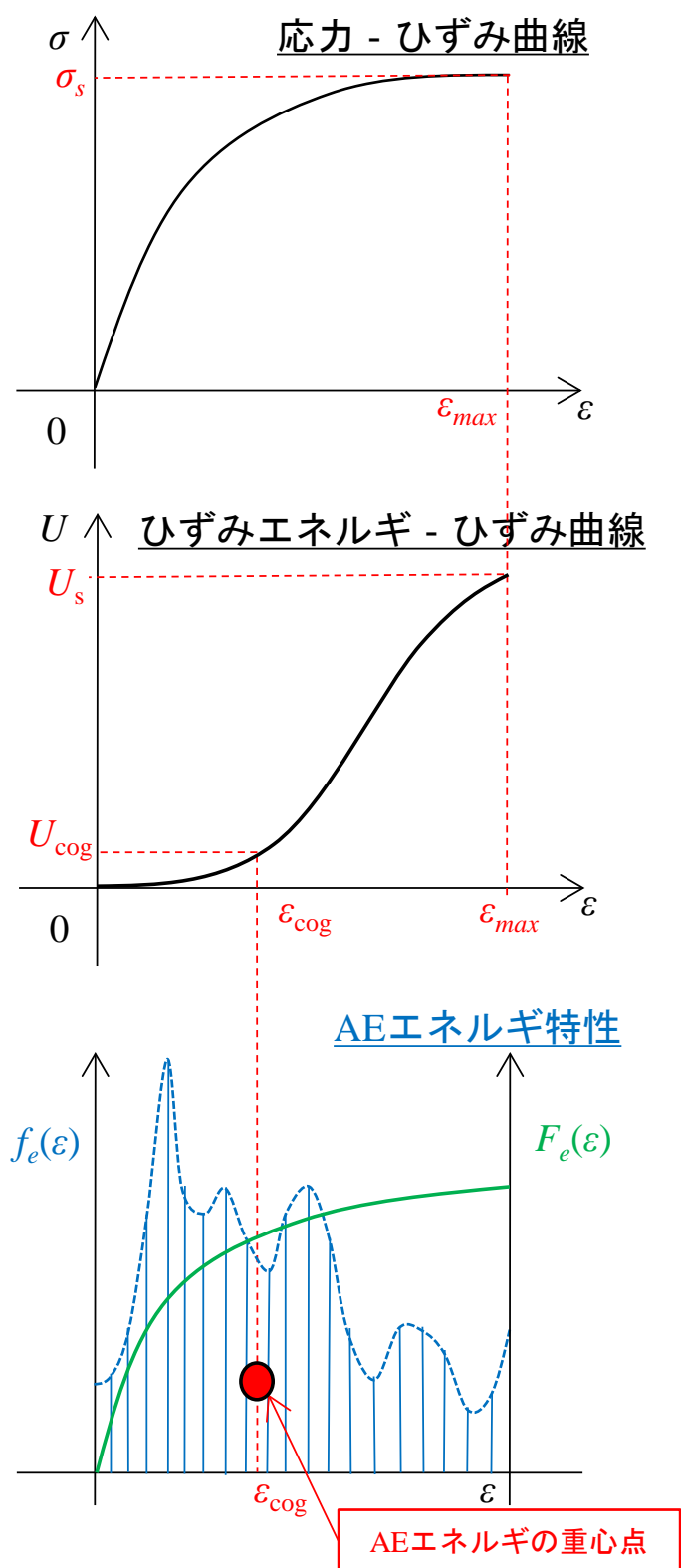


図 4.2.3 AE による重心ひずみエネルギー U_{cog} 同定までの一連の流れ

表 4.2.1 コンクリート損傷度評価に用いる力学指標一覧

評価指標	記号 (単位)	算出方法	備考
圧縮強度	σ_s (N/mm ²)	応力 - ひずみ曲線より算出	
ひずみエネルギー	U_s (J)	応力 - ひずみ曲線より算出	式 (2.2)
重心ひずみエネルギー	U_{cog} (J)	$f_e(\varepsilon)$ - ε から ε_{cog} を評価し、 U - ε における ε_{cog} 点の U_{cog} を評価	本研究で定義 図 4.2.3, 式 (4.7)
動弾性係数	E_d (GPa)	P 波速度より算出	式 (2.16)
損傷力学指標 (相対弾性係数)	λ (-)	応力 - ひずみ曲線より算出	図 2.2.4, 式 (2.9) 参考値

表 4.2.2 コンクリート損傷度評価に用いる AE 指標一覧

評価指標	記号 (単位)	算出方法	備考
AE 発生頻度割合	$f_h(\varepsilon)$ (-)	AE ヒット数を 20 μ 間隔で処理	式 (4.4)
AE エネルギー発生割合	$f_e(\varepsilon)$ (-)	AE エネルギー強度を 20 μ 間隔で処理	図 4.2.3, 式 (4.1)
AE 損傷指標	β (-)	$f_h(\varepsilon)$ - ε を指数関数近似	図 4.2.2, 式 (4.5)
初期 AE エネルギー放出率	γ (%)	累積 AE エネルギーと 0~200 μ 区間に 検出された AE エネルギーの累積値の 割合	式 (4.3)

提案手法では、検出した AE データから AE エネルギーを算出する。ひずみ ε の時の AE エネルギー発生量から式 (4.1) に示す AE エネルギー発生割合を求める。式 (4.6) より重心ひずみ ε_{cog} を求める。応力 - ひずみ曲線からは、ひずみエネルギー $U(\varepsilon)$ を求め、 $U(\varepsilon)$ - ε の関係から ε_{cog} の $U(\varepsilon_{cog})$ を求める。重心ひずみエネルギー U_{cog} は、4.2.2 (2) において定義する $\sigma_s=24$ N/mm², $\varepsilon_{max}=2,000$ μ であるコンクリート(本研究では標準コンクリートと記す)における遷移帯において微細ひび割れが発生すると考えられている応力レベル 30 % のひずみエネルギー U_{30} (=5.7 J) と比較して損傷蓄積を評価する ($U_{cog} < U_{30}$: 損傷蓄積)。これは、標準コンクリートよりも低载荷段階で主破壊が発生する状態を「損傷蓄積」と評価するものである。

損傷が進行したコンクリートの応力 - ひずみ曲線は、強度低下に加えて、脆性化に伴う最大ひずみの低下が見られることから、ひずみエネルギーを評価することにより応力とひずみの両指標を考慮することができる。加えて、AE エネルギーの重心点から主破壊点を推定することが可能となる。重心ひずみエネルギーは圧縮強度とは別の評価軸を提供するもので、これら 2 軸によって損傷状態をより包括的に評価することが可能となる。その際、AE 発生頻度の評価指標である β は第 3 軸 (参考データ) として活用できる。損傷度評価に用いる指標を表 4.2.1 および表 4.2.2 に示す。

(2) 標準コンクリートの設定

損傷度評価を試みる前提として、損傷を有していない標準的なコンクリートの力学特性を考察する。なお、本研究では研究対象を農業水利施設に限定していることから、鉄筋コンクリート構造の農業水利施設に求められる力学特性に関する標準値について整理する。一般的に農業水利施設の設計施工には、(社)農業農村工学会が発行している「土地改良事業計画設計基準及び運用・解説」(以下、基準書と記す)で規定されている要求性能が採用されている。既存施設の更新事業においても同様であり、建設年代により基準書は異なるが、施設性能の評価・診断には現状の基準書に基づく議論が行われている。主な農業水利施設には、頭首工、開渠工、管水路(パイプライン)およびダム等がある。水路構造物に関するコンクリートの基準強度¹⁵⁾を表4.2.3に示す。

本研究では、コンクリート損傷度評価の前提として、既存施設に求められる要求性能としての標準的なコンクリート力学特性を基準書から設定し、定性的損傷度評価の閾値とする(4.2.2 (3))。着目する力学特性は圧縮強度とする。標準コンクリートを損傷度

表 4.2.3 農業水利施設に求められるコンクリート強度

(参照：土地改良事業計画設計基準及び運用・解説)

基準書	28 日設計基準強度	対象構造物
水路工 ¹⁵⁾	18 N/mm ² ：無筋コンクリート	無筋コンクリート
	21 N/mm ² ：鉄筋コンクリート	水路構造物
	24 N/mm ² ：鉄筋コンクリート	耐久性を要する場合

表 4.2.4 標準コンクリート設定

対象構造物	基準強度 σ_{24} (N/mm ²)	最大ひずみ ε_{\max} (μ)	ひずみ エネルギー U_{100} (J)	応力レベル 30%で のひずみエネルギー U_{30} (J)	λ
農業水利施設	24	2,000	37.7	5.8	1.0

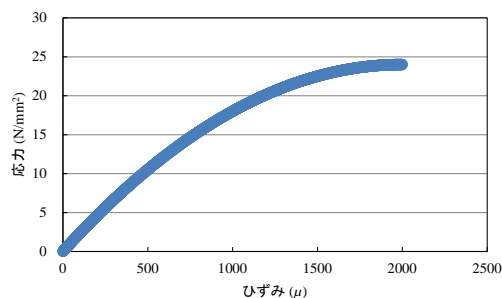


図 4.2.4 標準コンクリートの応力 - ひずみ曲線

評価に考慮することにより，既存施設の損傷度を基準値との比較により明確にできるものと推察される．

設定した標準コンクリートの力学特性を表 4.2.4 に示す．本研究の基準強度 σ_{24} は，耐久性を必要とする農業水利施設に必要な 24 N/mm^2 とし，その際の応力 - ひずみ曲線における最大ひずみ ε_{\max} を $2,000 \mu$ ¹⁶⁾ とした．ひずみエネルギーは，円柱供試体の圧縮破壊を基礎としていることから直径 $\phi 100 \text{ mm}$ ，高さ $H 200 \text{ mm}$ のコンクリート・コアを基準に評価した．ひずみエネルギーは最大応力時の U_{100} と遷移帯においてひび割れが発生する応力レベル 30% の U_{30} を設定した．その際，図 2.2.3 に示す応力 - ひずみ挙動¹⁶⁾を前提とする応力 - ひずみ曲線（図 4.2.4）を仮定し，ひずみエネルギーを算出した．後述する定性的損傷度評価では，閾値として標準コンクリートの基準強度と応力レベル 30 % におけるひずみエネルギーを用いた．

(3) 定性的損傷度評価指標とその閾値

実験的に求めた損傷度評価指標は，表 4.2.4 に示す標準コンクリートの基準値との比較により，「無損傷」，「中間的損傷_A」，「中間的損傷_B」および「損傷」に分類し，定性的損傷度評価を試みる．表 4.2.5 に定性的損傷度評価項目とその概要を示す．閾値は，標準コンクリートの基準強度 24 N/mm^2 と応力レベル 30 % におけるひずみエネルギー 5.8 J を採用した（図 4.2.5）．

損傷度評価区分は，圧縮強度と重心ひずみエネルギーの評価値により分類される．コンクリート内部に損傷蓄積が進行した場合，低ひずみ段階で主破壊が生じ，低ひずみエネルギーでの圧縮破壊が進行する．その際，脆性材料であるコンクリートの特徴は，損傷発達とその力学的効果にあり，局所ひずみの進行に伴い破壊挙動が変質する¹⁸⁾．重心ひずみエネルギーの評価に AE 計測結果を反映することは，応力 - ひずみ曲線のみでは十分に検出できない，局所ひずみの発達に伴う破壊挙動を AE エネルギー放出の観点から明らかにし，評価指標として用いていることにある．

定性的損傷度評価では，「損傷」はいずれの指標値も閾値を下回るものである．「無損傷」は，指標値が閾値をいずれも上回るものである．中間的損傷は，いずれかの評価指標が閾値を下回るものである．中間的損傷_A は圧縮強度が 24 N/mm^2 を下回り，中間的損傷_B は重心ひずみエネルギーが 5.8 J を下回るものである．中間的損傷_A と比較して中間的損傷_B は，低ひずみ段階で AE エネルギーの放出が検出されることから，損傷が進行していると考えられる．これらのことから，定性的損傷度評価区分における損傷蓄積は，損傷 > 中間的損傷_B > 中間的損傷_A > 無損傷の順になる．

表 4.2.5 損傷度評価区分とその閾値

損 傷 度 評価区分	圧縮強度 σ_s (N/mm ²)	重心ひずみエネルギー U_{cog} (J)	概要
無損傷	$\sigma_s \geq 24$ N/mm ²	$U_{cog} \geq U_{30}$	圧縮強度, AE 指標ともに標準値以上
中間的損傷_A	$\sigma_s < 24$ N/mm ²	$U_{cog} \geq U_{30}$	AE 指標のみ標準値以上
中間的損傷_B	$\sigma_s \geq 24$ N/mm ²	$U_{cog} < U_{30}$	圧縮強度のみ標準値以上
損傷	$\sigma_s < 24$ N/mm ²	$U_{cog} < U_{30}$	両指標とも標準値未満

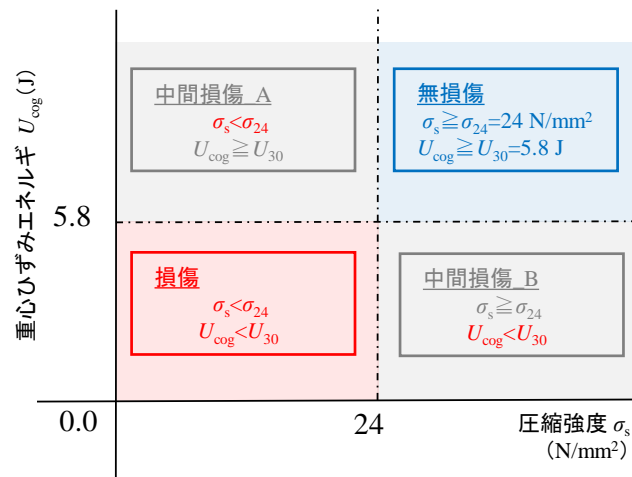


図 4.2.5 定性的損傷度評価

4.3 無損傷コンクリートの圧縮載荷過程の AE 発生特性

本節では、コンクリート損傷度評価法を構築する前提として、第3章において検討した無損傷コンクリートを用いて圧縮載荷過程の AE パラメータの特徴を考察する。

4.3.1 応力 - ひずみ挙動とひずみエネルギーの関係

本項では、コンクリート損傷度評価に用いる圧縮強度、ひずみエネルギーおよび損傷力学指標 λ の関係について詳説する。

無損傷コンクリートの力学特性は、圧縮強度が平均 28.4 N/mm^2 ($26.4 \sim 30.8 \text{ N/mm}^2$, サンプルサイズ $n=3$) であり、標準コンクリートの基準値である 24 N/mm^2 の 1.18 倍を記録した。ひずみエネルギーは平均 51.4 J ($29.0 \sim 72.3 \text{ J}$) であり、標準コンクリートのひずみエネルギーである 37.7 J の 1.36 倍 ($0.77 \sim 1.92$) になった。損傷力学指標 λ は平均 2.3 ($1.1 \sim 4.6$) であった。

これらの物性値を図 4.2.5 に示す定性的損傷度評価指標に適用した結果、無損傷コンクリートはいずれも無損傷区分に判定された。

4.3.2 AE パラメータを用いた圧縮破壊特性の抽出

このような力学特性を有する無損傷コンクリートの AE 特性を AE エネルギーの観点から概観する。

無損傷コンクリートの AE 発生挙動は、ひずみ $0 \sim 200 \mu$ 区間における載荷初期において $2 \sim 681$ ヒットと、総 AE ヒットの $2.9 \times 10^{-3} \sim 9.4 \times 10^{-1} \%$ を記録し、一連の載荷過程で発生する AE の 1 % 未満であることが明らかになった。AE エネルギーについても同様の傾向が検出された。図 4.3.1 に示す AE 発生頻度割合とひずみの関係からいずれの供試体も載荷過程の進行に伴い AE 発生数の増加傾向が見られ、図 4.2.2 に示す指数関数による近似が可能であると推察された。表 4.3.1 に無損傷コンクリートの圧縮載荷過程における AE 特性を示し、図 4.3.1 および図 4.3.2 にその際の AE 指標の各ひずみ値における特徴を示す。

AE エネルギーは発生頻度とは異なり、一連の載荷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。参考 - 1 では、 $1,200 \sim 2,000 \mu$ 近傍で AE エネルギーが増加した (図 4.3.2)。ピーク値は、ひずみ $1,460 \mu$ であり、図 4.3.1 に示す AE 発生頻度の傾向と比較すると、一連の AE エネルギー放出が計測された約 $2,000 \mu$ を境に AE 発生頻度が増加した。本供試体は AE エネルギーの放出傾向から、ひずみ $1,460 \mu$ 近傍で主破壊が生じ、それ以後の載荷過程の進行に伴い内部に発達したひび割れの進展と連結による低エネルギーの AE が頻発したものと考えられる。参考 - 2 は、参考 - 1 とは異なり、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。 AE 発生頻度は、約 800μ 以降に AE 発生頻度割合が増加し、終局時に急激な増加傾向を示した。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る。参考 - 3 は、参考 - 2 供試体と同様に、複数の AE エネルギー放出に関するピーク値が計測された。ひずみ 580μ 、 860μ および $1,180\mu$ 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 $1,380\mu$ であることから、ひずみレベルの 42 %、62 % および 86 % である。AE 発生頻度は、載荷過程の進行に伴い段階的に AE 発生頻度割合が増加した。

一般的なコンクリート・コアの圧縮破壊挙動は、遷移帯において微細ひび割れが発生し、載荷過程の進行に伴いひび割れの連結とそれに伴う耐力低下が顕在化する¹⁹⁾。AE はひび割れの発生・連結に伴い検出されるが、ひび割れ発生による AE エネルギー放出は、ひび割れの連結や擦れと比較して高いエネルギー値が検出される²⁰⁾。無損傷コンクリートの AE エネルギー放出を概観するといずれの供試体も AE 発生頻度とは異なり、一連の載荷過程において AE エネルギー放出のピーク点が複数認められた。これは、圧縮破壊が供試体内の複数の部位において進行し、各部位の耐力や局所ひずみの増加の影響を受けた結果であると推察される。AE 発生頻度では、いずれも終局時にピーク値を有する特徴があり、載荷過程における主破壊点や破壊の進行過程を明確に同定することは困難である。

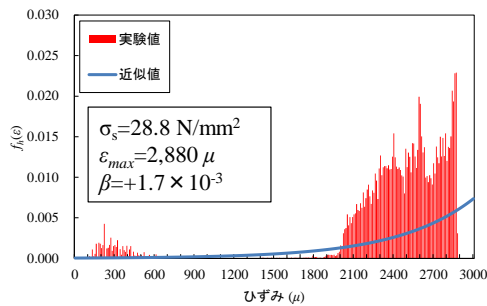
そこで、本研究では、圧縮載荷過程における AE エネルギー放出の特性を考慮し、AE エネルギー放出の重心点を式 (4.6) を用いて評価した。AE エネルギーの重心点は、一連の載荷過程における主破壊点の代表的な位置と考えられ、応力 - ひずみ曲線から求められるひずみエネルギーに換算することにより主破壊点までの供試体内部での仕事を評価できる。表 4.3.1 より無損傷コンクリートの重心ひずみエネルギー U_{cog} は、平均 9.7 J (6.2 ~ 12.3 J) で、標準コンクリートに微細ひび割れが発生するひずみエネルギー U_{30} (=5.8 J) の 1.67 倍であった。 $U_{cog} > U_{30}$ の場合、主破壊に至るひずみエネルギーが標準コンクリートよりも大きいことを意味し、損傷蓄積は懸念されない。それに対して、 $U_{cog} < U_{30}$ の場合、重心ひずみエネルギーが標準コンクリートよりも小さく、低応力段階でひび割れが発生し、進展することから供試体の損傷蓄積を意味する。

以上、無損傷コンクリートの圧縮載荷過程における AE パラメータ特性を実験的に検討した結果、圧縮強度だけでは明らかにできない、主破壊点を考慮した力学特性を重心ひずみエネルギー指標を用いることで評価することが可能になったと考えられる。

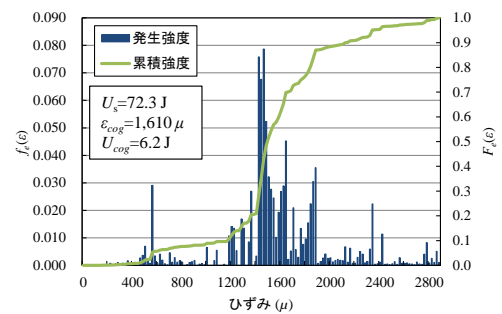
表 4.3.1 AE パラメーター一覧（無損傷コンクリート）

総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V ²)	重心ひずみエネルギー (J)
66,208 [53,248~72,238]	285 [2~681]	+1.5 [+1.4~+1.7]	1,351.7 [507.5~2,946.9]	0.7 [2.0 $\times 10^{-4}$ ~2.1]	9.7 [6.2~12.3]

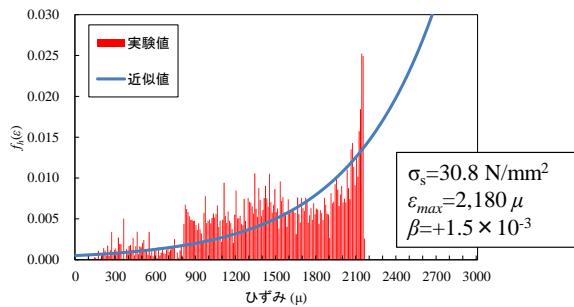
* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。



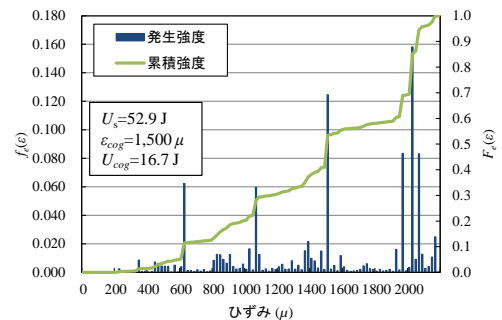
(a) 参考-1



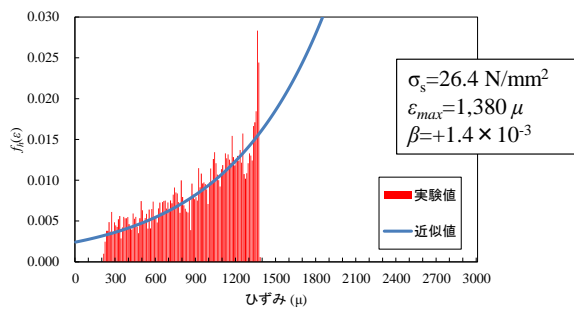
(a) 参考-1



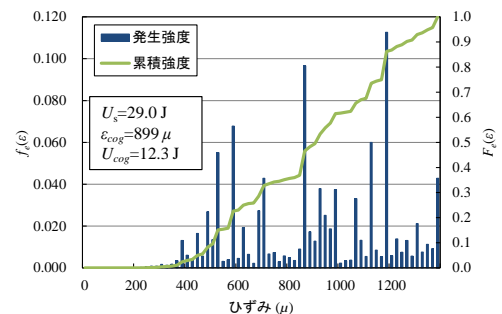
(b) 参考-2



(b) 参考-2



(c) 参考-3



(c) 参考-3

図 4.3.1 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係（無損傷コンクリート）

図 4.3.2 AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係（無損傷コンクリート）

4.4 凍害コンクリートの圧縮載荷過程の AE 発生特性

前節での無損傷コンクリートを対象とした検討を踏まえて、ひび割れ損傷の顕在化した凍害コンクリートを用いた圧縮応力場における AE エネルギーの特性評価を試みる。検討に用いるコンクリート・コアは、第 3 章において供試したものである。

4.4.1 応力 - ひずみ挙動とひずみエネルギーの関係

凍害コンクリートの力学特性は、第 3 章の表 3.3.7 に示す通り、ひび割れ損傷の顕在化した Type A と Type B は、Type C と比較して顕著に圧縮強度や弾性係数が低い。ひずみエネルギーの平均値は、Type A が 19.5 J であるのに対して、Type B : 4.1 J, Type C : 21.3 J で、無損傷コンクリートの平均値 51.4 J と比較して、ひずみエネルギーの低下が顕著で、0.08~0.41 倍の評価値となった。

4.4.2 AE パラメータを用いた圧縮破壊特性の抽出

凍害コンクリートでは、無損傷コンクリートと比較して、載荷初期に顕著な AE エネルギーの放出が検出された (表 4.4.1)。ひずみ 0~200 μ における無損傷コンクリートの累積 AE エネルギー放出量の平均値は、 0.7 V^2 ($2.0 \times 10^{-4} \sim 2.1 \text{ V}^2$) であるのに対して、Type A : $1,477 \text{ V}^2$, Type B : 303 V^2 ($0.0 \sim 853.7 \text{ V}^2$), Type C : $8,932 \text{ V}^2$ ($9,504.1 \sim 8,359.3 \text{ V}^2$) であった。無損傷コンクリートの平均値と比較して、Type A : 2,110 倍, Type B : 433 倍, Type C : 12,760 倍であった。重心ひずみエネルギーは、無損傷コンクリートが平均 9.7 J であるのに対して、Type A : 3.5 J, Type B : 1.7 J ($0.8 \sim 3.2 \text{ J}$), Type C : 3.4 J ($2.0 \sim 4.9 \text{ J}$) であった。無損傷コンクリートの平均値に対して、Type A : 0.36 倍, Type B : 0.18 倍, Type C : 0.35 倍であり、顕著に低いひずみエネルギー段階での主破壊の発生が示唆された。標準コンクリートと比較した場合も無損傷コンクリートと同様、遷移帯に微細ひび割れが発生する 5.8 J (表 4.2.4) に対して、低ひずみエネルギー段階での破壊の進行が示唆された。AE ヒットに関する指標値も概ね AE エネルギーと同様の傾向が得られ、損傷度評価指標である β は、平均値で $-0.5 \times 10^{-3} \sim -0.6 \times 10^{-3}$ で、損傷蓄積 ($\beta < 0.0$) が示唆された。同様の傾向は、筆者による既往研究においても得ている^{8), 21)~23)}。AE 発生頻度と AE エネルギーに関する詳細を図 4.4.1 および図 4.4.2 に示す。

AE 発生挙動は、無損傷コンクリートとは異なり、載荷初期に頻発した。 $\beta > 0.0$ の Type B-2 においても、ひずみ 0~200 μ で無損傷コンクリートの 4.23 倍の 1,206 ヒットが検出され、損傷蓄積が示唆された。同様に Type B-3 では、載荷初期における顕著な AE は検出されなかったが、ひずみエネルギーが 1.4 J と無損傷コンクリート (平均値) の 2.7 % と非常に小さかったので、圧縮載荷が正常に行われなかったと推察される。Type B は、図 3.3.4 に示す X 線 CT 画像の通り、供試体内部でひび割れ損傷に偏りがあり、不均一な

表 4.4.1 AE パラメータ特性一覧（凍害コンクリート）

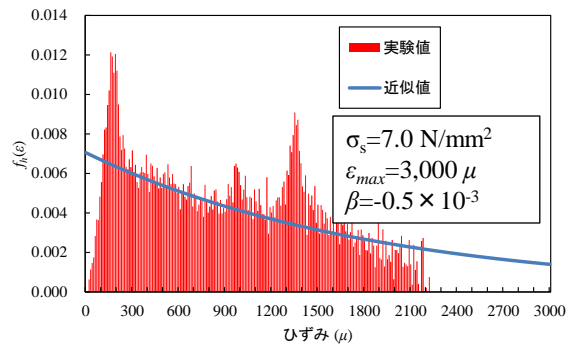
Type	総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V ²)	重心ひずみ エネルギー (J)
Type A	106,089	28,764	-0.5	2,977.9	1,476.7	3.5
Type B	45,751 [3,183~113,353]	2,948 [0~7,638]	-0.5 [-1.7~+0.4]	2,760.0 [257.0~4,114.7]	302.7 [0.0~863.7]	1.7 [0.8~3.2]
Type C	134,713 [73,297~196,129]	32,965 [14,838~51,092]	-0.6 [-1.1~-0.003]	27,179.0 [23,455.7~30,812.1]	8,931.5 [9,504.1~8,359.3]	3.4 [2.0~4.9]

* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。

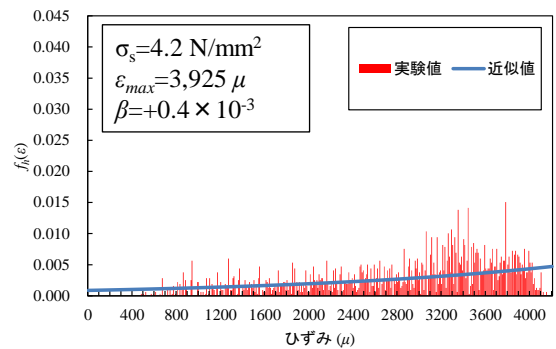
供試体構造となっている。B-2 と B-3 では、圧縮強度が共に 10 N/mm² 未満で、最大ひずみは 3,365 μ と 3,925 μ で、標準的な最大ひずみ 2,000 μ の 1.68 倍と 1.96 倍である。これは、層状ひび割れの発達が供試体内部の不均一性を増加させ、その結果として応力 - ひずみ曲線と AE 発生挙動に影響しているものと考えられる。Type B の圧縮強度と最大ひずみは、Type A と類似しているが、初期接線弾性係数は Type A が 5.9 GPa であるのに対して、Type B-2 : 2.0 GPa, Type B-3 : 0.2 GPa で、弾性係数の観点からも応力 - ひずみ挙動の極度な変質が示唆された。

AE エネルギーに関しては、Type B-2 と B-3 以外は、載荷初期に AE エネルギーが多量発生し、損傷蓄積と AE エネルギー放出の関連が示唆された。Type B-2 と B-3 は、応力 - ひずみ曲線の形状評価指標である λ がいずれも $\lambda < 0.0$ となり、他の供試体とは異なる応力 - ひずみ挙動を示した。

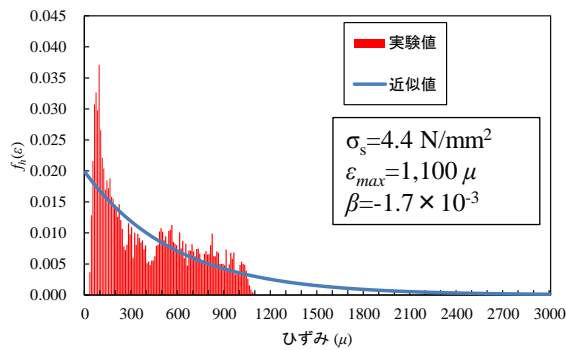
以上のことから、コンクリート損傷度は、AE 発生頻度と比較して、検出波強度を考慮した AE エネルギーを用いることにより詳細な評価が可能になることが、無損傷コンクリートと同様に、損傷コンクリートにおいても明らかになった。



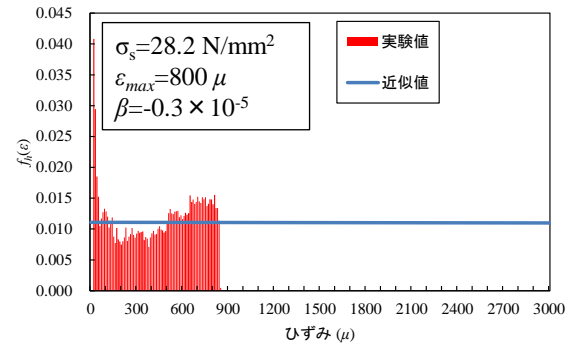
(a) Type A (A-1)



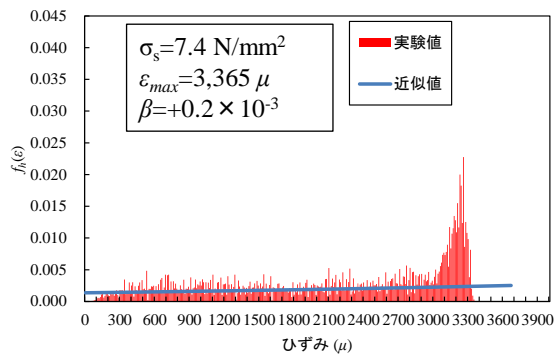
(d) Type B (B-3)



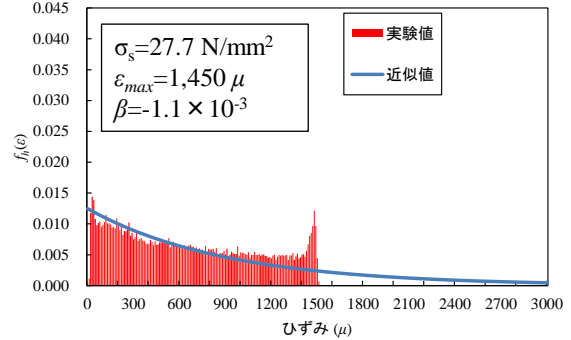
(b) Type B (B-1)



(e) Type C (C-1)

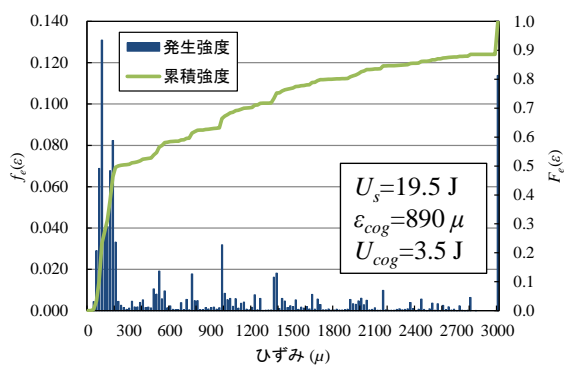


(c) Type B (B-2)

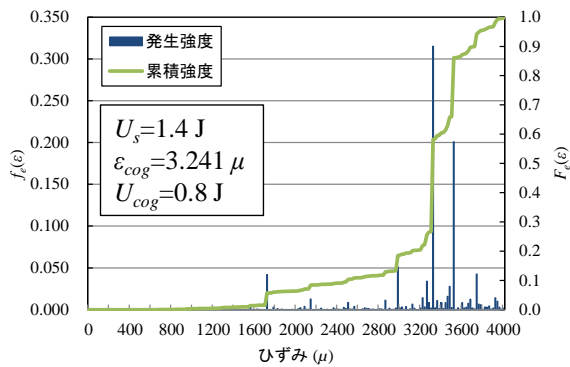


(f) Type C (C-2)

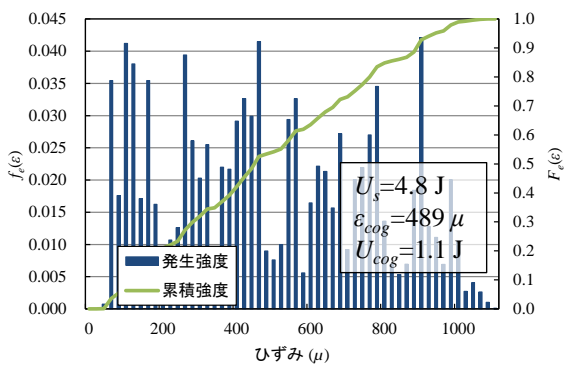
図 4. 4. 1 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係
(凍害コンクリート, 顕在化損傷: Type A, B, 未顕在化損傷: Type C)



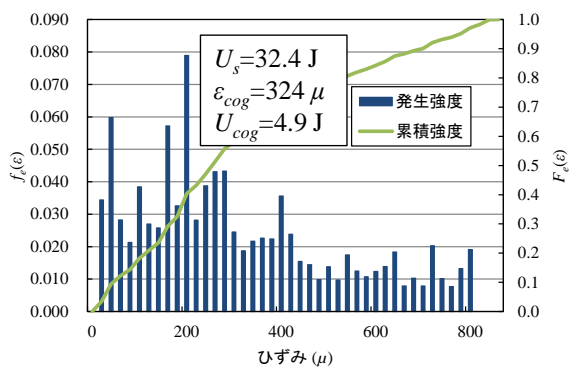
(a) Type A (A-1)



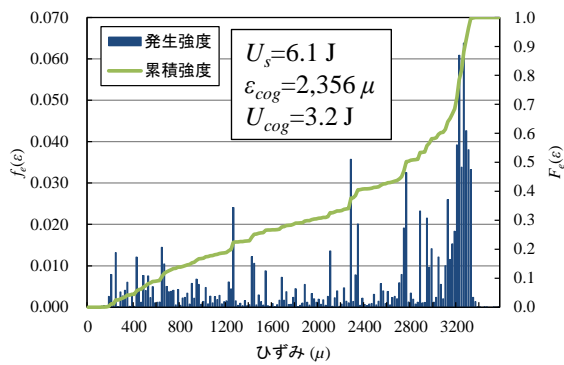
(d) Type B (B-3)



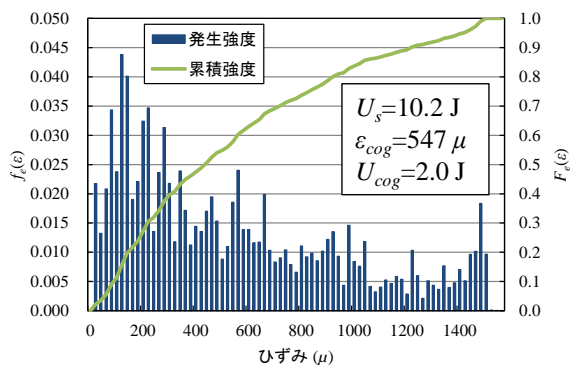
(b) Type B (B-1)



(e) Type C (C-1)



(c) Type B (B-2)



(f) Type C (C-2)

図 4.4.2 AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (凍害コンクリート)

4.5 定性的損傷度評価による損傷実態の分類

本節では、定性的損傷度評価指標（図 4.2.5）で各供試体を評価し、損傷度区分における位置を確認する。図 4.5.1 に定性的損傷度評価結果を示す。

図より、ひび割れ損傷の顕在化した Type A と Type B は、いずれも損傷領域に区分された。Type C は、中間的損傷_B 領域に区分された。これは、圧縮強度は閾値を上回るが、重心ひずみエネルギーが低いためである。無損傷コンクリートは、全ての供試体が無損傷領域に区分された。無損傷コンクリートの平均値は、圧縮強度：28.3 N/mm²、最大ひずみ：2,147 μ および重心ひずみエネルギー：9.7 J である。

Type A と Type B は損傷実態と損傷度区分とが一致した。Type C は、損傷蓄積が示唆される結果であり、Type A や Type B と同様に損傷実態と損傷度区分とが一致しているものと推察される。無損傷コンクリートは、実態と評価区分とが一致した。

このことから、本定性的損傷度評価指標は現段階において、コンクリート損傷状況を説明できる最良の評価法であると考えられる。本手法が他のコンクリート・サンプルについても適用可能であるかを、今後、検討することで本手法の有効性を検証できるものとする。

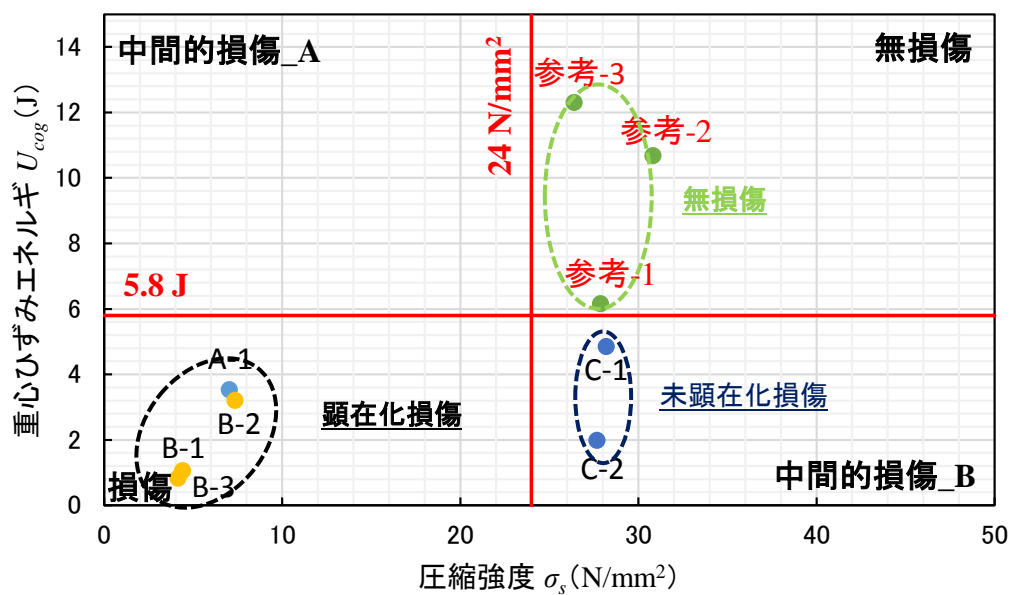


図 4.5.1 定性的損傷度評価（凍害コンクリート，無損傷コンクリート）

4.6 ひび割れ損傷の蓄積が弾性波挙動へ及ぼす影響評価

弾性波の伝播は，コンクリート中の空隙やひび割れ等の影響を受ける．そこで本節では，ひび割れの幾何学的特徴量である真円度と P 波速度から算出された動弾性係数（式（2.16）），AE エネルギーの関係からひび割れ損傷の発達がコンクリート物性へ及ぼす影響を考察する．検討結果を図 4.6.1 に示す．なお，本図は X 線 CT 試験を 1 供試体で 2 断面（A 面，B 面）行っていることから，2 試験値を図示している．

図より，Type A では，顕著な真円度の増加と動弾性係数の低下が示された．真円度は，円の場合， 4π となることから²⁴⁾，Type A はその約 7 倍の値で，これはひび割れ損傷が進展したためである．無損傷コンクリートは，いずれも真円度が 12.57 ($=4\pi$) に近い値となった．凍害コンクリートは，無損傷コンクリートとは異なり，12 試験値中 11 の試験値で 12.57 以上の評価値を得た．

AE エネルギーの特徴は，動弾性係数の低い供試体ほど，载荷初期の低ひずみ段階での AE エネルギー放出が顕著となった．一方，無損傷コンクリートでは，規則的な AE エネルギーの放出が検出された．初期 AE エネルギー放出率の平均値を比較した場合，Type A が 49.6 % であるのに対して，Type B : 7.4 %，Type C : 33.7 %，無損傷コンクリート : 0.02 % と明らかな違いが見られた．

これらのことから，P 波速度から求めた動弾性係数は，コンクリート空隙の発達の影響を受けて顕著に低下する．Type A や Type B は，動弾性係数により無損傷コンクリートとの区分は可能である．Type C は動弾性係数に加えて，AE エネルギー指標である AE エネルギー発生割合 $f_a(\epsilon)$ とひずみの関係を考慮することにより，無損傷コンクリートとの区別が可能となると考えられる．

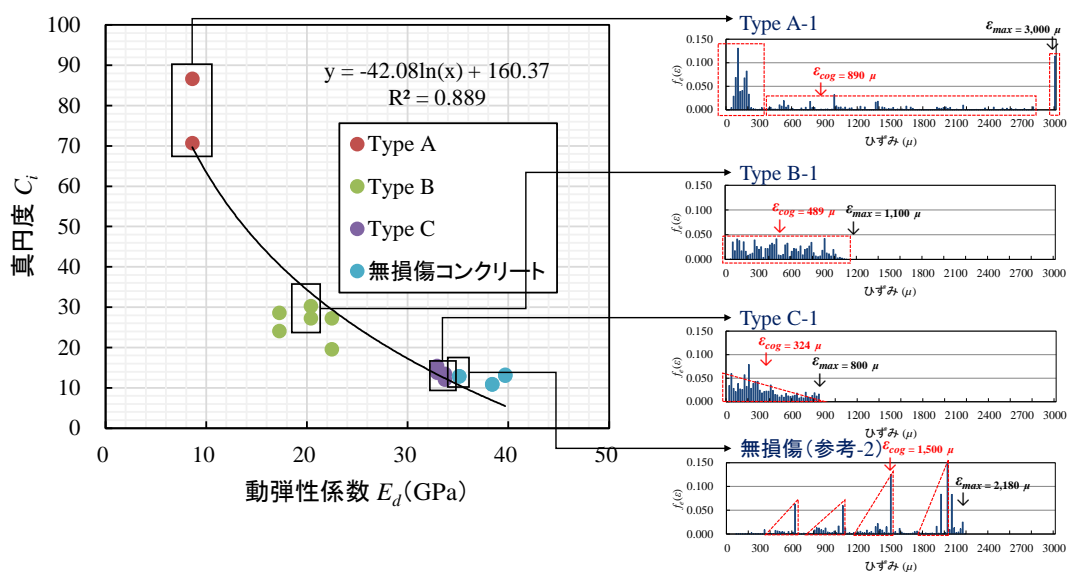


図 4.6.1 コンクリート物性と空隙特性，AE エネルギーの関係

4.7 まとめ

第 4 章では、農業水利施設に多用されている構造材料であるコンクリートを対象に AE パラメータを用いた損傷度評価法を提案し、その評価指標の有効性を検討した。以下に検討結果を列挙する。

- (1) 既往研究では、AE 発生頻度に着目した技術開発が行われているが、本研究では AE エネルギー特性に着目し、圧縮載荷過程の AE エネルギーの重心位置から主破壊点を推定した。その際の重心ひずみエネルギーと圧縮強度の関係から定性的損傷度評価法を提案した。この評価法では損傷の程度を「無損傷」、「中間的損傷_A」、「中間的損傷_B」および「損傷」に区分し、圧縮強度のみでは判断できない供試コンクリートの損傷状態を定性的に評価することを可能にした。
- (2) 提案した評価法で供試体を再評価したところ、無損傷コンクリートは、圧縮強度： 28.4 N/mm^2 、最大ひずみ： $2,147 \mu$ 、重心ひずみエネルギー： 9.7 J で、無損傷領域に区分された。凍害コンクリートである Type A と Type B は損傷領域に区分された。Type C は中間的損傷領域に区分された。損傷実態と提案した定性的損傷度評価法に矛盾がないことが明らかになった。
- (3) 凍害コンクリートでは、ひずみ $0 \sim 200 \mu$ 区間の初期段階から AE エネルギーの放出が見られ、初期 AE エネルギー放出率が $7.3 \sim 49.6 \%$ となった。無損傷コンクリートの場合は 0.02% で、載荷初期段階において顕著な AE エネルギー放出は検出されなかった。また、凍害コンクリートにおいて動弾性係数の顕著な低下が見られたことから、損傷蓄積の進行と低ひずみ段階での AE エネルギーの連続的放出が密接に関連することが明らかになった。

参考文献

- 1) (社) 日本非破壊検査協会編：3.3 AE 信号のエネルギー，アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp. 28-29，2008.
- 2) 横堀武夫：材料強度学，技報堂出版，pp. 6-14，1966.
- 3) 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.
- 4) Loland, K.E.: Continuous Damage Model for Load-Response Estimation of Concrete, Cement and Concrete Research, 10, pp. 385-402, 1980.
- 5) 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.
- 6) (社) 日本非破壊検査協会編：8.2 AE 計測データのグラフ表示，アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp. 95-105，2008.
- 7) 渡辺健，岩波光保，横田弘，二羽淳一郎：AE 法を用いたコンクリートの圧縮破壊領域の推定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，23 (3)，pp. 85-90，2001.
- 8) 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.
- 9) Ohtsu, M. and Grosse, C. U. (Edit.): 5. Signal-Based AE Analysis, Acoustic Emission Testing, Springer, pp. 53-100, 2008.
- 10) 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.
- 11) 山本清仁，小林晃，青山咸康：EPS ビーズ混入劣化によるモルタルの AE 挙動，材料，57 (10)，pp. 1011-1018，2008.
- 12) 大津政康：3.2 振幅分布，アコースティック・エミッションの特性と理論，森北出版，pp. 38-43，2005.
- 13) (社) 日本非破壊検査協会編：8.3 計測データの評価（解釈），アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp. 98-99，2008.
- 14) 水谷仁，渡辺輝彦：c) 地震のエネルギー，地球，岩波書店，pp. 175-176，1992.
- 15) 農林水産省構造改善局監修：土地改良事業計画設計基準・設計「水路工」技術書，農業農村工学会，pp. 290-291，2001.
- 16) (公) 土木学会コンクリート委員会：2.2.4 圧縮応力下における応力 - ひずみ関係，2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，pp. 457-460，2012.
- 17) 笠井芳夫編著：10.6 力と変形，コンクリート総覧，技術書院，pp. 421-422，1998.

- 18) 村上澄男：10.2 コンクリートの等方損傷理論，連続体損傷力学，森北出版株式会社，pp. 250-254，2008.
- 19) 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.
- 20) (社)日本非破壊検査協会編：2.2 固体材料中の AE 発生源と AE 波の特徴，アコースティック・エミッション試験Ⅱ，pp. 6-12，2008.
- 21) 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.
- 22) 山岸俊太朗，鈴木哲也，緒方英彦，周藤将司：凍害損傷の進行したコンクリートの圧縮破壊特性評価に関する研究，コンクリート工学年次論文集，35 (1)，pp. 385-390，2013.
- 23) 山岸俊太朗，鈴木哲也，森井俊広，大津政康：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，コンクリート工学年次論文集，36 (1)，pp. 2158-2163，2014.
- 24) 白井良明，谷内田正彦：3.1.3 特徴抽出，パターン情報処理，オーム社，pp. 41-42，2005.

第5章 実構造物より採取したコンクリートの損傷度評価

5.1 概説

本章では、実環境で長期間供用された3種類のコンクリートを対象に定性的損傷度評価を試み、開発手法の有用性を検証する。5.2では、各供試体の損傷度評価における位置づけを明確にする。5.3では、凍結融解作用によるひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアについて定性的損傷度評価を試みる。試料の採取地は青森県弘前市に立地するコンクリート製開水路である。5.4では、凍害環境ではあるがひび割れ損傷が顕在化していないコンクリート・コアを対象に、未顕在化損傷による物性低下と損傷度評価指標の関係を明らかにする。5.5では、衝撃荷重を87年間受け続けたコンクリート道路橋のRC床版を対象に損傷度評価を試みる。5.6では以上の損傷度評価指標とAEエネルギー指標を整理し、本研究で開発したコンクリート損傷度評価法の新規性と有用性について考察する。5.7は、まとめとし、AEエネルギー指標の有用性と今後の技術的課題を提示する。

5.2 開発手法の検証における試験サンプルの位置づけ

表5.2.1に供試したコンクリート・コアの概要を示す。第4章では、同一構造物同一断面から損傷状況の異なる供試体を採取して検討したが、ここでは①凍害によりひび割れ損傷の顕在化したコンクリート（Case 1）、②凍害環境で供用されているがひび割れ損傷の顕在化していないコンクリート（Case 2）、③凍害などの環境要因による損傷は無いが長期間供用されたコンクリート（Case 3）を対象とする。これら3種類の計31本のコンクリート・コアを供試した。

表 5.2.1 開発手法の検証に用いたコンクリート・コア一覧

No.	供試体名称 (検討ケース)	サンプルサイズ (本)	ひび割れ損傷	供用期間* (年)
1	弘 前 (Case 1)	6	有	53
2	北海道 (Case 2)	11	無	34~57
3	祇園橋 (Case 3)	14	無	87

* 試験時の供用年数

5.3 ひび割れ損傷が顕在化した凍害コンクリートの損傷度評価

5.3.1 供試体

試験対象は、青森県弘前市に立地する凍害によるひび割れ損傷が顕在化したコンクリート製開水路である。本施設の竣工は昭和 36 年（1961 年）で、初回の現地調査と試料採取を実施した 2013 年時点で 53 年が経過している。図 5.3.1 に既存施設の損傷実態の写真を示す。損傷実態は、水路壁面の長手方向にひび割れ損傷が発達し、ひび割れ部よりエフロレッセンスと錆汁が見られた。水路壁面の上部では表層部分のコンクリートに剥離が、水路壁面の下部ではコンクリート表面で摩耗による凹凸が顕在化していた^{1),2)}。目視調査の結果、凍害によるひび割れ損傷の進行は、第 4 章で供試した凍害コンクリートとほぼ同程度であった。



(a) 凍害損傷が顕在化した水路側壁



(b) 側壁端部の崩壊



(c) ひび割れ損傷の発達状況



(d) コンクリート・コアの採取

図 5.3.1 凍害損傷が顕在化したコンクリート開渠（竣工後 53 年経過，青森県弘前市）

5.3.2 実験・解析方法

コンクリート・コアは、コンクリート製開水路のひび割れ損傷の顕在化した部位より2013年と2016年の2度採取した。採取本数は6サンプルである。実験的検討は、第3章3.3と同一方法（表3.2.2，表3.3.1）によりX線CT試験，超音波伝播速度試験およびAE計測を含む圧縮強度試験を実施した。

5.3.3 実験結果・考察

(1) コンクリート・コアの力学特性と損傷実態

採取したコンクリート・コアの力学特性を表5.3.1に示す。圧縮強度は、平均15.3 N/mm² (6.0~27.4 N/mm²)であり、建設当初のコンクリート強度は不明であるが、一般的なRC構造を想定したとしても著しく低い値であった。最大ひずみは、平均958 μ (100~1,605 μ)で、一般的な無損傷コンクリートで検出される2,000 μ の約50%未満であった。ひずみエネルギーは、平均11.4 J (0.4~19.0 J)で、標準コンクリートのひずみエネルギー37.7 Jと比較して30.2%と著しく低い値であった。P波速度は、平均3,928 m/s (3,865~4,007 m/s)であり、コンクリートの標準値である4,000 m/s近傍に評価値を得た。損傷力学指標 λ は平均1.4 (0.9~2.1)であった。

本供試体と実験室内で打設した無損傷コンクリートを比較した場合（表3.2.4），圧縮

表 5.3.1 力学特性一覧（Case 1, n=6）

圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ *2	P波速度 (m/s)
15.3 [6.0~27.4]	958 [100~1,605]	32.7 [6.9~57.5]	25.4 [8.3~59.6]	11.4 [0.4~19.0]	1.4 [0.9~2.1]	3,928 [3,865~4,007]

*1 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。

*2 応力 - ひずみ曲線の不具合により算出されたエラー値は除く。

参考表 力学特性一覧（無損傷コンクリート, n=3）（表 3.2.4）

圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ	P波速度 (m/s)
28.4 [26.4~30.8]	2,147 [1,380~2,880]	23.0 [21.3~24.4]	14.8 [11.1~19.2]	51.4 [29.0~72.3]	2.3 [1.1~4.6]	4,093 [3,950~4,200]

* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。

強度やひずみエネルギーにおいて、極度に低い値と試験値のばらつきが見られ、ひび割れ損傷の顕在化に伴うコンクリート物性の変質が明らかになった。

(2) 圧縮載荷過程の AE 発生挙動とその特性

供試した 6 サンプルは、いずれも力学特性が顕著に低く、X 線 CT 画像においてもひび割れ損傷が 5 サンプルで顕在化していた (図 5.3.2)。本供試体は、第 3 章と第 4 章で検討した顕在化損傷コンクリート (Type A, Type B) と同程度の損傷状態にあるものと考えられる。

検出した AE のパラメータ特性を概観すると、ひずみ 0~200 μ 区間の低載荷条件において AE の頻発が見られた (表 5.3.2)。その際、累積 AE エネルギーの平均値は、ひずみ 0~200 μ 区間において 1,066.3 V^2 で、無損傷コンクリートとの明確な相違が明らかになった (表 4.3.1)。Type A や Type B を比較すると平均値で 0.28~1.38 倍となった (表 4.4.1)。

AE 発生頻度の指標である β は 6 供試体中 5 供試体で $\beta < 0.0$ となり、AE 発生頻度の観点からも損傷蓄積が示唆された。図 5.3.3 に各供試体の AE 発生特性である AE 発生頻度割合 $f_h(\epsilon)$ とひずみの関係を示す。目視によりひび割れ損傷が見られない Sample 4 を除き、いずれも載荷初期に主な AE ヒットのピーク値が検出された。その際、Sample 4 では $\beta > 0.0$ となった。

AE エネルギー特性は、AE 発生頻度とは異なり、供試体毎の相違が見られた。AE エネルギー発生割合 $f_e(\epsilon)$ とひずみの関係を図 5.3.4 に示す。Sample 1~3 は、最終破壊に至る終局時において最も評価値の高い AE エネルギー発生割合が計測された。圧縮載荷による応力 - ひずみ挙動は、ひび割れ損傷の発達したコンクリート・コアの場合、微細ひび割れの連結した状態 (第 2 章、図 2.2.2 第 3 段階) から AE を計測していることになる。その結果、ひび割れの発生に起因するエネルギー値の高い一次 AE ではなく、現存するひび割れの擦れや進展に伴うエネルギー値の低い二次 AE が卓越するものと推察される。Sample 4 と比較した場合、Sample 1~3 では、検出波の AE エネルギーの平均値は 0.06~0.29 V^2/hit であるのに対して、Sample 4 では 2.40 V^2/hit となり、Sample 4 が Sample 1~3 の 8.3~40.0 倍を記録した。ひび割れ損傷の有無による AE エネルギー特性の顕著な違いが見られたものと考えられる。同様の傾向は第 3 章で用いた Type A, B と Type C の比較においても検出されていることから、圧縮載荷過程の AE エネルギー特性を用いることにより、ひび割れ損傷の発達実態を同定できるものと推察される。AE エネルギー放出の重心点から求めた重心ひずみエネルギー U_{cog} は、Sample 4 が 4.1 J であるのに対して、Sample 1~3 は平均 5.2 J (1.8~7.5 J) であった。いずれの評価値も無損傷コンクリート (平均値: $U_{cog}=9.7$ J) の 0.4 倍と 0.5 倍であり、損傷蓄積による低載荷段階での主破壊の発生が示唆された。

Sample 5 は、図 5.3.2 に示す通り、コンクリート・コア中に鉄筋を一部含有したことから圧縮強度試験を正常に行えず、最大ひずみが 100 μ となった。Sample 6 は、目視の

結果，局所的に微細ひび割れが見られたが，全体的な外観は Sample 4 と類似な形状的特徴を有していた．AE エネルギー特性は，いずれの供試体とも異なり，AE エネルギー放出の極大点が圧縮載荷過程において複数点見られた．この傾向は，無損傷コンクリートの AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係（第 4 章，図 4.3.3）と同様であるが，AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ の最大値が無損傷コンクリートにおいて $f_e(\varepsilon) \doteq 0.16$ （参考 - 2 供試体）であるのに対して，Sample 6 では 0.25 倍の $f_e(\varepsilon) \doteq 0.04$ と低く，明確なピーク値ではなく一連の AE エネルギー放出との類似性の高いものとなった．重心ひずみエネルギーは 7.6 J で，無損傷コンクリートの平均値 9.7 J の 0.78 倍であり，Sample 6 においても損傷蓄積が示唆される結果となった．

以上より，供試した 6 本のコンクリート・コアは，力学特性が著しく低く，第 4 章で検討に用いた凍害損傷の顕在化したコンクリート・コアと類似な AE パラメータ特性を有することが明らかになった．ひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアでは，圧縮強度に代表される力学特性を高精度で評価することは困難であることから，AE エネルギー指標による損傷度評価は有効な評価指標になると考えられる．

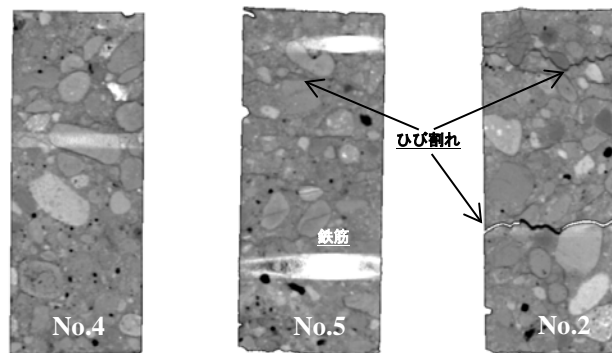


図 5.3.2 採取したコンクリート・コアの X 線 CT 画像

表 5.3.2 AE パラメータ特性一覧 (Case 1, n=6)

総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V ²)	重心ひずみ エネルギー (J)
10,899 [3,161~18,391]	7,297 [1,205~14,197]	-13.3 [-54.4~+1.2]	3,369.4 [1,045.3~7,582.7]	1,066.3 [13.6~2,328.8]	4.6 [0.2~7.6]

* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す.

参考表 AE パラメータ特性一覧 (無損傷コンクリート, n=3) (表 4.3.1)

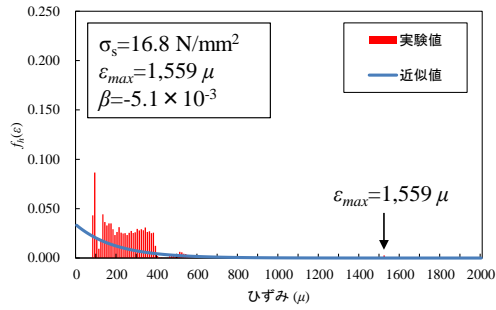
総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V ²)	重心ひずみ エネルギー (J)
66,208 [53,248~72,238]	285 [2~681]	+1.5 [+1.4~+1.7]	1,351.7 [507.5~2,946.9]	0.7 [2.0 $\times 10^{-4}$ ~2.1]	9.7 [6.2~12.3]

* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す.

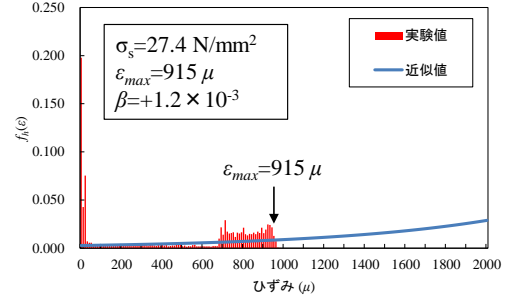
参考表 AE パラメータ特性一覧 (凍害コンクリート, n=6) (表 4.4.1)

Type	総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V ²)	重心ひずみ エネルギー (J)
A	106,089 [-]	28,764 [-]	-0.5 [-]	2,977.9 [-]	1,476.7 [-]	3.5 [-]
B	45,751 [3,183~113,353]	2,948 [0~7,638]	-0.5 [-1.7~+0.4]	2,760.0 [257.0~4,114.7]	302.7 [0.0~863.7]	1.7 [0.8~3.2]
C	134,713 [73,297~196,129]	32,965 [14,838~51,092]	-0.6 [-1.1~0.003]	27,179.0 [23,455.7~30,812.1]	8,931.5 [9,504.1~8,359.3]	3.4 [2.0~4.9]

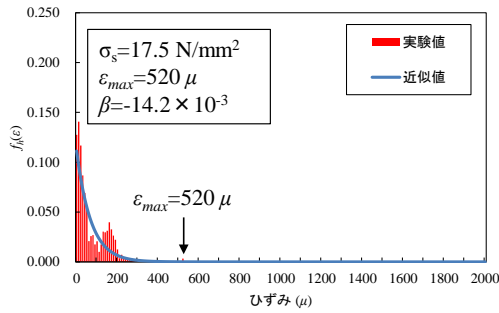
* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す.



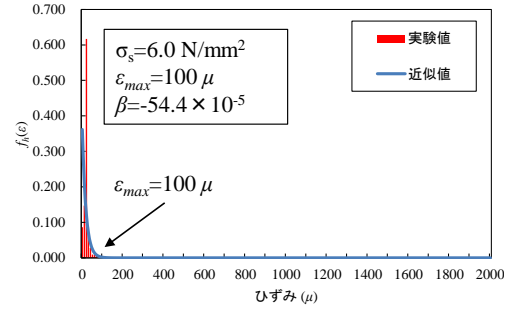
(a) Sample 1



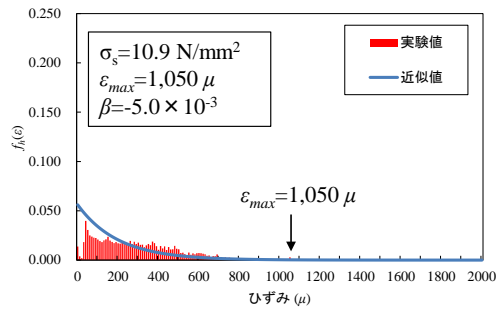
(d) Sample 4



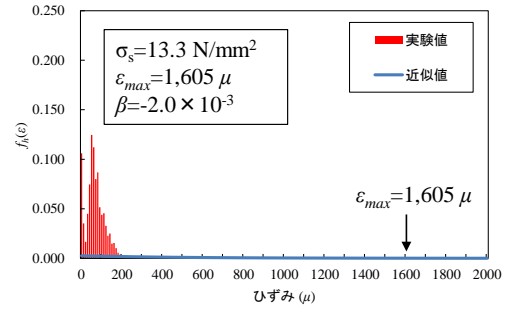
(b) Sample 2



(e) Sample 5

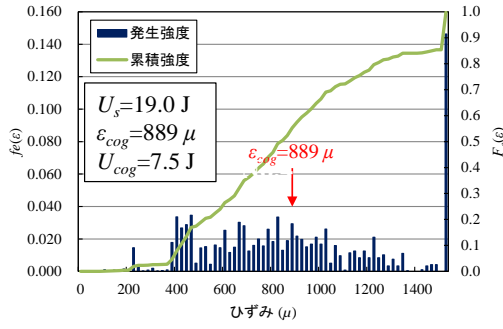


(c) Sample 3

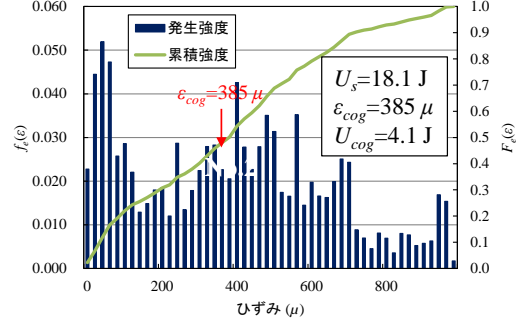


(f) Sample 6

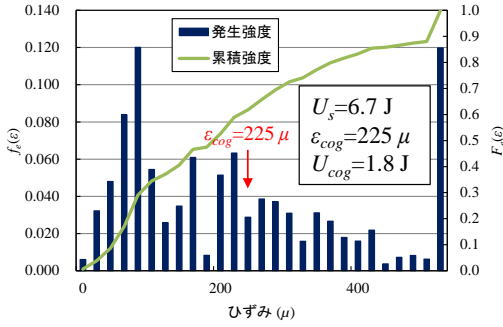
図 5.3.3 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 1)



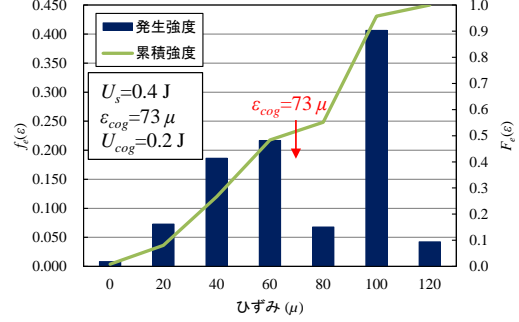
(a) Sample 1



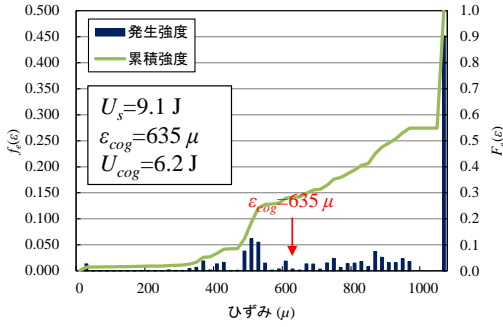
(d) Sample 4



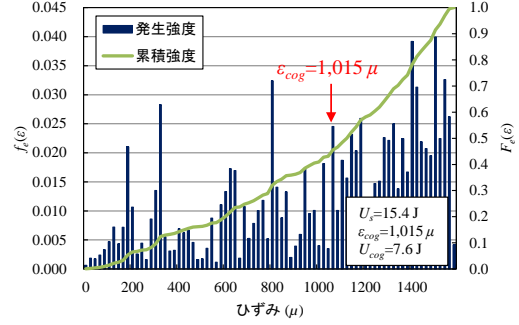
(b) Sample 2



(e) Sample 5



(c) Sample 3



(f) Sample 6

図 5.3.4 AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 1)

(3) 定性的損傷度評価

そこで AE データと力学データから図 4.2.5 に示す定性的損傷度評価区分を用いて、供試したコンクリート・コアの損傷実態の定性評価を試みた。検討結果を表 5.3.3 に示し、重心ひずみエネルギー U_{cog} と圧縮強度 σ_s の関係を図 5.3.5 に示す。図中の無損傷は、第 4 章において実験的に検討した無損傷コンクリートの平均値 ($\sigma_s=28.4 \text{ N/mm}^2$, $U_{cog}=9.7 \text{ J}$) である。

検討の結果、最大ひずみが 100μ と十分な精度で応力 - ひずみ曲線が得られなかった Sample 5 を除き、5 供試体全てにおいて損傷蓄積が示唆される結果となった。Sample 5 は判定不能（エラー）と評価した。損傷と判定されたのは Sample 2 である。中間的損傷_A と判定されたのは Sample 1, 3 および 6 である。中間的損傷_B と判定されたのは Sample 4 である。

目視観察の結果、ひび割れ損傷が顕在化していない Sample 4 では、圧縮強度が 27.4 N/mm^2 ($>24 \text{ N/mm}^2$: 基準値) であり強度値は十分であるが、圧縮载荷過程の AE エネルギー放出が载荷初期に集中していたことから、強度特性では明らかにできない損傷蓄積が AE 指標により同定されたものと推察された。

ひび割れ損傷の顕在化した Sample 1, 2, 3 および 6 では、損傷区分が異なる結果が得られた。圧縮強度と重心ひずみエネルギーが共に基準値を下回る Sample 2 では、極度な脆性化 ($\epsilon_{\max}=520 \mu$) と载荷初期 80μ での AE エネルギー放出のピーク点が見られた（図 5.3.4 Sample 2）。定性的評価区分の異なる Sample 1, 3, 6 との相違は、圧縮载荷過程 $0 \sim 200 \mu$ での平均 AE エネルギーで顕著な差が検出された。Sample 2 では、 $0.16 \text{ V}^2/\text{hit}$ であるのに対して、Sample 1 : $0.002 \text{ V}^2/\text{hit}$, Sample 3 : $0.002 \text{ V}^2/\text{hit}$, Sample 6 : $0.021 \text{ V}^2/\text{hit}$ と平均値 ($0.008 \text{ V}^2/\text{hit}$) が Sample 2 の 5 % であり、検出した AE のエネルギー値が顕著に低い結果となった。初期 AE エネルギー放出率を比較すると、Sample 1 : 4 %, Sample 3 : 1.8 %, Sample 6 : 6.5 % である。定性的損傷度評価区分と損傷実態とが一致した Sample 2 では、52.6 % となり、Sample 1, 3, 6 と比較して累積 AE エネルギーに対する低ひずみ段階 ($0 \sim 200 \mu$) での AE エネルギー放出に特徴を有することが明らかになった。Sample 1, 3, 6 では、Sample 2 とは異なり、蓄積されたひび割れ損傷の擦れなどに起因する二次 AE が卓越したものと推察される。

以上より、第 4 章で構築したコンクリート損傷度評価法を適用した結果、5 供試体において損傷蓄積ありと判定した。損傷実態と定性的損傷度評価区分の一致性の向上には、圧縮载荷過程において応力 - ひずみ挙動と密接に関連する AE 指標の同定が不可欠であると推察される。その際、初期 AE エネルギー放出率は有効な評価指標であると考えられる。本サンプルでは初期 AE エネルギー放出率が 10 % 未満において定性的損傷度評価と損傷実態の相違が見られた。

表 5.3.3 定性的損傷度評価・判定一覧 (Case 1)

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	最大 ひずみ (μ)	累積 AE エネ ルギ (V ²) (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	U_{cog} (J)	目視 (ひび割れ)	損傷判定指標*1		評価*3
							力学 σ_s	AE U_{cog}	
1	16.8	1,559	13.6	-5.0	7.5	有	有	β のみ	2
2	17.5	520	2,568.6	-14.0	1.8	有	有	有	1
3	10.9	1,050	18.8	-5.0	6.2	有	有	β のみ	2
4	27.4	915	2,328.8	+1.0	4.1	無	無	有	3
5	6.0	100	-	-	-	有	-	-	エラー
6	13.3	1,605	164.2	-2.0	7.6	有	有	β のみ	2
N*4	28.4	2,147	0.7	+1.5	9.7	無	無	無	4
S*5	24.0	2,000	-	+	5.8	-	無	無	4

*1 表中のハッチングは損傷判断項目 ($\sigma_s < 24\text{N/mm}^2$ 未満, $\beta < 0.0$, $U_{\text{cog}} < 5.8\text{J}$)

*2 朱書きはエラー項目 (条件: $\varepsilon = 500\mu$ 未満), *3 損傷: 1, 中間的損傷_A: 2, 中間的損傷_B: 3, 無損傷: 4

*4 N: 無損傷コンクリート平均値, *5 S: 標準コンクリート

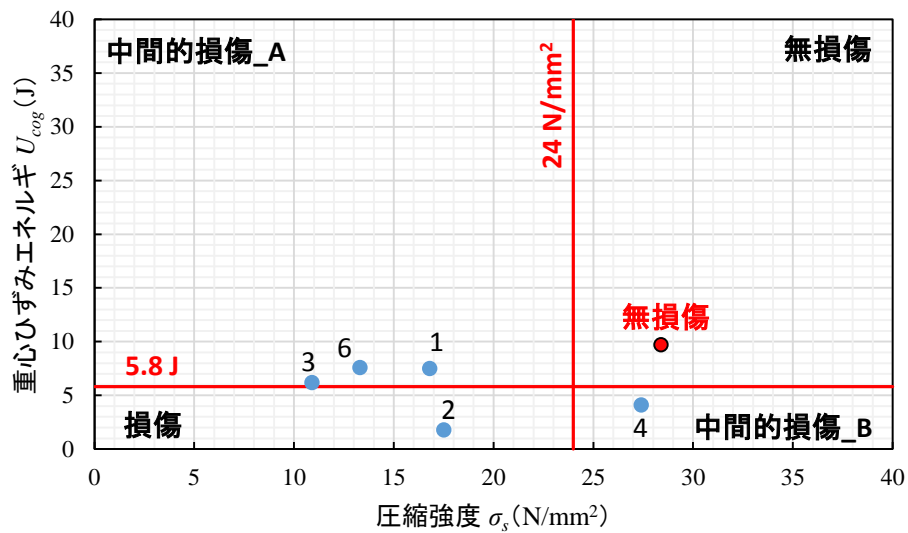


図 5.3.5 定性的損傷度評価 (Case 1, 無損傷コンクリート (平均値))

5.4 ひび割れ損傷が顕在化していない凍害コンクリートの損傷度評価

5.4.1 供試体

本節では、凍害環境に立地するコンクリート製開水路から採取したコンクリートを対象に、開発手法の適用を試みる。供試体は、第3章で供試した凍害コンクリートの Type C に該当するものであり、ひび割れ損傷は顕在化していない。採取したコンクリート・コアの外観を目視した結果、顕著なひび割れ損傷は見られなかった。採取本数は11本で、北海道全域（小樽市、函館市、室蘭市、帯広市、留萌市、旭川市）の凍害環境にある同一構造のコンクリート製開水路より採取した。施設の建設年代は昭和34年（帯広市）～昭和57年（室蘭市）である³⁾。

5.4.2 実験・解析方法

実験および解析は、5.3と同様に第3章3.3と同一の方法によってX線CT試験、超音波伝播速度試験およびAE計測を含む圧縮強度試験を実施した（表3.2.2、表3.3.1）。

5.4.3 実験結果・考察

(1) コンクリート・コアの力学特性と損傷実態

圧縮強度は平均 24.0 N/mm^2 ($16.6 \sim 35.4 \text{ N/mm}^2$) であり、11供試体中6供試体で 24 N/mm^2 以上の圧縮強度が得られた。最大ひずみは平均 $1,245 \mu$ ($100 \sim 3,075 \mu$) であり、供試体による相違が顕著だった。ひずみエネルギーは平均 24.1 J ($1.7 \sim 63.6 \text{ J}$) で、これは無損傷コンクリートの46.9%である。損傷力学指標 λ は平均5.0 ($1.6 \sim 15.7$) で、無損傷コンクリート ($\lambda=2.3$, 平均値) の2.2倍であった。P波速度は平均 $3,827 \text{ m/s}$ ($3,105 \sim 4,322 \text{ m/s}$) であった。コンクリート・コアの力学特性を表5.4.1に示す。

実験的に求められた力学特性は、Case 1 や無損傷コンクリートとは異なり、最大値と最小値の差が大きかった。無損傷コンクリートでは、その差が圧縮強度： 4.4 N/mm^2 、最大ひずみ： $1,500 \mu$ 、ひずみエネルギー： 43.3 J で、Case 1 では圧縮強度： 21.4 N/mm^2 、最大ひずみ： $1,505 \mu$ 、ひずみエネルギー： 18.6 J であった。本Case 2では、圧縮強度： 18.8 N/mm^2 、最大ひずみ： $2,975 \mu$ 、ひずみエネルギー： 61.9 J であった。Case 1 と Case 2 では、圧縮強度の範囲の広がり、ひずみエネルギーの範囲の顕著な広がりに対応した。表5.4.1 (Case 2) と表3.2.4 (無損傷コンクリート)、表5.3.1 (Case 1) を比較すると、本Case 2では力学特性値のばらつきが大きく、また、極端に低い物性値を持つものが含まれていたことが分かる。

(2) 圧縮載荷過程の AE 発生挙動とその特性

圧縮載荷過程の AE 発生挙動は、Case 1 と同様、ひずみ 0～200 μ 区間に平均 7,391 ヒット (2,427～21,576 ヒット) が計測された。これは、無損傷コンクリートの 25.9 倍である。その際、 β は 11 供試体中 10 供試体で $\beta < 0.0$ となり、AE 発生頻度の観点から損傷蓄積が示唆された (図 5.4.1)。累積 AE エネルギーは、平均 4,660.1 V² (1,022.9～9,072.2 V²) で、無損傷コンクリート (1,351.7 V²) の 3.4 倍であった。ひずみ 0～200 μ 区間では、平均 1,293.3 V² であり、無損傷コンクリート (0.7 V²) と比較して、載荷初期において顕著に AE エネルギーが放出された。重心ひずみエネルギーは平均 12.7 J (2.9～33.5 J) であり、無損傷コンクリートの 9.7 J と比較して 1.8 倍であった。これらの結果は、低ひずみ段階での圧縮破壊の進行を意味するものである。採取したコンクリート・コアの AE 特性を表 5.4.2 に示す。

AE 発生パターンは、載荷初期にのみ高頻度で AE が発生する場合 (Series A) とほぼ同頻度の AE が載荷過程中ほぼ均等に発生する場合 (Series B) に分類された。Series A は、Sample 1, 4, 7, 8, 9, 10, 11 で、Series B は Sample 2, 3, 5, 6 である。各シリーズの AE エネルギー特性を概観すると、Series B においては終局時に AE エネルギーの最大値が計測された (図 5.4.2)。特に Sample 2 と 3 では、無損傷コンクリートと同様に、載荷過程において AE エネルギー放出の明確なピーク点が計測された。一般的に凍害環境にあるコンクリート構造物では凍害損傷の影響が顕著になるものと考えられるが、AE エネルギー指標を援用することにより損傷実態を定量的かつ明確に評価することが可能になるものと推察される。Series A では、終局時に AE エネルギーの明確な最大値は検出されなかった。Series A を構成する Sample 4, 8, 10, 11 では載荷過程において一貫した AE エネルギーの放出が見られた。特に、Sample 4 と 10 では、載荷過程の進行に伴い AE エネルギー放出量の増加が見られた。Sample 8 と 11 では、100 μ 未満の範囲で AE エネルギーのピークが検出され、右肩下がりの AE エネルギー放出傾向であった。Sample 4, 10 および Sample 8, 11 は、同様の AE エネルギー放出の特徴を有していたが、力学特性は異なっていた。Sample 4 と 8 では、圧縮強度が 30.4 N/mm² と 35.4 N/mm² となり、耐久性を必要とする農業水利施設の基準値である 24 N/mm² を大きく上回る評価値であった。それに対して、Sample 10 と 11 では、20.0 N/mm² と 24.6 N/mm² となり、強度指標が低かった。重心ひずみエネルギーでは、Sample 4, 8 において 8.8～10.5 J を示し、標準コンクリートの基準値 5.8 J の 1.5～1.8 倍であった。これに対して、Sample 10, 11 では 4.2～5.8 J (標準コンクリート比較 : 0.7～1.0 倍) を示し、力学特性同様、重心ひずみエネルギーの値も低かった。

以上の結果、AE 発生頻度の観点から供試コンクリートは Series A と Series B の 2 種類に分類された。いずれも載荷初期から AE が検出され、特に Series B では第 4 章で検討した Type C と類似な AE 発生挙動が示された。

AE エネルギーを考慮した場合、最大ひずみが 500 μ 未満の Sample 1, 9 を除き、9 供試

体において特徴的な AE エネルギー発生割合の変化特性が見られた。Series B では、無損傷コンクリートと類似な AE エネルギー発生割合とひずみの関係が得られた。特に Sample 2 と 3 の圧縮強度は、 26.6 N/mm^2 と 25.9 N/mm^2 であることから、両供試体は力学特性と AE 指標の両面から無損傷状態と推察された。これに対して、Series A では載荷過程における一貫した AE エネルギー放出が見られた。特に Sample 7 では AE エネルギー特性と力学特性の観点から損傷蓄積が進行しているものと推察された。類似な AE 発生挙動においても AE エネルギー特性の異なる Sample 4 と 8 では、重心ひずみエネルギーと力学特性の指標から損傷蓄積は軽微であり無損傷に近い状態であると推察された。Sample 10, 11 では重心ひずみエネルギーが基準値 ($U_{30}=5.8 \text{ J}$) を下回る評価値を得たことから、AE エネルギー特性の観点から損傷蓄積が示唆された。

これらのことから、既往研究での AE 発生頻度によるコンクリート損傷度評価⁴⁾では、明確でなかった無損傷コンクリートとの相違を、AE エネルギーの放出特性により判別することが可能になるものと考えられる。

表 5.4.1 力学特性一覧 (Case 2, n=11)

圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ^{*2}	P 波速度 (m/s)
24.0 [16.6~35.4]	1,245 [100~3,075]	20.0 [5.3~39.2]	20.1 [8.6~40.3]	24.1 [1.7~63.6]	5.0 [1.6~15.7]	3,827 [3,105~4,322]

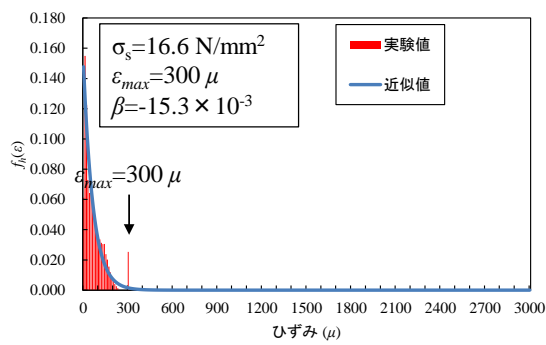
*1 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。

*2 応力 - ひずみ曲線の不具合により算出されたエラー値は除く

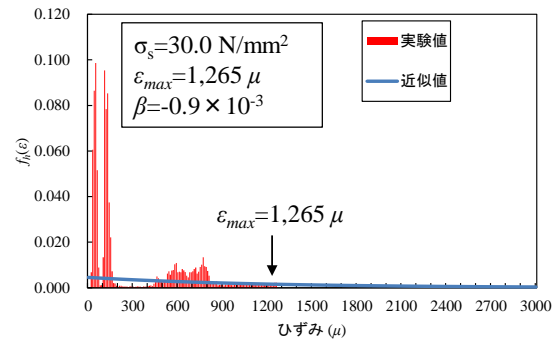
表 5.4.2 AE パラメータ特性一覧 (Case 2, n=11)

総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V^2)	累積 AE エネルギー (0~200 μ) (V^2)	重心ひずみ エネルギー (J)
19,800 [5,245~41,016]	7,391 [2,427~21,576]	-2.6 [-15.3~+0.3]	4,660.1 [1,022.9~9,072.2]	1,293.3 [6.1~6,663.3]	12.7 [2.9~33.5]

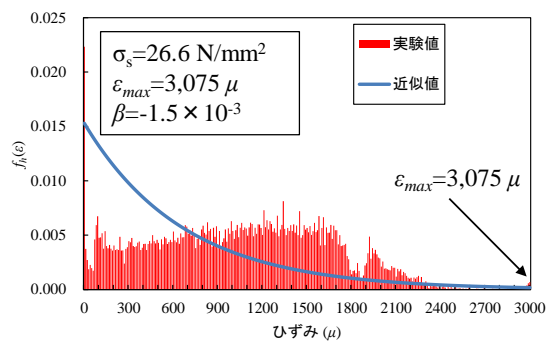
* 表中の数値は平均値 [最小~最大] を示す。



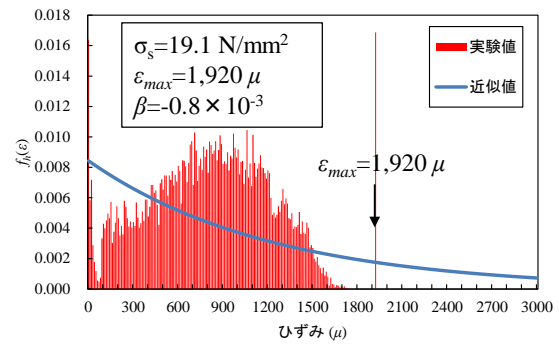
(a) Sample 1



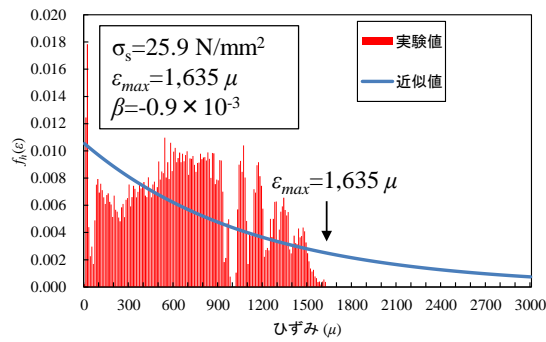
(d) Sample 4



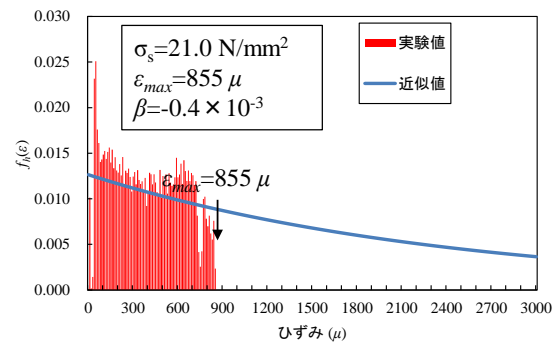
(b) Sample 2



(e) Sample 5

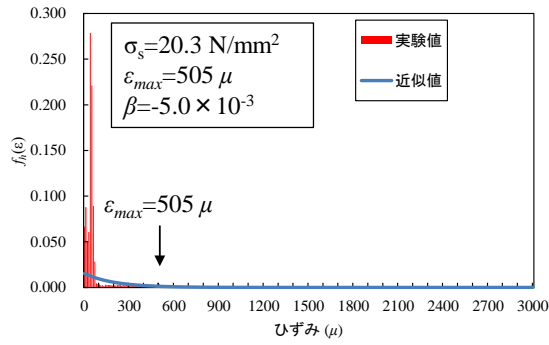


(c) Sample 3

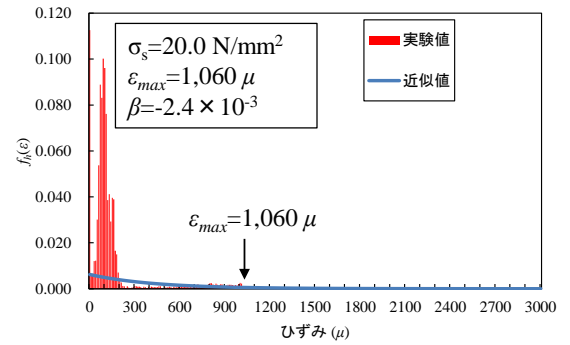


(f) Sample 6

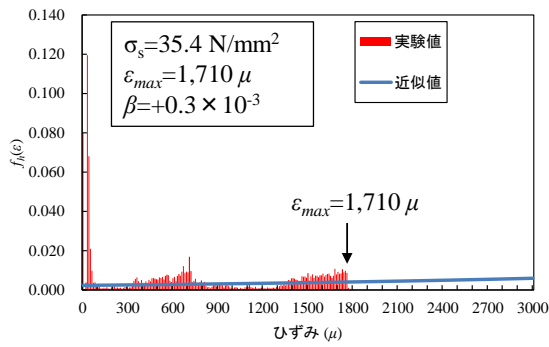
図 5.4.1 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 2)



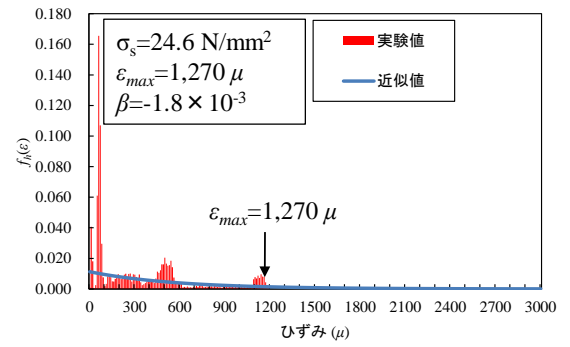
(g) Sample 7



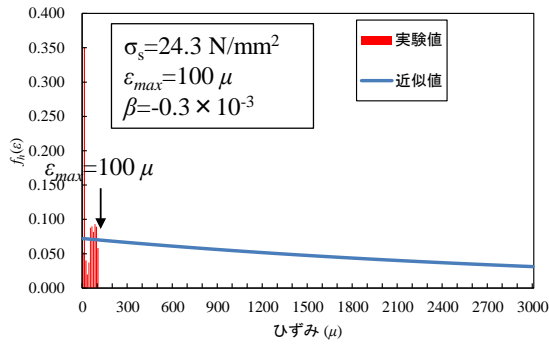
(j) Sample 10



(h) Sample 8

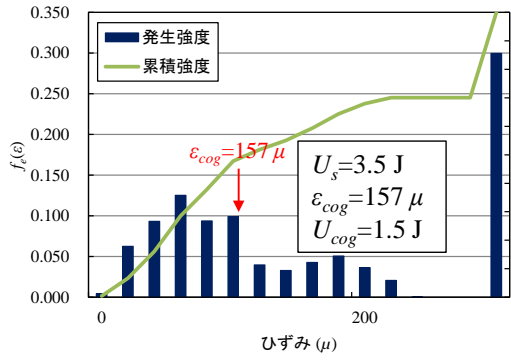


(k) Sample 11

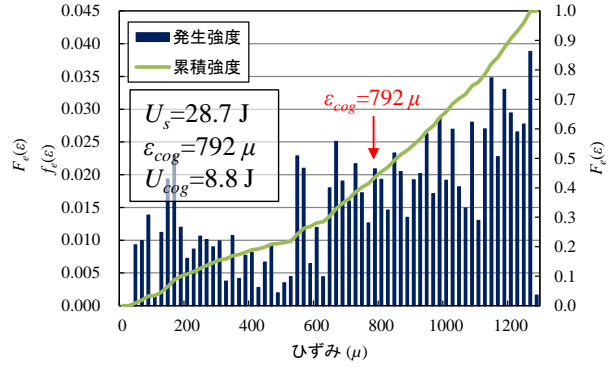


(i) Sample 9

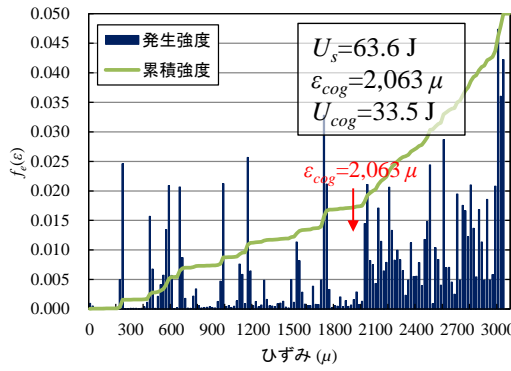
図 5.4.1 (続) AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 2)



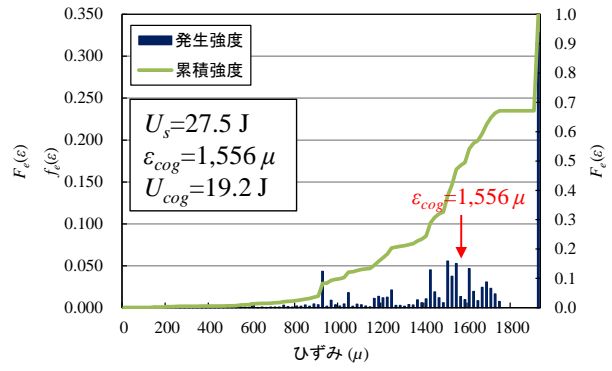
(a) Sample 1



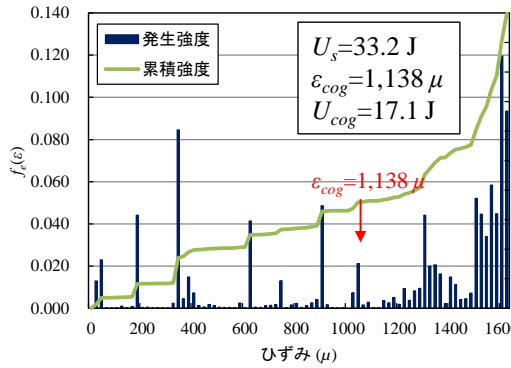
(d) Sample 4



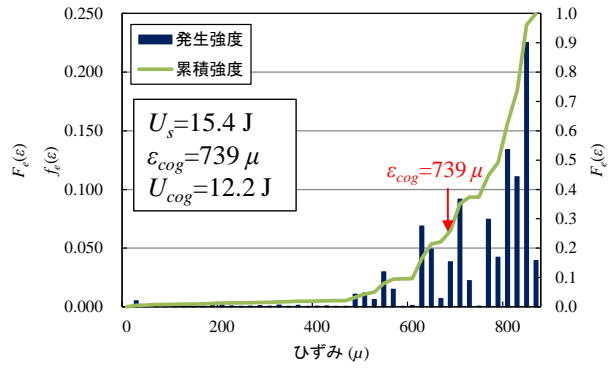
(b) Sample 2



(e) Sample 5

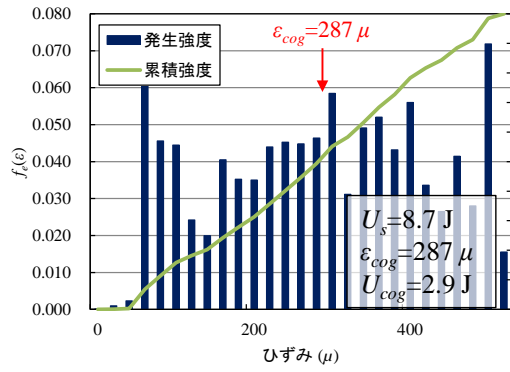


(c) Sample 3

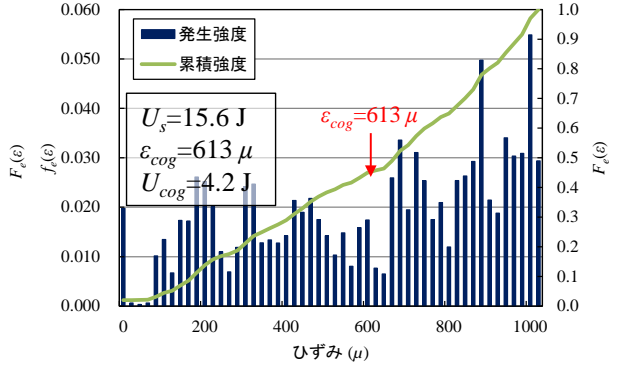


(f) Sample 6

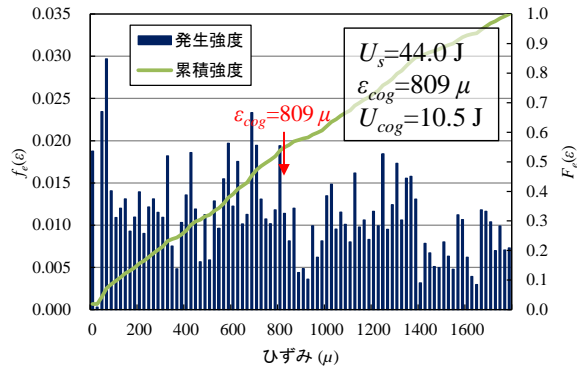
図 5.4.2 AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 2)



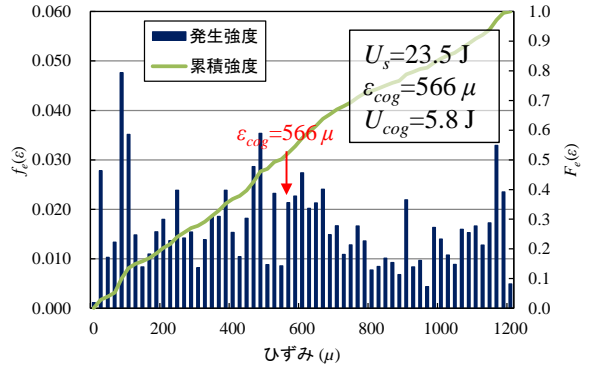
(g) Sample 7



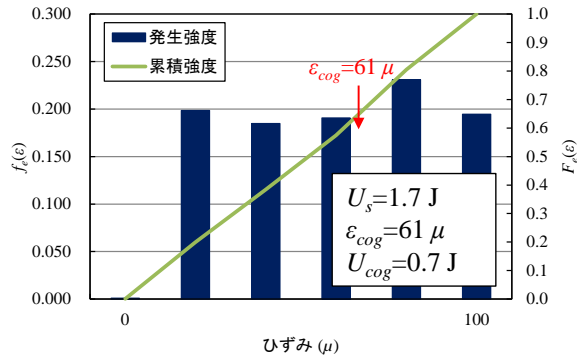
(j) Sample 10



(h) Sample 8



(k) Sample 11



(i) Sample 9

図 5.4.2 (続) AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 2)

(3) 定性的損傷度評価

Sample 1 および 9 を除き、9 供試体について定性的損傷度評価を試みた。定性的損傷度評価結果を表 5.4.3 に、重心ひずみエネルギー U_{cog} と圧縮強度 σ_s の関係を図 5.4.3 に示す。図中の無損傷は、図 5.3.5 と同様、第 4 章において実験的に検討した無損傷コンクリートの平均値 ($\sigma_s=28.4 \text{ N/mm}^2$, $U_{cog}=9.7 \text{ J}$) である。

検討の結果、2 供試体が損傷、2 供試体が中間的損傷_A、1 供試体が中間的損傷_B に区分された。残る 4 供試体は無損傷に区分された。Sample 2, 3, 4, 8 では、圧縮強度と重心ひずみエネルギーが閾値を上回る評価値を得たことから無損傷に区分された。力学特性を無損傷コンクリートの平均値 (表 5.4.3, No. N) や標準コンクリート (表 5.4.3, No. S) と比較した場合、圧縮強度や重心ひずみエネルギーに明確な低下傾向は見られなかったが、AE 指標であるひずみ $0\sim 200 \mu$ 区間の累積 AE エネルギーや AE 発生頻度において損傷蓄積が示唆された。また、図 5.4.1 の AE 発生頻度では、Sample 8 を除き、いずれの供試体においても $\beta < 0.0$ となり、損傷蓄積が示唆された。

これらのことから、Sample 2, 3, 4, 8 は圧縮強度の低下による明瞭な損傷蓄積は進行していないが、凍害環境である設置環境を考慮した場合、コンクリート表層に微細ひび割れが蓄積し、AE パラメータが無損傷コンクリートと比較して変質したものと推察される。

重心ひずみエネルギーや圧縮強度の低下により、損傷ないし中間的損傷に区分された Sample 5, 6, 7, 10, 11 では、 β が全て $\beta < 0.0$ となり損傷蓄積が示唆された。一方、空隙およびモルタル部の X 線 CT 試験より求めた CT 値は、Sample 5, 6, 7, 10, 11 において平均 1,414 (1,698~1,820) であったのに対して、Sample 2, 3, 4, 8 では平均 1,819 (1,689~1,916) であり、CT 値からも前者の損傷蓄積が示唆された。

これらのことから、力学特性の変質には至っていないが、載荷初期における AE 発生挙動の変質から、微細損傷の蓄積を評価できることが明らかになった。その場合、定性評価に加えて、AE 指標を活用することにより微細損傷の有無を詳細に分析することが可能であり、定性評価精度の向上が可能になるものと推察される。

表 5.4.3 定性的損傷度評価・判定一覧 (Case 2)

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	最大 ひずみ (μ)	累積 AE エネ ルギ (V ²) (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	U_{cog} (J)	目視 (ひび割れ)	損傷判定指標*1		評価*3
							力学 σ_s	AE U_{cog}	
1	16.6	300	-	-	-	無	-	-	エラー
2	26.6	3,075	6.1	-15.3	33.5	無	無	β のみ	4
3	25.9	1,635	130.1	-1.5	17.1	無	無	β のみ	4
4	30.0	1,265	871.1	-0.9	8.8	無	無	β のみ	4
5	19.1	1,920	6.9	-0.9	19.2	無	有	β のみ	2
6	21.0	855	13.0	-0.8	12.2	無	有	β のみ	2
7	20.3	505	1,771.1	-5.0	2.9	無	有	有	1
8	35.4	1,710	1,419.5	+0.3	10.5	無	無	無	4
9	24.3	100	-	-	-	無	-	-	エラー
10	20.0	1,060	767.3	-2.4	4.2	無	有	有	1
11	24.6	1,270	1,525.2	-1.8	5.8	無	無	有	3
N*4	28.4	2,147	0.7	+1.5	9.7	無	無	無	4
S*5	24.0	2,000	-	+	5.8	-	無	無	4

*1 表中のハッチングは損傷判断項目 ($\sigma_s < 24\text{N/mm}^2$ 未満, $\beta < 0.0$, $U_{\text{cog}} < 5.8\text{J}$)

*2 朱書きはエラー項目 (条件: $\varepsilon = 500\mu$ 未満), *3 損傷: 1, 中間的損傷_A: 2, 中間的損傷_B: 3, 無損傷: 4

*4 N: 無損傷コンクリート平均値, *5 S: 標準コンクリート

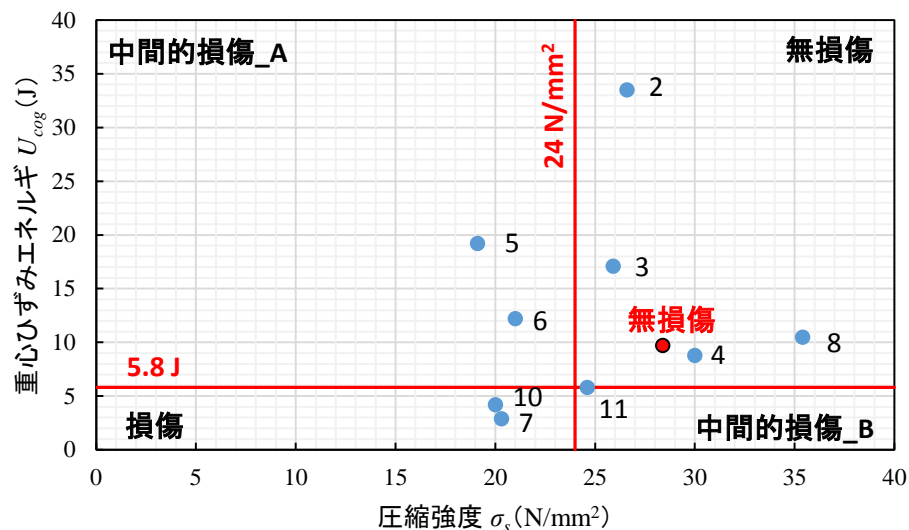


図 5.4.3 定性的損傷度評価 (Case 2, 無損傷コンクリート (平均値))

5.5 既設道路施設より採取したコンクリート・コアの損傷度評価

5.5.1 供試体

実験的検討は，更新工事の際に発生した道路橋 RC 床版（以下，コンクリート・ブロックと記す）から一片（ $3.0\text{m} \times 3.0\text{m} \times 0.68\text{m}$ ）を切り出し，コンクリート・コア（ $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ ）を採取して行った（図 5.5.1）．検討目的は，通常の供用環境における損傷蓄積と物性低下，AE パラメータの関係を明らかにすることである．

対象とした既設コンクリート道路橋は，大正 7 年（1918）に竣工した施設である．コンクリート・ブロック切り出し時点で 87 年が経過し，鉄筋腐食が顕在化していた．なお，建設当初の試験値や示方配合は残存する資料が確認できなかったことから不明である^{5), 6)}．



(a) 本研究に供試したコンクリート・ブロック



(b) コンクリート・ブロックの断面状況



(c) コンクリート・コアの採取状況



(d) 中性化試験後の呈色反応

図 5.5.1 供試コンクリート・ブロック概要

5.5.2 実験・解析方法

14本のコンクリート・コアを採取し、破壊試験を実施する前に透過法による超音波伝播速度を行った。圧縮強度試験にはAE計測を導入した。AE計測方法は、第3章3.2.2(2)と同一である。

5.5.3 実験結果・考察

(1) コンクリート・コアの力学特性と損傷実態

供試したコンクリート・コアの試験結果を表5.5.1に示す。圧縮強度は平均 15.0 N/mm^2 ($7.0\sim 26.1\text{ N/mm}^2$)であり、14供試体中11供試体で 18 N/mm^2 を下回った。圧縮強度 18 N/mm^2 は、道路橋示方書・同解説⁷⁾において無筋コンクリート部材の最低設計基準強度であり、鉄筋コンクリート部材の最低設計基準強度は 21 N/mm^2 とされている。土地改良事業計画設計基準・設計「農道」⁸⁾においても、道路橋示方書・同解説と同様、主要構造物の鉄筋コンクリート部材は設計基準強度 21 N/mm^2 とされている。これらの基準強度と試験値を比較した結果、圧縮強度の観点からは、大多数の供試体において強度が低下傾向にあるものと推察された。建設当初の圧縮強度の記録が現存していないことから損傷実態を圧縮強度から断定することは困難であるが、供試したコンクリート・ブロックには目視で確認できるほどのひび割れ損傷は進展していなかった。

圧縮強度以外の試験値は、最大ひずみが平均 $2,585\mu$ ($1,881\sim 3,487\mu$)であり、コンクリートの圧縮破壊時の標準的な最大ひずみである $2,000\mu$ 近傍の評価値を得た。ひずみエネルギーは、標準コンクリートの 37.7 J の 79.8% にあたる平均 30.1 J ($16.3\sim 55.8\text{ J}$)だった。損傷力学指標 λ は平均 1.4 ($1.0\sim 2.4$)だった。P波速度は平均 $3,446\text{ m/s}$ ($2,860\sim 4,040\text{ m/s}$)であり、コンクリートの標準値である $4,000\text{ m/s}$ より、やや低い評価値だった。

以上より、供試したコンクリート・ブロックは、一般車道におけるコンクリート床版であったことから、供用期間中の衝撃荷重による微弱な損傷蓄積が推察され、コア供試体の力学特性もそのことを裏付けるものであると推察された。

(2) 圧縮載荷過程のAE発生挙動とその特性

AEパラメータ特性を表5.5.2に示す。載荷初期 $0\sim 200\mu$ 区間のAE発生頻度は平均値344ヒットであり、5.3や5.4で検討した凍害コンクリートの約5%程度の少ない発生頻度だった。その際、載荷初期 $0\sim 200\mu$ での累積AEエネルギーは平均 1.4 V^2 ($0.002\sim 5.0\text{ V}^2$)であり、凍害コンクリートで確認された $1,066.3\sim 1,293.3\text{ V}^2$ (平均値)と比較して約0.1%程度の極めて少ないエネルギー放出量に留まっていた。 β は全ての供試体で正値となり、AEパラメータからは明確な損傷蓄積は確認されなかった。重心ひずみエネ

ルギは、平均 23.4J (12.9～41.7J) であり、無損傷コンクリートの評価値である 9.7J (平均値) の 2.4 倍となった。AE 発生頻度の詳細を図 5.5.2 に示し、AE エネルギー特性を図 5.5.3 に示す。

AE 発生頻度は、いずれの供試体も終局時に増加した。発生した AE のエネルギー値の平均値は 0.014～0.114 V²/hit であり、無損傷コンクリートで検出された 0.018～0.082 V²/hit とほぼ同程度であった。AE エネルギー特性も無損傷コンクリートと同様、AE エネルギー放出のピーク値が載荷過程において検出された。

これらのことから、Case 3 では、AE パラメータから明確な損傷蓄積は見られず、圧縮強度のみが設計基準値 (=24 N/mm²) に対して総体的に低い値 (平均 15.0 N/mm²) であることが明らかになった。道路橋条件で 87 年経過した部材ではあるが、顕著に損傷蓄積が進行したコンクリート材料ではないものと推察される。同様な事例として、明治 29 年から小樽港において開始されたコンクリート耐久性試験においても、長期供用に伴う顕著な損傷蓄積は見られていない⁹⁾。一般的にコンクリート部材の損傷蓄積は、長期供用により進行すると考えられるが、建設当初のコンクリート材質と供用条件が十分に耐久的なものであれば、本 Case 3 や小樽港の事例のように顕著な損傷進行が顕在化しないものと推察される。

表 5.5.1 力学特性一覧 (Case 3, n=14)

圧縮強度 (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)	ひずみ エネルギー (J)	λ ^{*2}	P 波速度 (m/s)
15.0 [7.0～26.1]	2,585 [1,881～3,487]	10.5 [3.9～17.5]	6.0 [2.1～9.6]	30.1 [16.3～55.8]	1.4 [1.0～2.4]	3,446 [2,860～4,040]

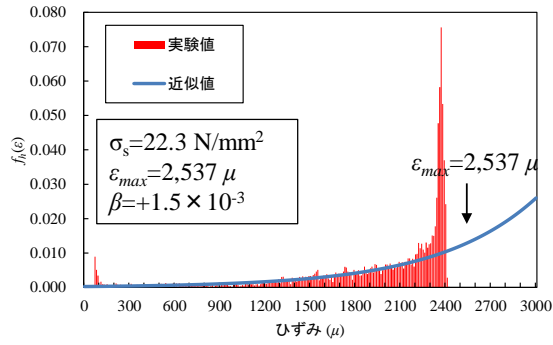
*1 表中の数値は平均値 [最小～最大] を示す。

*2 応力 - ひずみ曲線の不具合により算出されたエラー値は除く

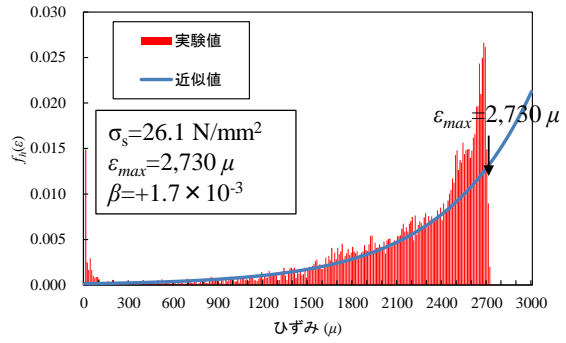
表 5.5.2 AE パラメータ特性一覧 (Case 3, n=14)

総 AE ヒット	累積 AE ヒット (0～200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	総 AE エネルギー (V ²)	累積 AE エネルギー (0～200 μ) (V ²)	重心ひずみ エネルギー (J)
10,308 [4,611～19,390]	344 [6～596]	+1.4 [+0.8～+2.0]	238.9 [31.5～588.6]	1.4 [0.002～5.0]	23.4 [12.9～41.7]

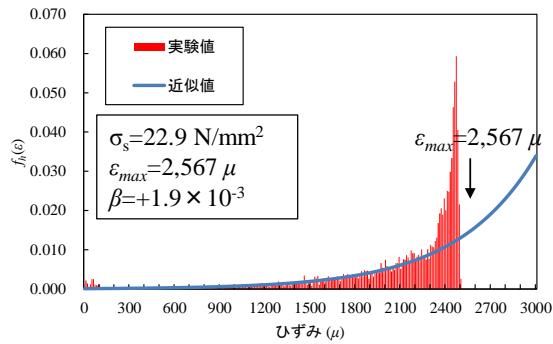
* 表中の数値は平均値 [最小～最大] を示す。



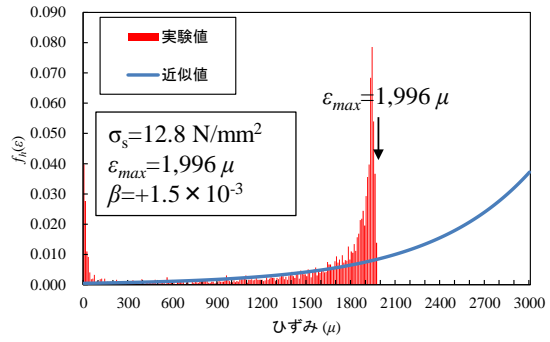
(a) Sample 1



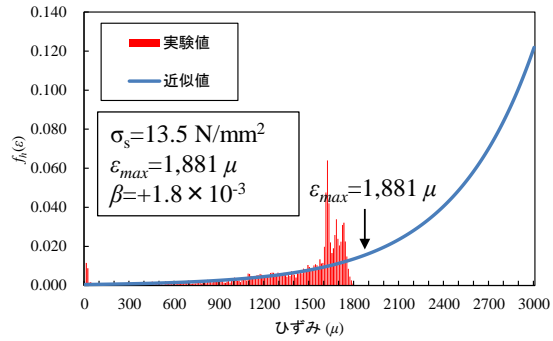
(d) Sample 4



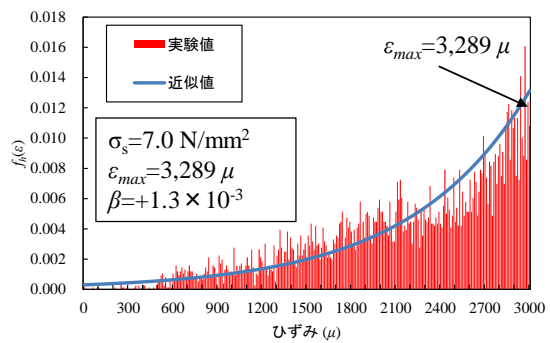
(b) Sample 2



(e) Sample 5

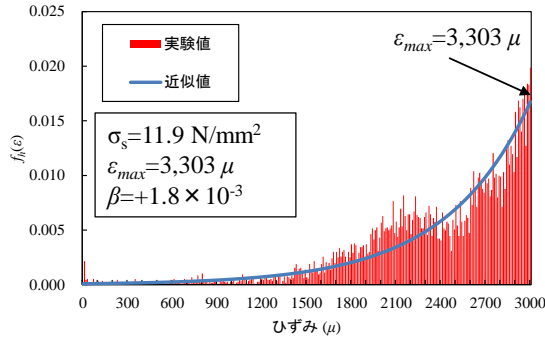


(c) Sample 3

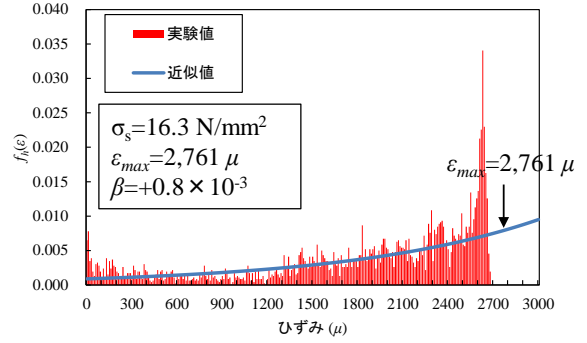


(f) Sample 6

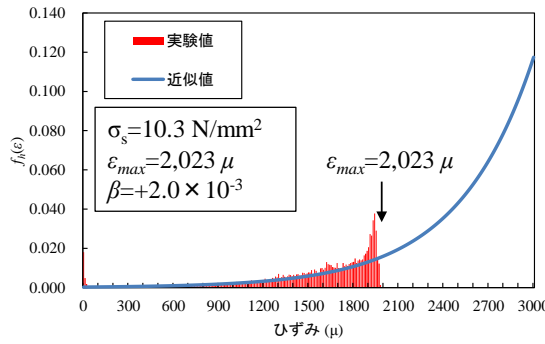
図 5.5.2 AE 発生頻度割合 $f_h(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 3)



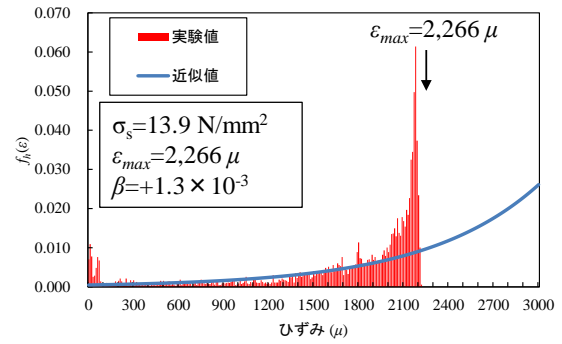
(g) Sample 7



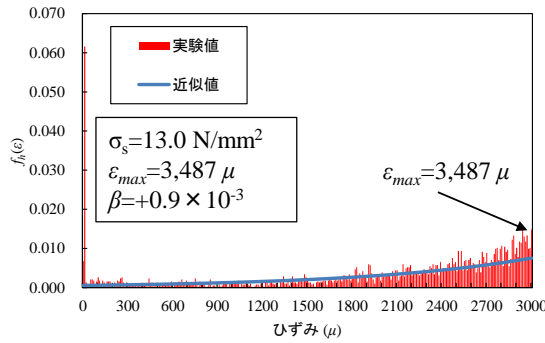
(k) Sample 11



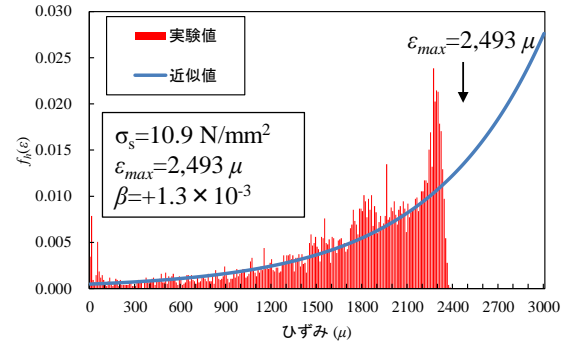
(h) Sample 8



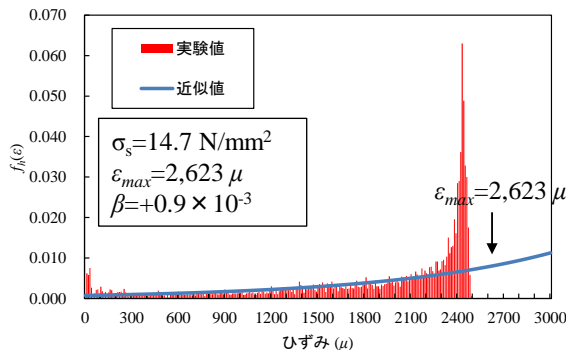
(l) Sample 12



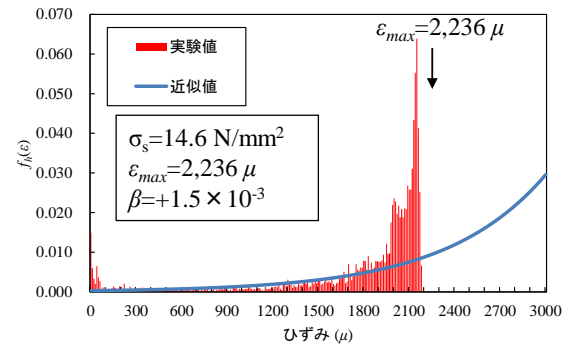
(i) Sample 9



(m) Sample 13

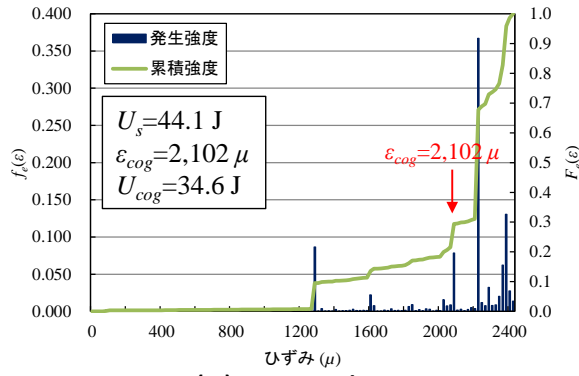


(j) Sample 10

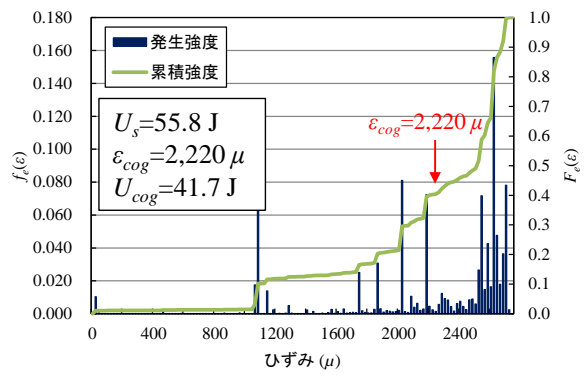


(n) Sample 14

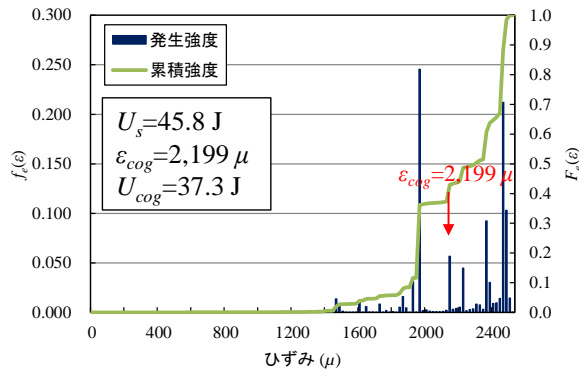
図 5.5.2 (続) AE 発生頻度割合 $f_h(\epsilon)$ とひずみの関係 (Case 3)



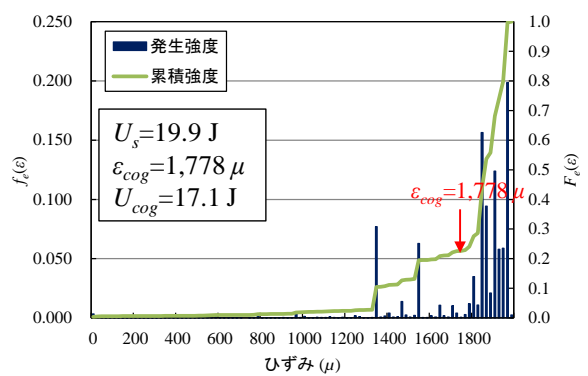
(a) Sample 1



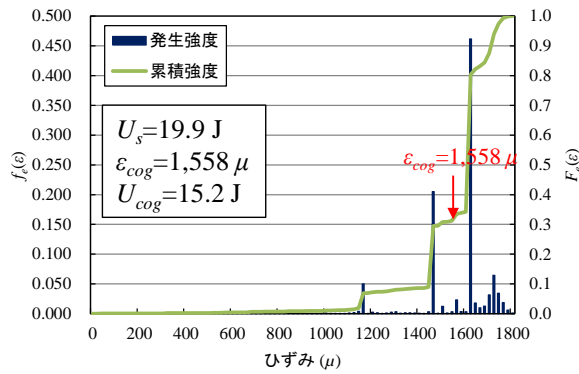
(d) Sample 4



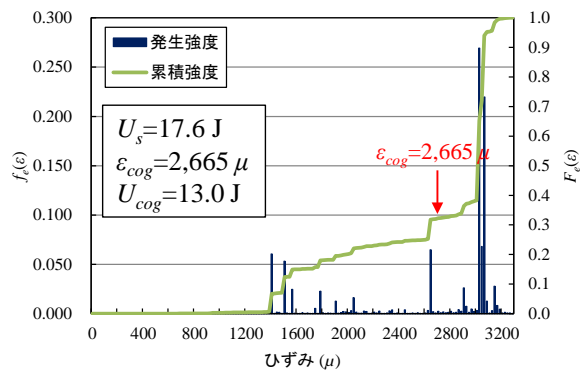
(b) Sample 2



(e) Sample 5

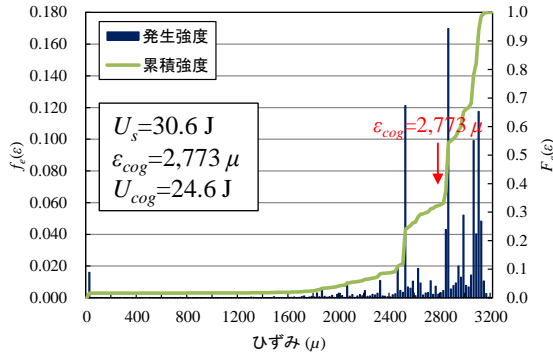


(c) Sample 3

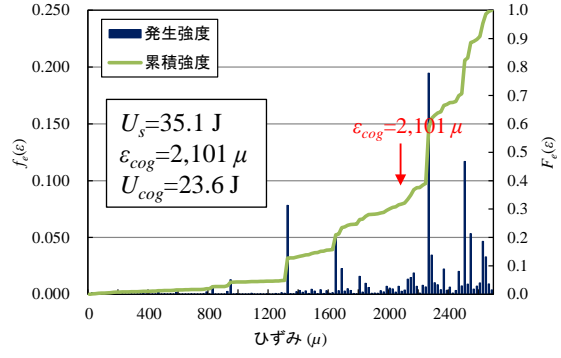


(f) Sample 6

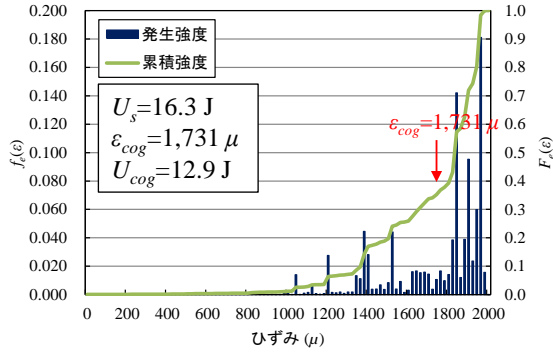
図 5.5.3 AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 3)



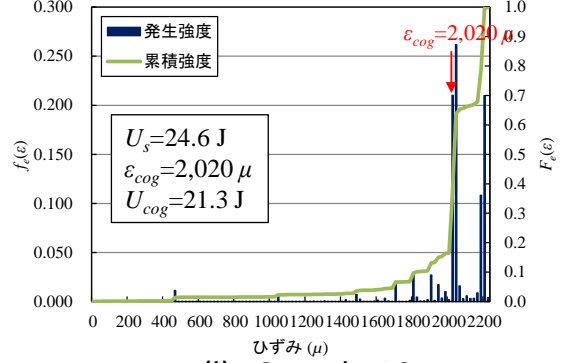
(g) Sample 7



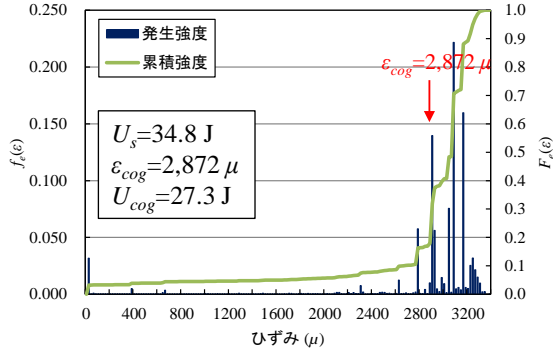
(k) Sample 11



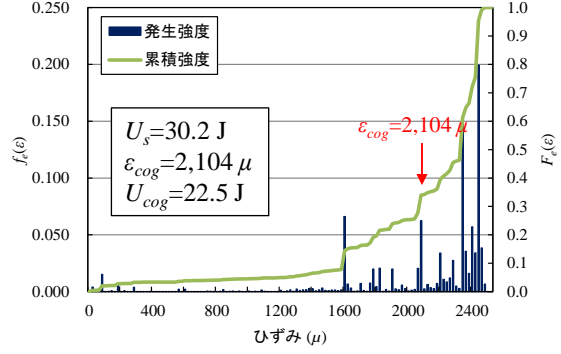
(h) Sample 8



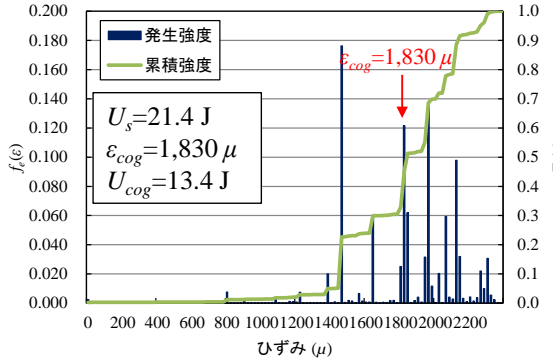
(l) Sample 12



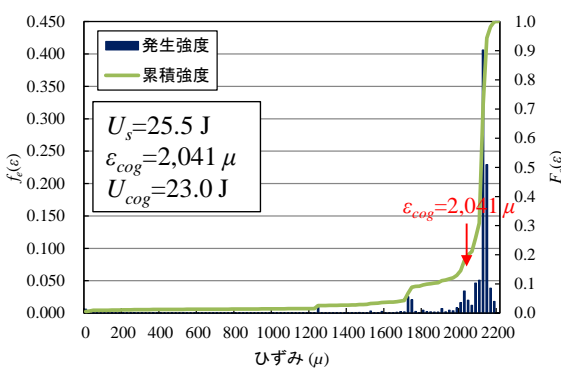
(i) Sample 9



(m) Sample 13



(j) Sample 10



(n) Sample 14

図 5.5.3 (続) AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係 (Case 3)

(3) 定性的損傷度評価

検討結果を表 5.5.3 に、重心ひずみエネルギーと圧縮強度の関係を図 5.5.4 に示す。図中の無損傷は、Case 1 および Case 2 と同様、無損傷コンクリートの平均値である。

検討の結果、最大ひずみが 500μ 未満の試験値のエラーは認められなかった。14 供試体の内、Sample 4 は無損傷に、他のすべての供試体は中間的損傷_A に区分された。図 5.5.4 から、圧縮強度と重心ひずみエネルギーの間に正の相関が見られた。AE エネルギー特性には、無損傷コンクリートと類似な載荷過程の終局時に顕著な AE エネルギー放出が見られた（図 5.5.3）。圧縮強度は $7.0\sim 26.1\text{ N/mm}^2$ であり、鉄筋コンクリート構造物として十分な強度を有しているとは言い難いが、AE パラメータの観点からは明確な損傷蓄積は検出されなかった。

この背景には、損傷コンクリートの破壊靱性と AE エネルギーとの関係が影響しているものと推察される。靱性 (toughness) とは、材料が有しているねばり強さ、すなわち外力に抗して破壊しにくい性質である。損傷を内在したコンクリートでは、損傷蓄積が進行した高強度の供試体ほど無損傷状態からの破壊強度（本研究では、圧縮強度）の低下が顕著となる¹⁰⁾。その際、材料の破壊過程において発生する AE と応力拡大係数などの破壊力学指標とは既往研究^{11), 12)}から密接に関連していることが指摘されている。終局時に AE エネルギー放出が顕著に認められることは、損傷蓄積と現有耐力との相互作用下にある供試コンクリートの破壊靱性が終局時においても発揮されていると考えられる。十分な破壊靱性を有する無損傷コンクリートでは、初期 AE エネルギー放出率が $0.0\sim 0.07\%$ であり、Case 3 では平均値が 0.89% であることから、無損傷コンクリートに近い特性を有すると考えられる。つまり Case 3 では、大部分の供試コンクリートは 24 N/mm^2 を下回ったため中間的損傷_A に区分されたが、顕著な損傷蓄積により力学特性を低下させたのではなく、建設当初から圧縮強度が低かったためと AE 指標の特徴量からは推察される。

以上のことから、圧縮強度はコンクリートの力学特性を評価する重要な指標であるが、載荷過程におけるひび割れの発生・発達の特徴を反映する AE エネルギーを考慮することにより確度の高い損傷度評価が可能になるものと推察される。一般的にひび割れ動態の破壊力学指標である応力拡大係数やエネルギー解放率を既存施設より採取したコンクリートで検出することは困難であり、本研究で提案した評価指標である初期 AE エネルギー放出率は損傷蓄積の検出・評価に有効であると考えられる。

表 5.5.3 定性的損傷度評価・判定一覧 (Case 3)

No.	圧縮強度 (N/mm ²)	最大 ひずみ (μ)	累積 AE エネ ルギ (V ²) (0~200 μ)	β ($\times 10^{-3}$)	U_{cog} (J)	目視 (ひび割れ)	損傷判定指標*1		評価*3
							力学 σ_s	AE U_{cog}	
1	22.3	2,537	0.4	+1.5	34.6	無	有	無	2
2	22.9	2,567	0.1	+1.9	37.3	無	有	無	2
3	13.5	1,881	0.2	+1.8	15.2	無	有	無	2
4	26.1	2,730	5.0	+1.7	41.7	無	無	無	4
5	12.8	1,996	0.3	+1.5	17.1	無	有	無	2
6	7.0	3,289	0.002	+1.3	13.0	無	有	無	2
7	11.9	3,303	3.0	+1.8	24.6	無	有	無	2
8	10.3	2,023	0.7	+2.0	12.9	無	有	無	2
9	13.0	3,487	3.8	+0.9	27.3	無	有	無	2
10	14.7	2,623	2.9	+0.9	22.5	無	有	無	2
11	16.3	2,761	0.3	+0.8	23.6	無	有	無	2
12	13.9	2,266	0.4	+1.3	21.3	無	有	無	2
13	10.9	2,493	1.3	+1.3	13.4	無	有	無	2
14	14.6	2,236	1.4	+1.5	23.0	無	有	無	2
N*4	28.4	2,147	0.7	+1.5	9.7	無	無	無	4
S*5	24.0	2,000	-	+	5.8	-	無	無	4

*1 表中のハッチングは損傷判断項目 ($\sigma_s < 24\text{N/mm}^2$ 未満, $\beta < 0.0$, $U_{\text{cog}} < 5.8\text{J}$)

*2 朱書きはエラー項目 (条件: $\varepsilon = 500\mu$ 未満), *3 損傷: 1, 中間的損傷_A: 2, 中間的損傷_B: 3, 無損傷: 4

*4 N: 無損傷コンクリート平均値, *5 S: 標準コンクリート

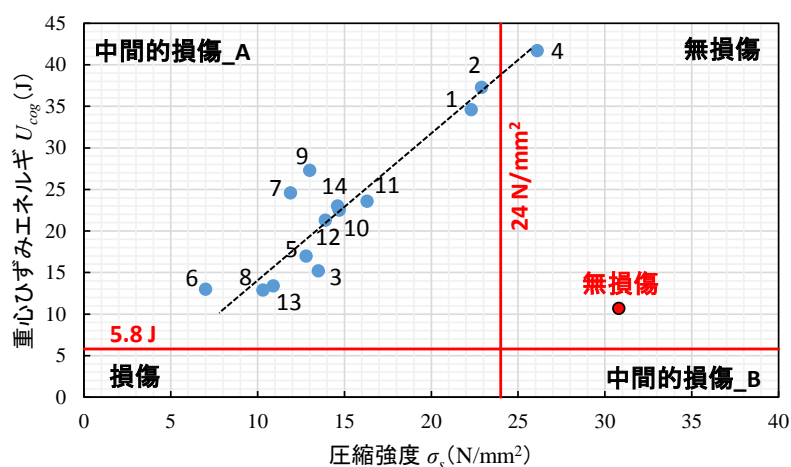


図 5.5.4 定性的損傷度評価 (Case 3, 無損傷コンクリート (平均値))

5.6 コンクリート損傷実態と定性的損傷度評価の関係

5.6.1 評価指標へ及ぼす損傷蓄積とコンクリート物性の関係

ここでは、第4章で定性的損傷度評価法構築の際に用いた9供試体を含めた全40供試体に関する定性的損傷度評価結果を取りまとめ、コンクリート物性値との比較検証を試みる。図5.6.1に評価結果を示す。供試体40本の内、最大ひずみが 500μ 未満である3本（Case 1：1本、Case 2：2本）を除き、評価区分の内訳は損傷7本、中間的損傷21本（区分A：18本、区分B：3本）および無損傷9本である。無損傷区分には、実験室内で打設した無損傷コンクリートに加えて、Case 2 および Case 3 で無損傷と評価された供試体が分類された。無損傷コンクリートの平均値は、圧縮強度 28.4 N/mm^2 、重心ひずみエネルギー 9.7 J である。無損傷区分に9本中の5本が分類されたCase 2 では、無損傷コンクリートの分布（図5.6.1 緑点線）を含む範囲に評価値を得た。ひび割れ損傷が顕在化したType A、Type B および Case 1 では、損傷や中間的損傷に分類された。ひび割れ損傷の確認されなかったCase 3 では、中間的損傷_A と無損傷に分類された。圧縮強度、最大ひずみおよび初期 AE エネルギー放出率を損傷度区分毎に評価した結果を図5.6.2～図5.6.4に示す。圧縮強度は、無損傷区分において平均 28.2 N/mm^2 であるのに対して、損傷区分では平均 11.5 N/mm^2 を示し、損傷蓄積に伴い約40.8%まで評価値が低下した。中間的損傷は、区分Aにおいて平均 14.7 N/mm^2 を示し、無損傷コンクリートの約52.1%であった。区分Bでは、区分Aとは異なり、無損傷コンクリートとほぼ類似な平均 27.8 N/mm^2 を示した。中間的損傷の区分Aと区分Bの顕著な相違は最大ひずみで見られた。区分Aの最大ひずみは平均 $2,247\mu$ であるのに対して、区分Bでは平均 922μ となり、区分Bが著しく脆性化していた。初期 AE エネルギー放出率を比較すると、区分Aが平均1.2%であるのに対して、区分Bが平均32.7%を示し、AE エネルギー放出の観点からも区分Bにおける脆性破壊の進行が示唆された。初期 AE エネルギー放出率の観点から各供試体を比較すると、無損傷区分では平均6.3%であるが、研究室内で打設した無損傷コンクリートのみを考慮した場合、平均0.02%を示し、無損傷区分に評価されたCase 2 や Case 3 と比較して著しく低い値を得た。この結果より、無損傷区分に判定されたCase 2 と Case 3 サンプルは、微弱だが損傷蓄積による AE エネルギー放出が確認されたものと推察される。損傷区分では、無損傷区分とは異なり、平均24.2%を示し、他の区分と比較して载荷初期に著しく AE エネルギーが放出された。中間的損傷では、前述の通り、区分Aと区分Bにおいて初期 AE エネルギー放出率の評価値が異なり、損傷実態の相違しているものと考えられる。

これらのことから、本研究により提案した定性的損傷度評価は、圧縮強度のみでは検出困難なコンクリートの損傷蓄積実態を定性的に評価できるものと考えられる。その際、初期 AE エネルギー放出率を考慮することにより、同一区分の供試体においても損傷蓄積の程度を定量的に検討できるものと考えられる。初期 AE エネルギー放出率の増加は、載

荷初期における AE エネルギーの放出の結果であり、供試材料の損傷蓄積に伴う破壊靱性の低下傾向を意味している。AE パラメータと破壊靱性との関係については、金属材料において数多くの試みが行われている。一例として Muto¹³⁾らはマグネシウム合金を対象にノッチを有するプレート供試体の 4 点曲げ破壊における微視的破壊形状と応力拡大係数、AE パラメータの関連を実験的に検証した。SEM により同定したマイクロクラック特性は、材質や応力拡大係数、AE パラメータとの密接な関連を明らかにしている。コンクリート工学分野においても破壊力学と AE の関連に関する指摘は多く^{14), 15)}、大塚¹⁶⁾はノッチを有するコンクリート・ブロックの引張り試験を実施し、AE と破壊力学指標の関連を実験的に明らかにしている。近年では、Ohno¹¹⁾による AE-SiGMA (第 2 章 2.4.2 (1)) によるコンクリート中のひび割れ進展の運動学的考察と破壊力学指標の関連が実験的に検証されるなど、モデル試験によるひび割れ進展の再現と破壊力学指標、AE パラメータの関連が実証的に検討されている。本研究対象である圧縮力を受けるコンクリートでは、粗骨材とモルタルの界面（遷移帯）において複雑な破壊挙動を示し、各種モードの異なる破壊運動が進展する¹⁷⁾。このことから、圧縮応力場においては、破壊力学指標である応力拡大係数やエネルギー解放率を高精度で試験・評価することは困難である。しかし、マクロな破壊靱性に関する指標として、破壊現象起源の弾性波を検出する AE 法によるエネルギー特性の評価は、有用性の高い方法であることが既往研究により明らかにされている^{10), 18), 19)}。このことから、本研究により提案した初期 AE エネルギー放出率も説明力のある AE パラメータの一つであると考えられる。

そこで、初期 AE エネルギー放出率と重心ひずみエネルギーの関係を考察する (図 5.6.5, 図 5.6.6)。図 5.6.5 より無損傷コンクリートの初期 AE エネルギー放出率の平均値は、既存施設より採取したコンクリート・コアと比較して顕著に低かった。定性的損傷度評価で無損傷区分と判定された Case 2 および Case 3 の供試体は、無損傷コンクリートとは異なり、中間的損傷_A 近傍に平均値が評価された。このことから、既存施設より採取されたコンクリート・コアにおいては、無損傷に区分された供試体でも、初期 AE エネルギー放出率が比較的高い場合には、微弱な損傷があると考えられる。初期 AE エネルギー放出率と重心ひずみエネルギーの関係には負の相関 ($R^2=0.610$) が認められた (図 5.6.5)。加えて、図 5.6.6 に示す全供試コンクリートに関するひずみエネルギーと重心ひずみエネルギーの関係において正の相関 ($R^2=0.620$) が認められた。標準コンクリートのひずみエネルギーである $U_{100}=37.7 \text{ J}$ を基準にひずみエネルギーと初期 AE エネルギー放出率の関係を概観すると、同一ひずみエネルギーにおいても無損傷区分と損傷区分 (中間的損傷区分を含む) とで初期 AE エネルギー放出率が異なり、力学特性のみでは評価できない損傷蓄積を本 AE 指標により検討可能であることが明らかになった。

以上のことから、既存技術では圧縮強度に代表される力学特性のみで損傷状況が評価されることが多いが、提案手法である定性的損傷度評価に加えて AE エネルギー指標を用いることで、コンクリートの損傷実態を考慮した試験精度の向上が可能になると考えられる。

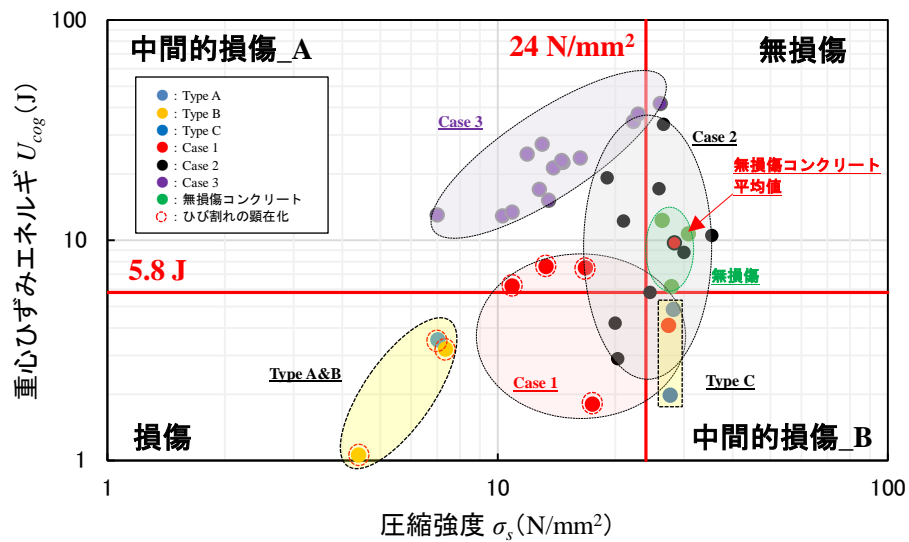


図 5. 6. 1 定性的損傷度評価（全サンプル）

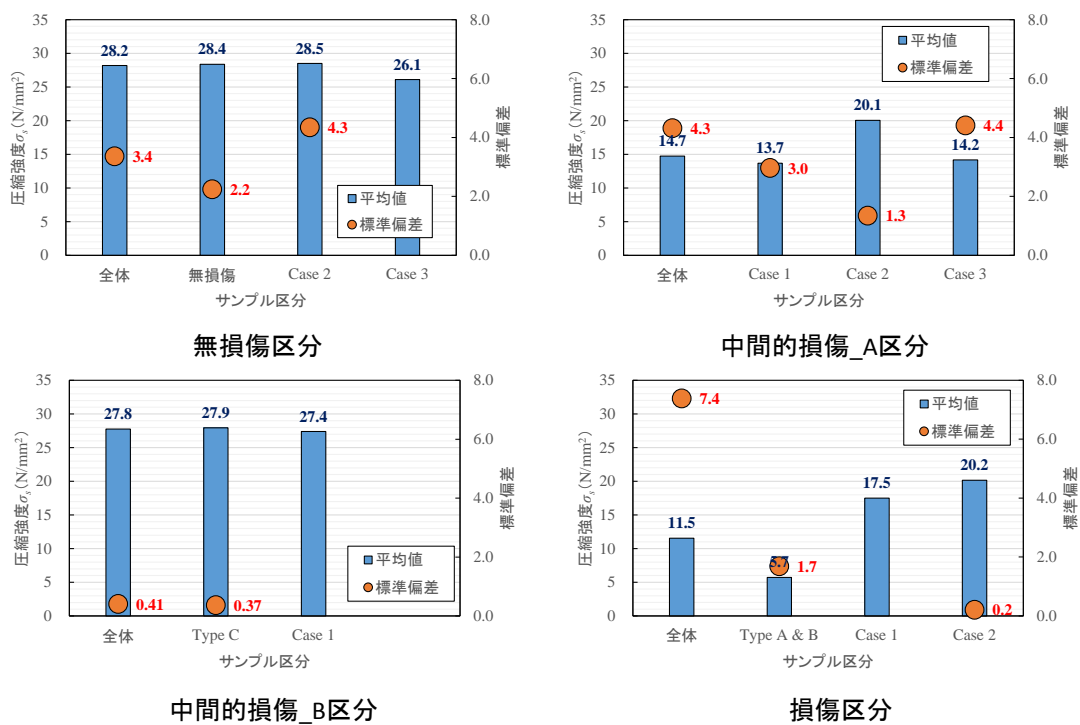


図 5. 6. 2 圧縮強度 σ_s 一覧

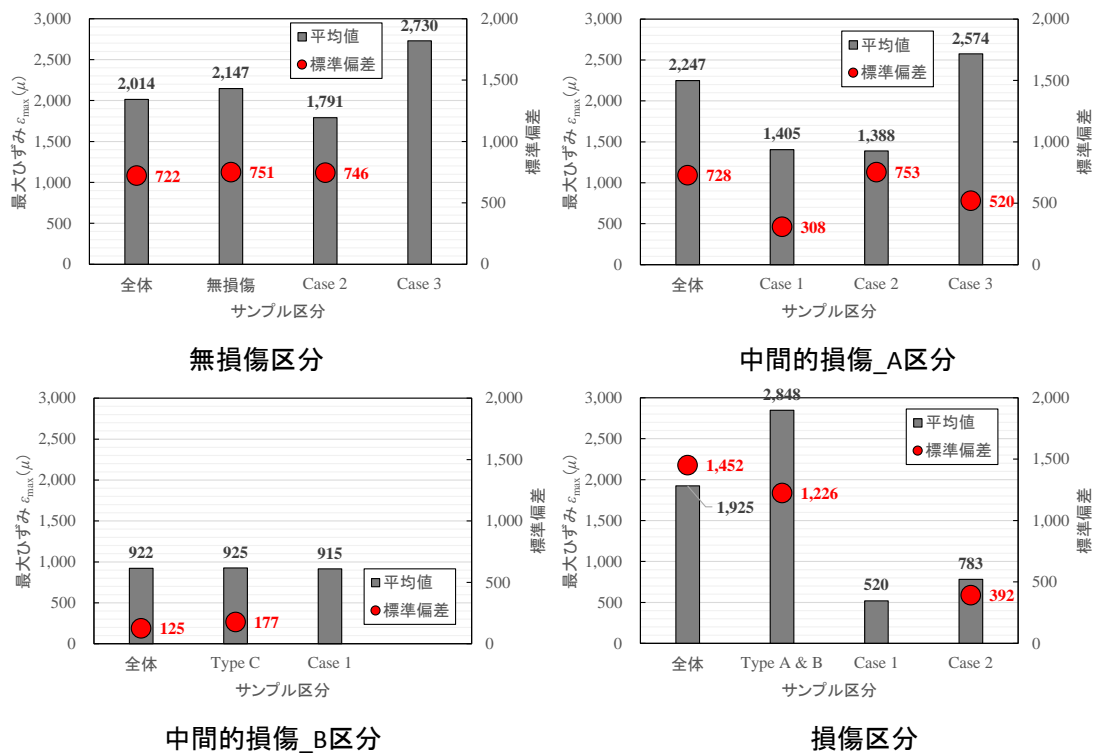


図 5.6.3 最大ひずみ ε_{max} 一覧

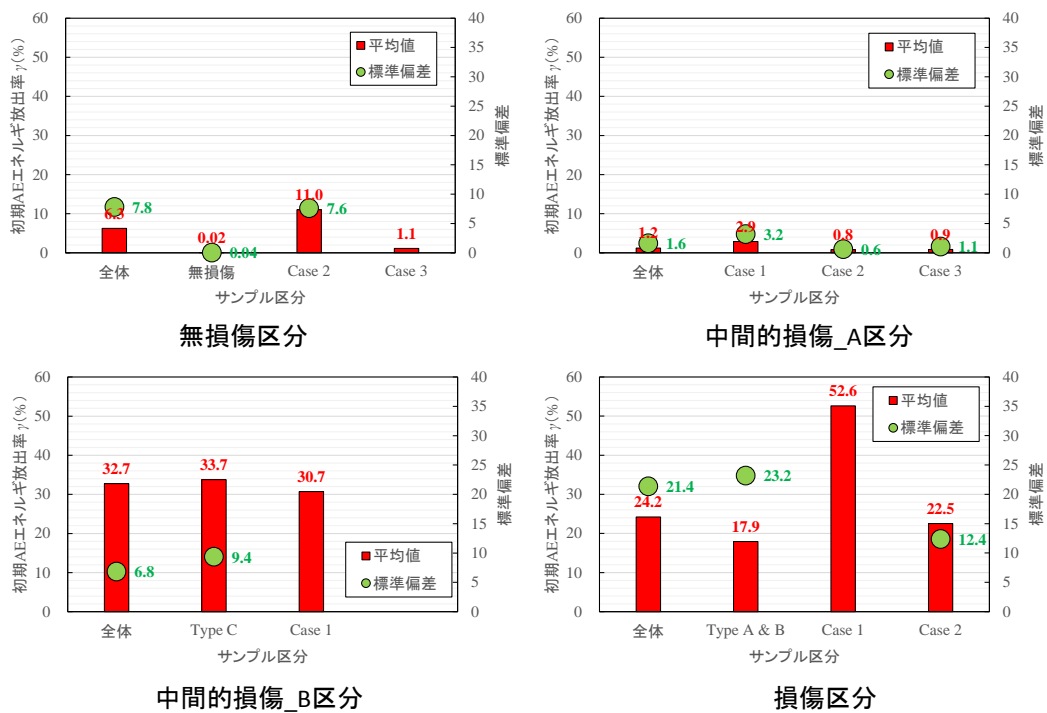


図 5.6.4 初期 AE エネルギー放出率 γ 一覧

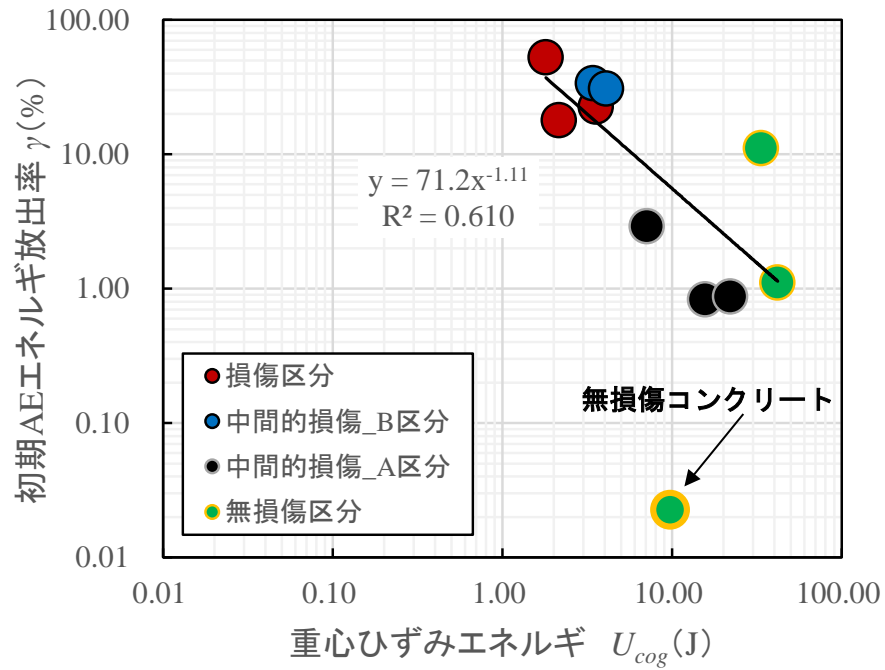


図 5.6.5 初期 AE エネルギー放出率 γ と重心ひずみエネルギー U_{cog} の関係 (平均値)

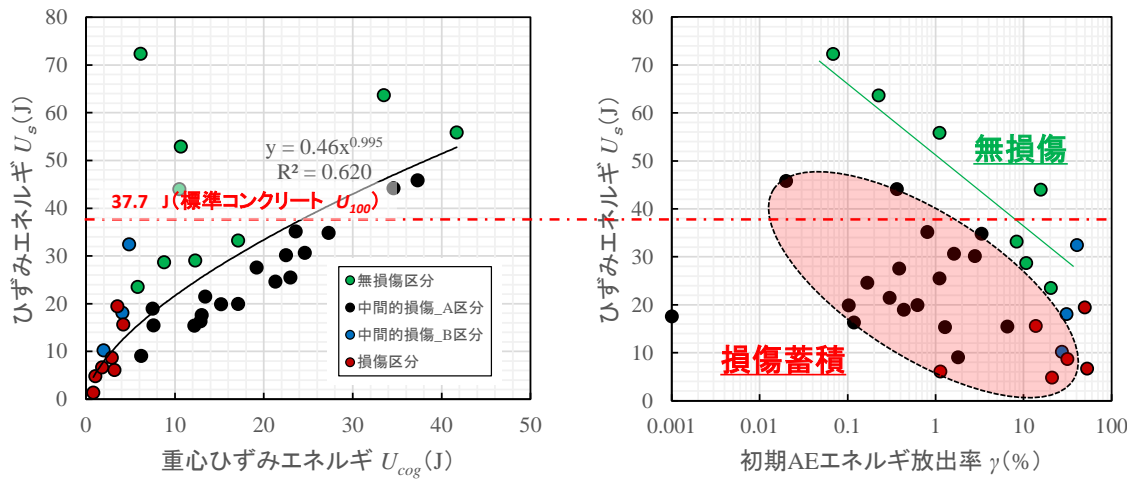


図 5.6.6 ひずみエネルギー指標 U_s , U_{cog} と初期 AE エネルギー放出率 γ の関係

5.6.2 定性的損傷度評価区分と AE エネルギー指標の関係

そこで、定性的損傷度評価の区分ごとに AE エネルギー発生割合、AE 発生頻度割合および初期 AE エネルギー放出率について特徴量を検討し、損傷蓄積を有するコンクリートの AE エネルギー特性と定性評価との関連性を考察する。

(1) 無損傷区分

定性的損傷度評価において無損傷と判定された供試体は、無損傷コンクリート:3 本、Case 2:5 本、Case 3:1 本である。定性的損傷度評価における無損傷区分の閾値は、標準コンクリートの圧縮強度と重心ひずみエネルギーとが共に標準値以上である。

実験的検討の結果、図 5.6.5 に示す初期 AE エネルギー放出率と重心ひずみエネルギーの関係から、実験室内で打設した無損傷コンクリートと既存施設より採取されたものでは顕著な初期 AE エネルギー放出率の相違が見られた。類似な強度特性を有する無損傷区分のコンクリート・コアに関する AE エネルギー発生割合と AE 発生頻度割合を図 5.6.7 に示す。同図より、無損傷コンクリートでは載荷過程における各圧縮破壊に起因する鋭い AE エネルギー放出のピークが見られた (図 5.6.7 (a))。無損傷区分に分類された Case 2 (図 5.6.7 (b)) と Case 3 (図 5.6.7 (c)) のコンクリート・コアは、載荷初期から AE エネルギーの放出が見られた。特に Case 2 では、一連の載荷過程において多数の AE エネルギー放出のピークが見られた。AE 発生頻度割合においては、既往研究²⁰⁾と同様、無損傷コンクリートと Case 3 において、終局に AE 発生頻度の増加が見られた (図 5.6.7 (d), (f))。一方、Case 2 では載荷初期に高頻度の AE が見られた (図 5.6.7 (e))。AE エネルギーの急激な増加が見られなかったことから、微弱な二次 AE が多数検出されたものと推察され、AE 発生頻度の観点からも図 5.6.5 に示す Case 2 における初期 AE エネルギー放出率の増加傾向を裏付ける結果となった。

これらのことから、無損傷区分に分類されるコンクリートは、力学特性や AE エネルギー指標の観点から顕著な損傷蓄積が進行しておらず、建設時とほぼ同様なコンクリート材質を有していると推察される。実験室内で打設したコンクリート・コアとの相違は、材齢や水和反応の進行、炭酸化収縮など供用年数に起因する影響によるものと推察される。長期供用に伴う微弱な損傷蓄積については、AE パラメータである初期 AE エネルギー放出率や AE エネルギー発生割合、AE 発生頻度割合を用いることで、実態評価は可能であると考えられる。

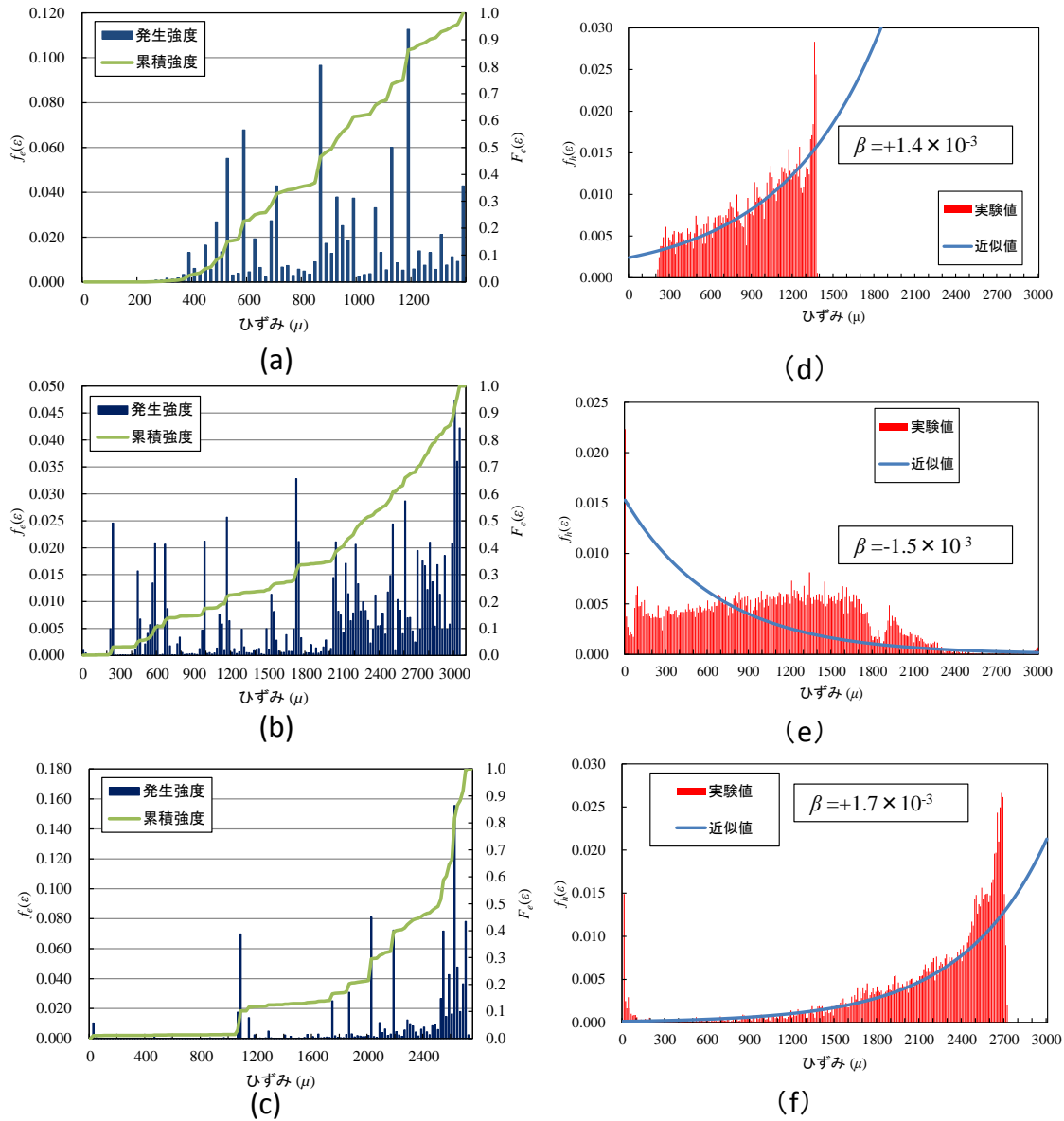


図 5. 6. 7 同一強度特性を有するコンクリートの AE パラメータ特性（無損傷区分）

(a), (d) : 無損傷コンクリート

(b), (e) : Case 2

(c), (f) : Case 3

(2) 損傷・中間的損傷区分（顕在化損傷コンクリート）

第3章で詳細分析を試みた4本（Type A, Type B）とCase 1の4本は、定性的損傷度評価において損傷ないし中間的損傷に判定された。ここでは、ひび割れ損傷が顕在化したコンクリート（顕在化損傷コンクリート）を対象に実証的検討を試みる（図5.6.8）。

検討の結果、いずれのサンプルにおいても载荷初期における多数のAE発生と1,000 μ 未満における高頻度のAEエネルギー放出が見られた。ひび割れ損傷の顕在化したコンクリートでは、载荷初期段階からひび割れ損傷の進展や擦れに起因するAEが多数発生するためと推察される。既往研究²⁰⁾ではAE発生頻度をエネルギー放出の指標といていたが、本研究ではAEエネルギーをその指標とし、発生したAEの質的評価を試みた。その結果、より詳細な圧縮破壊過程の検出・評価が可能になったものと考えられる。

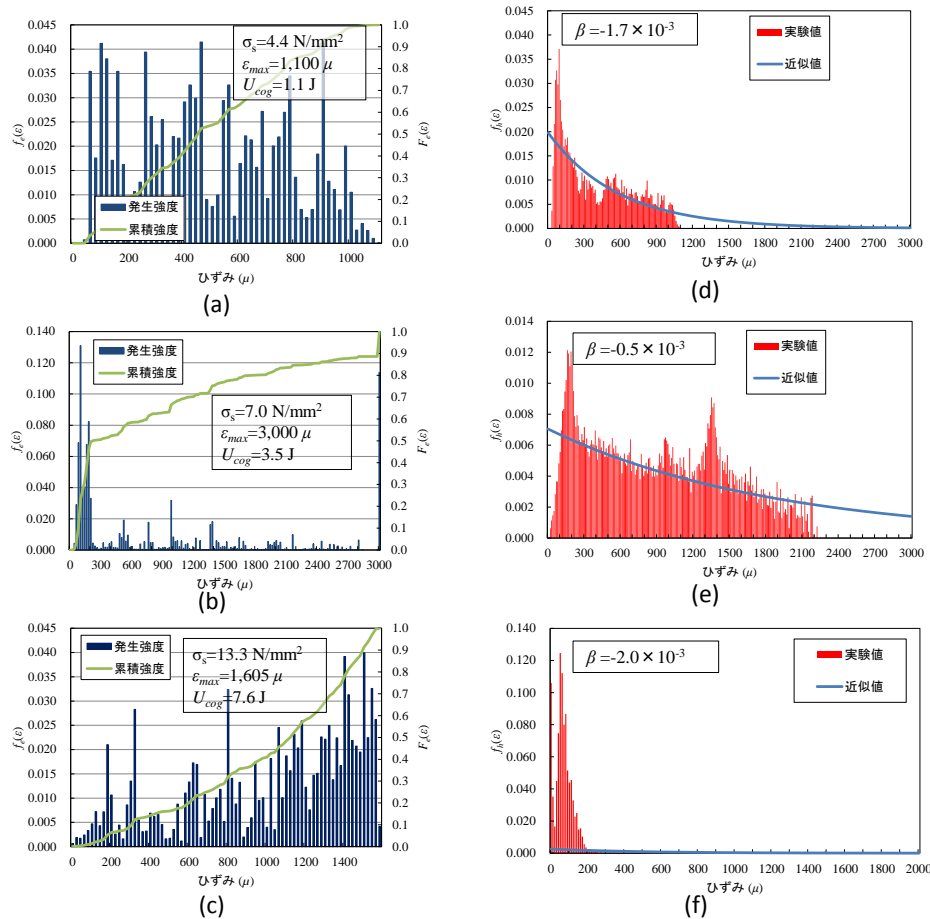


図 5.6.8 ひび割れ損傷が顕在化したコンクリートの AE パラメータ特性

(a), (d) : Type B（損傷区分, U_{cog_Min} ）

(b), (e) : Type A（損傷区分）

(c), (f) : Case 1（中間的損傷_A 区分, U_{cog_Max} ）

(3) 損傷区分（未顕在化損傷コンクリート）

ここでは、未顕在化損傷コンクリートのうち「損傷」と判定されたものを対象に検討を行う。実構造物において採取されるコンクリート・コアの大部分は、損傷が内在化した未顕在化供試体で、本研究で供試したコンクリート・コア 40 本中、25 本が該当する。その内、損傷と判定された 2 本（Case 2）は、いずれも凍害環境において長期間供用されたコンクリートである。検討結果を図 5.6.9 に示す。

検討の結果、AE エネルギーと AE 発生頻度の両指標は、ひび割れ損傷の顕在化したコンクリート・コア（図 5.6.9 (a), (d)）と類似な傾向が見られた。このことから、未顕在化損傷コンクリートにおいても定性的損傷度評価区分は損傷蓄積を適切に評価できるものと考えられる。

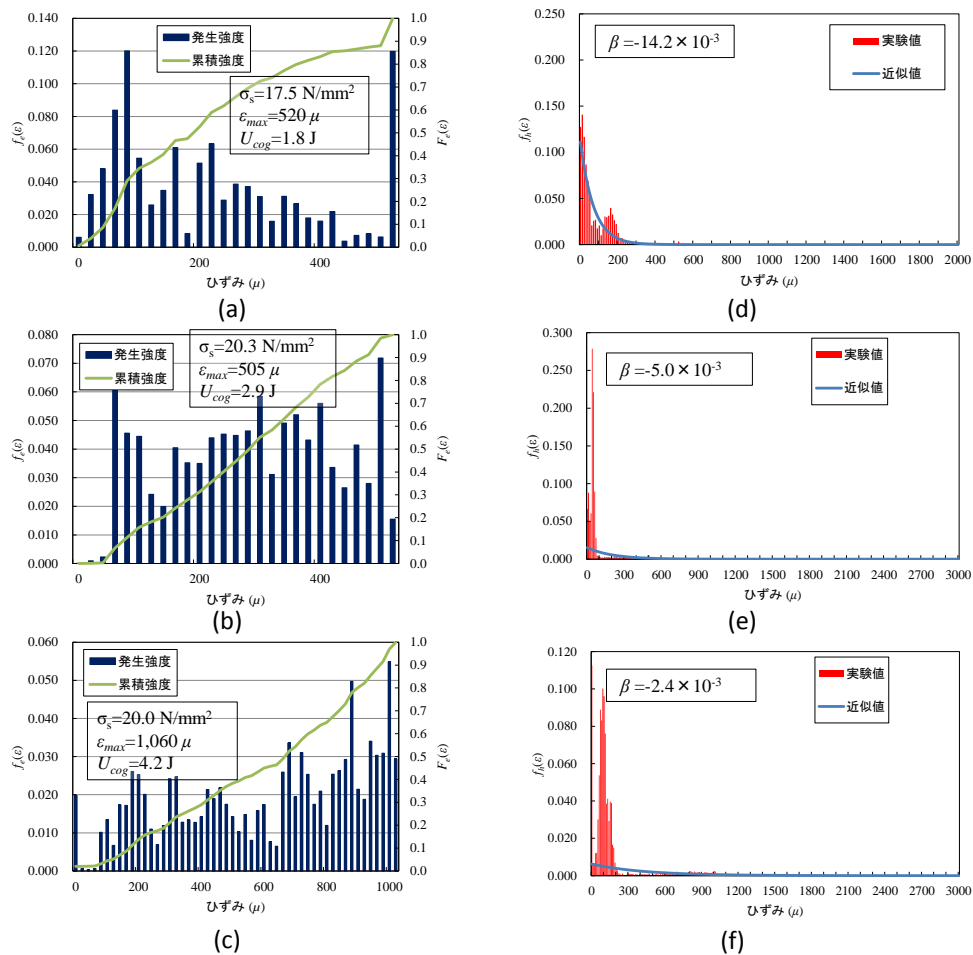


図 5.6.9 損傷区分の AE パラメータ特性（未顕在化損傷）

- (a), (d) : Case 1, 顕在化損傷コンクリート（比較資料）
- (b), (e) : Case 2, U_{cog_Min}
- (c), (f) : Case 2, U_{cog_Max}

(4) 中間的損傷区分（未顕在化損傷コンクリート）

ここでは未顕在化損傷コンクリートのうち、中間的損傷と判定されたものを対象に検討を行う。中間的損傷に区分されたコンクリート・コアには、無損傷区分（図 5.6.7）や損傷区分（図 5.6.8～図 5.6.9）のものとは異なる AE パラメータの特徴が検出された。図 5.6.10 に検討結果を示す。

図 5.6.10 (a), (d) は、Type C の供試体で重心ひずみエネルギーの最も低く、載荷初期に AE エネルギー放出の顕著な増加が見られた。定性的損傷度評価では中間的損傷_A に分類された。図 5.6.10 (b), (e) と (c), (f) は、それぞれ中間的損傷_A に区分された Case 2 と Case 3 の供試体の AE エネルギー発生割合と AE 発生頻度割合である。両供試体共に、終局時に顕著な AE エネルギーの放出が見られた。AE エネルギー発生割合は、無損傷コンクリートのものと類似しているが、ひずみレベル 50% 以上において段階的に AE エネルギー放出が増加することから、顕著な脆性破壊が終局時に発生したと推察される。

AE 発生頻度割合では、Type C と Case 2 の供試体において載荷初期に AE の頻発が見られたが、Case 3 の供試体では初期の AE 発生は少なかった。よって、Case 3 の供試体は、中間的損傷_A に区分されるが、無損傷コンクリートに近い材料特性を有していると推察される。

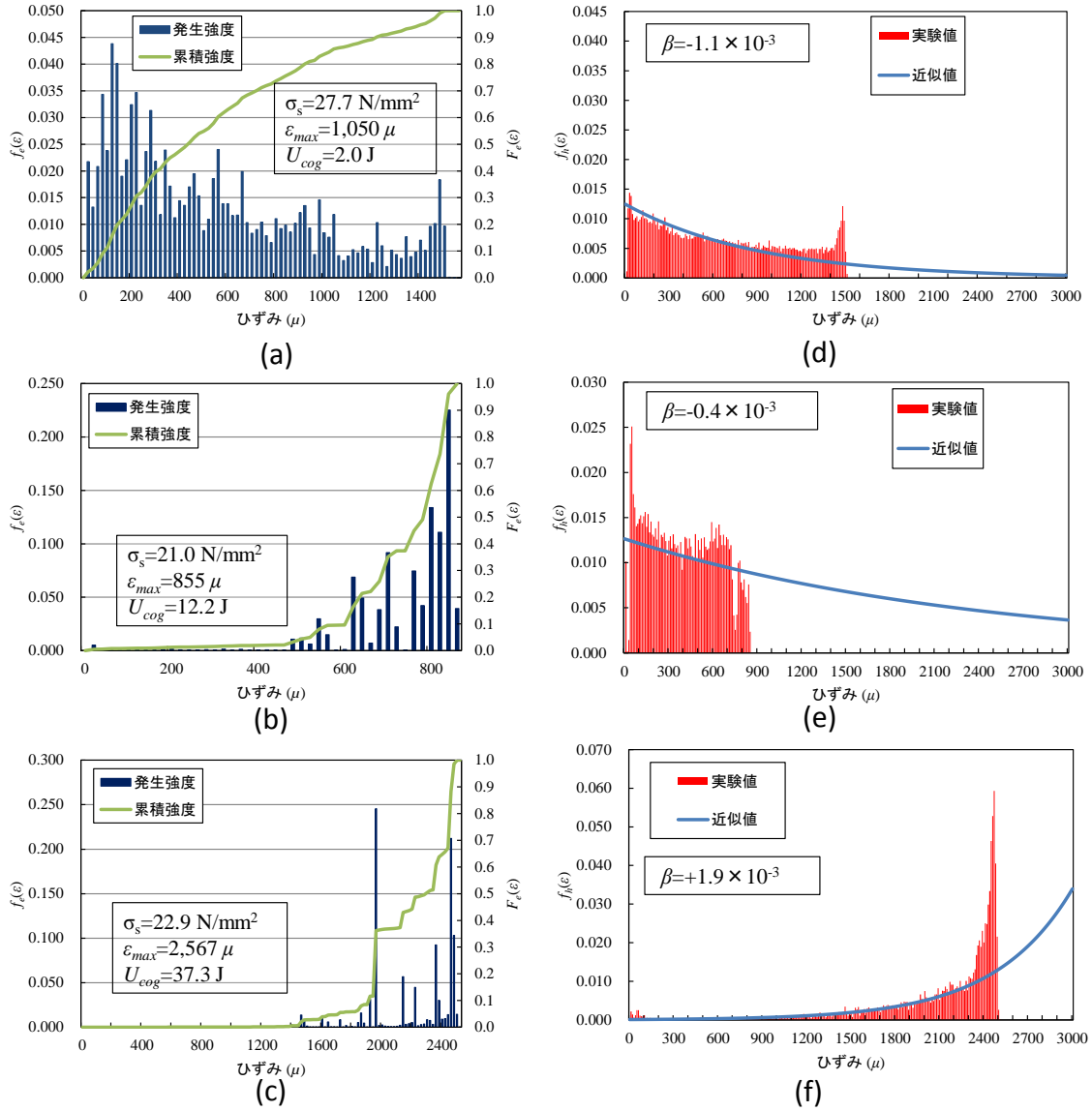


図 5.6.10 中間的損傷区分の AE パラメータ特性

(a), (d) : Type C (区分 B, U_{cog_Min})

(b), (e) : Case 2 (区分 A)

(c), (f) : Case 3 (区分 A, U_{cog_Max})

(5) 定性的損傷度評価区分と AE パラメータの関係

以上のことから、本研究で提案した定性的損傷度評価は、供試コンクリートの損傷実態を反映した評価区分であると考えられる。評価結果と AE エネルギー発生割合、AE 発生頻度割合の検討結果を図 5.6.11 に示し、その結果を取りまとめた模式図を図 5.6.12 に示す。

5.6.2 (1) ～ (4) に示す検討の結果、本研究により提案した定性的損傷度評価を用いることで圧縮強度では判別できないコンクリート損傷実態を定性的に評価できるものと推察される。その際、AE エネルギー指標である初期 AE エネルギー放出率や重心ひずみエネルギーを用いることで同一区分における損傷程度を検討できる可能性が明らかになった(図 5.6.6)。これらの指標値は AE エネルギー発生割合が基礎となったものであることから、AE エネルギーの指標としての AE エネルギー発生割合の有用性は高いものと推察される。その際、AE 発生頻度割合とその評価指標である β は、AE エネルギー特性を補完する指標として有用であると考えられる。

図 5.6.11 に示す定性評価結果と AE エネルギー発生割合、AE 発生頻度割合の結果から、損傷蓄積に伴う重心ひずみエネルギーないし圧縮強度の低下に伴い载荷初期における顕著な AE エネルギー放出が検出できることが明らかになった。AE 発生頻度から、無損傷区分と中間的損傷_A 区分において終局時に AE が頻発することが明らかになり ($\beta > 0.0$)、重心ひずみエネルギー U_{cog} の低下に伴い中間的損傷_A 区分と損傷区分境界である $U_{cog}=5.8\text{J}$ 近傍において载荷初期に AE 発生頻度の増加が見られた。AE 発生頻度の特性は、重心ひずみエネルギーの低下に伴い圧縮载荷過程において発生する AE の変質が示唆されたものと考えられる。

これらのことから、AE 指標は応力 - ひずみ挙動のみでは十分に検出が困難な損傷蓄積を AE エネルギー放出の観点から検出し、定性指標と AE エネルギー指標の組み合わせによりこれまで困難であったコンクリート水利施設の損傷実態を同定可能にしたものと推察される。

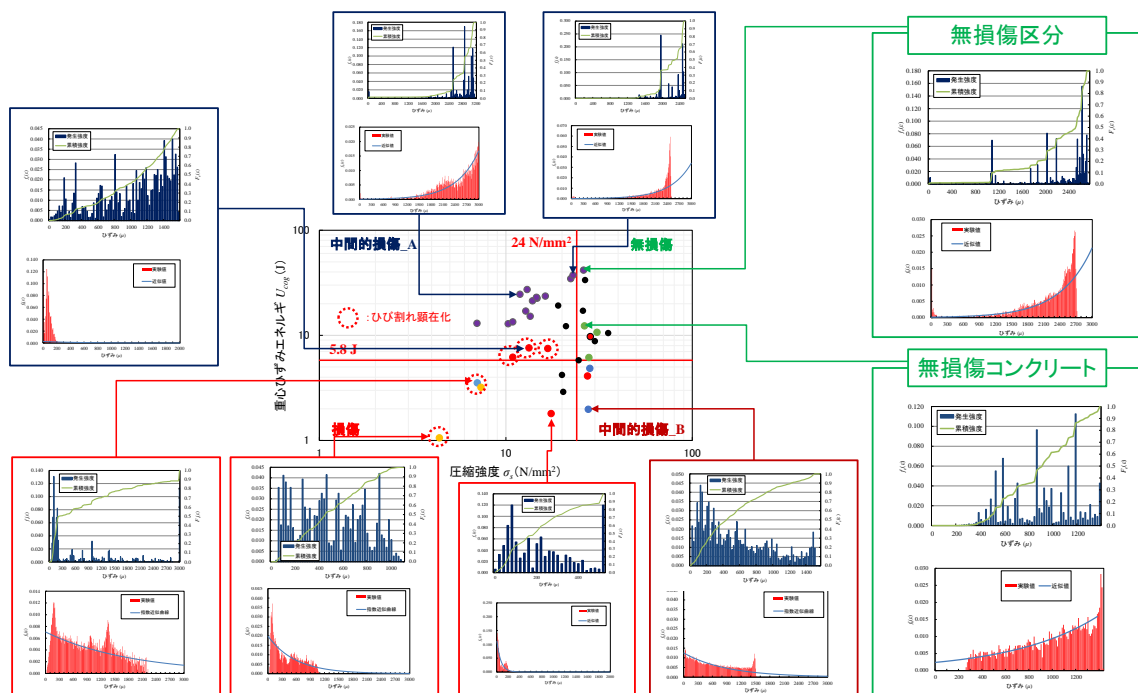


図 5.6.11 定性的損傷度評価区分と AE パラメータの関係

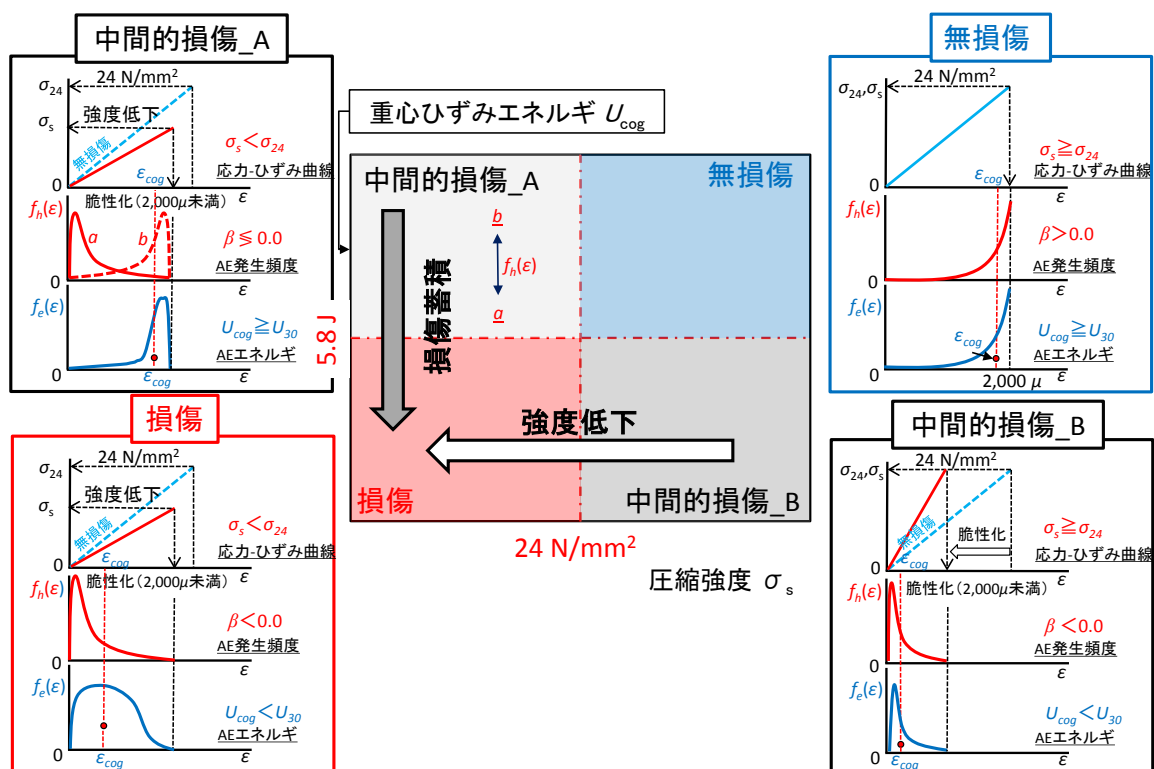


図 5.6.12 定性的損傷度評価区分と AE パラメータの関係 (模式図)

5.6.3 定性的損傷度評価の新規性・有用性

第5章の検証結果より、本研究で提案したコンクリート損傷度評価法は、長期供用下のコンクリートに適用した場合、圧縮強度に代表される力学特性では詳細評価が困難な損傷実態を AE エネルギー特性から評価できることが明らかになった。そのことにより、従来の調査診断と比較して、損傷度評価精度の向上に寄与できるものと考えられる。そこで本項では、第4章および第5章での議論を踏まえて、提案した定性的損傷度評価指標の新規性と有用性を取りまとめる。

本研究の新規性は、圧縮強度のみでは評価が困難であるコンクリート損傷度を、AE エネルギー指標から求められる重心ひずみエネルギーと圧縮強度の関係から定性的に評価する指標を提案したことにある。この定性的損傷度評価指標は、コンクリートの損傷実態を分類評価するものであり、従来技術では困難であった損傷蓄積を精緻に評価可能であると推察される。現状において、農業水利施設の調査診断では、損傷実態を簡易的に検出することは困難であり、目視調査によるひび割れ損傷の有無や反発硬度法による圧縮強度の推定が行われている²⁾。コンクリート・コアを採取した場合、強度値を実験的に求めることは可能であるが、そのみで損傷実態を評価することは困難である。加えて、欠損を有する材料の破壊靱性や脆性化の観点からの評価は不可欠である。圧縮載荷過程に AE 計測を導入することは、金属材料とは異なり引張試験の困難なコンクリートにおいて、損傷蓄積に伴う局所破壊の進行とその規模を同時に計測・評価することを可能にし、供試材料の破壊靱性に関する間接的指標を評価できる。定性的損傷度評価指標は、AE エネルギー特性を考慮することで、従来技術では困難であった微細な損傷蓄積を AE の観点から明らかにしている。

提案手法の有用性は、供試するコンクリート・コアに特殊な処理を施すのではなく、従来技術に加えて、圧縮破壊過程の AE を検出することで損傷度評価精度の向上を実現できることにある。損傷蓄積の影響は、応力 - ひずみ曲線のみで検出することは困難であり、AE 指標を用いることで農業農村工学分野において普及性が高く、かつ技術改良が容易な損傷度評価技術が実現できるものと考えられる。

これらのことから、本研究で構築したコンクリート損傷度評価法は、力学的特性とともに、損傷蓄積に伴う変質実態を AE により検出することで、従来技術では十分に得ることのできない調査診断の精度向上を実現できるものと推察される。

5.7 まとめ

第5章では、第4章で構築したコンクリートの定性的損傷度評価法を、凍害環境において長期供用されたコンクリート製開水路と竣工後87年が経過したコンクリート道路橋RC床版部より採取した供試体を対象に、損傷実態の異なるコンクリート・コアを用いて検証し、開発手法の有用性を明らかにした。以下に検証結果の概略を列挙する。

- (1) 損傷実態の異なる31本のコンクリート・コアに対して開発手法を適用し、損傷実態と定性評価結果との検証を試みた。供試コンクリートは、凍害によりひび割れ損傷が顕在化したCase 1(6本)と凍害環境で長期間供用されているがひび割れ損傷の顕在化していないCase 2(11本)、竣工後87年が経過したコンクリート道路橋床版部より採取したCase 3(14本)の3種類である。定性的損傷度評価の結果、Case 2およびCase 3において無損傷に区分される供試体が見られた。AEエネルギー特性を考慮した定性的損傷度評価指標は、圧縮強度に代表される力学特性のみでは検出が困難な蓄積損傷の影響を受けた圧縮破壊過程のエネルギー解放をAEにより検出するものである。AEエネルギー放出の特徴量から既存施設より採取したコンクリート・コアにおいて損傷実態を評価し、その程度から無損傷ないし損傷、中間的損傷を定性評価できることが明らかになった。
- (2) 凍害によりひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアによる検証では、第4章で用いた同一構造物同一断面から採取したコンクリート・コアの検討結果と類似な試験結果を得た。供試した6供試体中1供試体で損傷と判断され、4供試体が中間的損傷、残り1供試体が判定不能(エラー)となった。供試体の圧縮強度は、6供試体中5供試体で耐久性を必要とする農業水利施設の標準値 24 N/mm^2 以下であった。定性的損傷度評価による判定結果と目視結果を比較すると、ひび割れが確認された供試体では、損傷ないし損傷区分近傍の中間的損傷_Aに分類された。目視およびX線CT画像からひび割れが見られなかったSample 4は、圧縮強度は 24 N/mm^2 を上回っていたが、載荷初期にAEが頻発したことから、中間的損傷_Bに分類された。これらのことから、本研究で提案した定性的損傷度評価指標は、ひび割れ損傷が顕在化したコンクリート・コアの損傷度診断において目視やX線CT画像での損傷実態と概ね一致する傾向が得られた。
- (3) 凍害環境にあるコンクリート製開水路からひび割れ損傷が顕在化していない供試体を採取し、定性的損傷度評価を試みた。本供試体は、第3章で供試した凍害コンクリートのType Cに該当するものである。採取本数は11本である。試験供試体は、北海道全域(小樽市、函館市、室蘭市、帯広市、留萌市、旭川市)の凍害環境にあるコンクリート製開水路より採取した。施設の建設年代は昭和

34 年（帯広市）～昭和 57 年（室蘭市）である．採取したコンクリート・コアを外観目視した結果，顕著なひび割れ損傷は見られなかった．検討の結果，最大ひずみが $500\ \mu$ 未満と十分な精度で応力－ひずみ曲線が得られなかった 2 供試体を除き，9 供試体について定性的損傷度評価を試みた．損傷蓄積は 5 供試体で検出され，2 供試体が損傷，2 供試体が中間的損傷_A，1 供試体が中間的損傷_B に区分された．残る 4 供試体は無損傷に区分された．Case 2 では，ひび割れ損傷は顕在化していないが凍害環境など損傷蓄積を促進する環境条件において長期供用されたコンクリート・コアを対象に定性的損傷度評価を試みていることから，力学特性の変質には至っていないが微細損傷の蓄積に伴う载荷初期における AE 発生挙動の変質が見られた．载荷初期の AE エネルギー指標の特微量により，損傷蓄積の有無を評価できることが明らかになった．その場合，開発手法の定性的損傷度評価では，定性評価に加えて AE 指標を活用することにより微細損傷の有無を詳細に分析することが可能であり，定性評価精度の向上が可能になるものと推察される．

- (4) 竣工後 87 年が経過した道路橋 RC 床版からコンクリート・コアを採取し，定性的損傷度評価を試みた．検討に用いた 14 供試体中無損傷区分は 1 本，中間的損傷_A 区分は 13 本だった．評価値は，重心ひずみエネルギーの増加に伴い圧縮強度が上昇する傾向が得られた．AE エネルギー指標の観点からは顕著な損傷蓄積は見られなかった．
- (5) 供試したコンクリート・コアに関するひずみエネルギーと重心ひずみエネルギー，初期 AE エネルギー放出率を定性的損傷度評価指標の観点から検証した．その結果，提案手法である AE エネルギー指標を用いることで同一ひずみエネルギーのコンクリート・コアにおいても損傷蓄積の相違を初期 AE エネルギー放出率を用いることで評価できることが示唆された．

参考文献

- 1) 本田泰大, 鈴木哲也: 凍害損傷の顕在化したコンクリート壁体の赤外線画像特性, 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, 14, pp. 127-132, 2014.
- 2) 緒方英彦, 山崎大輔, 周藤将司, 兵頭正浩: シラン低圧注入によるコンクリートの微細ひび割れ検査法の現地実証試験, 第 68 回セメント技術大会講演要旨, pp. 326-327, 2014.
- 3) 永田瑞穂, 島本由麻, 鈴木哲也, 石神暁郎: 弾性波エネルギー指標を用いたコンクリートの定性的損傷度診断法の開発, 第 73 回農業農村工学会京都支部研究発表会講演要旨集, pp. 84-85, 2016.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 鈴木哲也: 損傷指標による 87 年間供用された道路橋 RC 床版の材質評価, 農業農村工学会論文集・論文, No. 303 (84-3), pp. I_317-I_324, 2016.
- 7) 日本道路協会: 3.3.2 コンクリートの強度, 道路橋示方書・同解説, pp. 85-86, 2012.
- 8) 農業土木学会: 第 8 章 主要構造物の設計, 土地改良事業計画設計基準 設計「農道」技術書, pp. 442-443, 2005.
- 9) 長滝重義監修: 5.3.1 長期強度特性, コンクリートの長期耐久性能 [小樽港百年耐久性試験に学ぶ], 技報堂出版, pp. 149-161, 1995.
- 10) (社) 日本非破壊検査協会編: 2.2.2 材料破壊による AE の特徴, アコースティック・エミッション試験 II, pp. 9-11, 2008.
- 11) Ohno, K.: Identification of the Fracture Process Zone in Concrete Materials by Acoustic Emission, Acoustic Emission (AE) and Related Non-Destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete, Woodhead Publishing, pp. 41-55, 2015.
- 12) RILEM TC-50 FMC.: Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three-Point Bending Tests on Notched Beams, Materials and Structures, 18, pp. 287-290, 1985.
- 13) Muto, Y, Shiraiwa, T. and Enoki, M.: Estimation of Fracture Toughness in Various Mg alloys by AE Analysis, Progress in Acoustic Emission XVII, pp. 117-122, 2014.
- 14) 三橋博三, 六郷恵哲: コンクリートの破壊の力学: 魅力と展望, コンクリート工学, 37 (9), pp. 4-10, 1999.
- 15) 内田裕市, 市之瀬敏勝: 破壊のメカニズムと破壊の力学, コンクリート工学, 37 (9),

pp. 11-17, 1999.

- 16) 大塚浩司：ひび割れと破壊の力学，コンクリート工学，37 (9)，pp. 18-24, 1999.
- 17) 村上澄男：10.1.2 コンクリートの損傷挙動，連続体損傷力学，森北出版株式会社，pp. 248-250, 2008.
- 18) 榎学：6.3 非破壊評価手法，マテリアルの力学的信頼性 - 安全設計のための弾性力学 - ，内田老鶴圃，pp. 113-118, 2006.
- 19) (社) 日本非破壊検査協会：6.5 新しい考えに基づく非破壊検査技術の新展開 (I)，非破壊評価工学，(社) 日本非破壊検査協会，pp. 137-139, 2009.
- 20) 鈴木哲也，池田幸史，米野現樹，大津政康：コア・コンクリートの AE レートプロセス解析に基づく損傷度評価に関する研究，土木学会論文集，809/V-70, pp. 95-106, 2006.
- 21) (社) 農業土木事業協会：4.2.2 評価方法，農業水利施設の機能保全の手引き，pp. 53-54, 2007.

第6章 結論

本研究では、農業水利施設の主な構造材料であるコンクリートを対象に圧縮載荷過程において発生する AE を援用した損傷度評価法を開発した。開発手法は、AE のエネルギー特性に着目し、AE エネルギー発生割合 $f_e(\varepsilon)$ とひずみの関係から AE エネルギー放出の重心点を同定し、その際のひずみ ε_{cog} より重心点におけるひずみエネルギーを評価した。本研究では重心ひずみエネルギー U_{cog} と定義し、圧縮強度 σ_s との関係から定性的損傷度評価指標を提案した。提案手法の閾値は、圧縮強度と重心ひずみエネルギーで設定した。圧縮強度は、耐久性を必要とする農業水利施設に必要な強度 $\sigma_{24}=24 \text{ N/mm}^2$ とした。重心ひずみエネルギーは、圧縮破壊の理論的観点から遷移帯においてひび割れが発生する応力レベル 30% のひずみエネルギー U_{30} ($=5.8 \text{ J}$) を閾値とした。 $U_{cog} < U_{30}$ かつ $\sigma_s < \sigma_{24}$ の場合、供試コンクリートにおいて損傷蓄積が進行していると評価した。

開発手法の実証的検討には、凍害損傷が進行したコンクリート水利施設より採取したコンクリート・コアと実験室内で打設した無損傷コンクリートを用いた。検討の結果、ひび割れ損傷の顕在化したコンクリート・コアは損傷と判定された。凍害環境で供用されていたが、ひび割れ損傷の顕在化していないコンクリート・コアは中間的損傷に判定された。実験室内で打設した無損傷コンクリートは、無損傷区分に判定され、コンクリート状態と評価結果とが一致した。その際、ひび割れ損傷の顕在化したコンクリート・コアでは、圧縮載荷過程において載荷初期 $0 \sim 200 \mu$ における顕著な AE エネルギーの放出が見られ、初期 AE エネルギー放出率の増加傾向が明らかになった。無損傷コンクリートでは 0.44 % を示し、凍害の進行した損傷コンクリートでは無損傷コンクリートの 14.5 ～ 61.6 倍の評価値を得た。ひび割れ損傷の進展に伴いコンクリート空隙の指標値は増加し、X 線 CT 法により検出した真円度の増加と同サンプルにおける動弾性係数の低下が検出された。定性的損傷度評価指標による判定結果は、損傷実態とコンクリート物性とが密接に関連することが示唆された。

開発手法の検証は、損傷実態の異なる 31 本のコンクリート・コアを用いて実施した。定性的損傷度評価の結果、無損傷区分に分類されるコンクリート・コアでは、実験室内で打設した無損傷コンクリートと類似な力学特性が検出されたが、既存施設より採取したコンクリート・コアでは、初期 AE エネルギー放出率の増加による AE エネルギー特性の相違が検出された。定性的損傷度評価に AE エネルギー指標である初期 AE エネルギー放出率や重心ひずみエネルギーを併用することにより損傷度評価精度の向上が期待できる。ひび割れ損傷の顕在化したコンクリート・コアでは、損傷区分ないし損傷区分近傍の中間的損傷に判定された。中間的損傷は、圧縮強度ないし重心ひずみエネルギーが閾値を下回るサンプルであり、重心ひずみエネルギーを下回る場合、最大ひずみが $1,000 \mu$ 未満となり顕著な脆性化を伴う損傷蓄積が懸念された。ひずみエネルギーと重心ひずみエネルギーには正の相関 ($R^2=0.620$) が見られ、同一ひずみエネルギーのコンクリート・コアにおいて、ひずみエネルギーと初期 AE エネルギー放出率の関係から無損傷ないし損傷蓄積の相違を評

価することが可能である。

以上の研究成果より、現状において十分に整備されていない農業水利施設のコンクリート損傷度評価法を本研究により提案できたものとする。現況の農業水利施設における施設機能診断では、圧縮強度に代表される強度値のみが評価対象であるが、損傷の進行したコンクリートでは強度値の評価精度が低下するため、強度を補完する損傷度評価指標が必要である。本研究では、圧縮載荷過程に発生する AE エネルギーに着目し、AE エネルギー放出の観点から主破壊点の推定に基づく定性的損傷度評価法とそれを補完する AE エネルギー指標を提案した。実証的検討の結果、損傷実態を十分反映させたコンクリート損傷度評価が可能であり、現状において検出困難なコンクリート損傷も AE エネルギー放出の観点から定量的かつ定性的に評価可能になったと考える。今後、既存施設の長寿命化が進展することに伴い、性能評価精度の向上は不可欠であり、提案手法の有用性は高いものとする。

謝辞

本論は、2006年から2016年までの11年間の研究成果を取りまとめたものです。本研究をご指導いただいた東京大学大学院農学生命科学研究科久保成隆教授、飯田俊彰准教授には、博士課程在学期間を含む2011年から2016年の長期間にわたり未熟な筆者をご指導いただけたことに心より感謝申し上げます。

本論文の審査においては、東京大学大学院農学生命科学研究科塩沢昌教授、西村拓教授および東京大学生産技術研究所岸利治教授のご教示をいただきました。記して感謝申し上げます。

元東京大学教授中村良太先生には、日本大学生物資源科学部在職中から数多くの貴重な機会を与えていただいたことに加えて、2010年より水利環境工学研究室において研鑽する機会を与えていただきました。心より感謝申し上げます。

本研究で開発したAcoustic Emissionによるコンクリート損傷度評価法は、熊本大学大学院自然科学研究科大津政康名誉教授（現京都大学大学院工学研究科特任教授）、重石光弘教授にご指導いただきました。コンクリートの微視構造と弾性波の伝播特性については、在外研究期間にThe University of Edinburgh Professor M. C. Forde, Associate Professor Craig Warren および University of Massachusetts Amherst Professor Carlton L. OHの示唆に富む貴重なご助言を研究室セミナーの際にいただきました。X線CT画像解析に基づくコンクリート損傷の可視化とAEとの関連性については、京都大学大学院工学研究科塩谷智基教授、徳島大学大学院工学研究科渡邊健准教授、首都大学東京大学院都市環境科学研究科大野健太郎助教に多くのご助言をいただきました。記して感謝申し上げます。

実験的検討では、AE計測に関する詳細について熊本大学技術部友田祐一博士のご協力を得ました。X線CT計測では、日本大学生物資源科学部笹田勝寛准教授のご協力を得ました。農業水利施設の実態調査では国立研究開発法人 農業・食品産業技術総合研究機構・農村工学研究部門中達雄博士、樽屋啓之博士、浅野勇博士のご協力を得ました。コンクリート製開水路の損傷度診断では、元松江工業高等専門学校高田龍一教授、鳥取大学農学部緒方英彦教授、高知大学農学部佐藤周之准教授、寒地土木研究石神暁郎主任研究員のご協力を得ました。記して感謝申し上げます。

農業水利施設での開発手法の適用には、農林水産省、北海道開発局、水資源開発機構、新潟県および神奈川県各行政担当部局のご協力を得ました。現地計測やサンプルの採取には、株式会社日本水工コンサルタント伊藤久也博士、千代田淳氏、本間辰之介氏のご協力を得ました。記して感謝申し上げます。

新潟大学農学部においては、三沢愼一名誉教授、森井俊広教授のご協力を得ました。日本大学生物資源科学部においては、河野英一名誉教授、青木正雄教授のご協力を得ました。記して感謝申し上げます。

本論の多くのデータは新潟大学と日本大学の学生諸氏の卒業論文・修士論文の一環として検討を進めたものです。新潟大学卒業生である島本由麻さん、永田瑞穂さん、西村咲紀さん、日本大学卒業生である鈴木直也君、奥津広太君、上野由樹君、山岸俊太郎君に感謝申し上げます。特に島本由麻さんには、AE エネルギーに関する詳細解析をお願いしました。本論の主要な研究課題は、島本さんとの多くの議論から具現化したものです。根気強く討議にお付き合いいただけたことに感謝いたします。ありがとうございました。

東京大学農学部水利環境工学研究室においては、岡島賢治博士（現三重大学准教授）、木村匡臣博士（現東京大学大学院助教）、出井宏樹氏（現 NTC コンサルタンツ（株））、横井孝洋氏（現高砂香料（株））の有益なアドバイスを研究室ゼミの際にいただきました。記して感謝申し上げます。

最後になりましたが、鈴木敏勝・伊佐子の両親、妻牧子、長男智之、長女美由紀、二男博之には日々の生活の中で多大なる支援をいただきました。ここに記して感謝します。