

論文 損傷力学と AE レートプロセス解析を用いたコンクリート損傷度評価の考察

松田 優希*1・下薗 晋一郎*2・川崎 佑磨*3・大津 政康*4

要旨：従来からコンクリートの力学的な評価は圧縮強度により行われている。しかし、加齢構造物の増加を踏まえ予防保全（予後）について、損傷程度を定量的に評価することが望まれている。このような背景から、本研究では、損傷が明確ではないコンクリートの例として、乾燥収縮、加水処理、およびジャンカによる欠陥を有する供試体に対し、損傷力学と AE レートプロセス解析に基づいた損傷度評価法を適用した。その結果、乾燥収縮を受けた供試体、および加水処理された供試体、ジャンカによる初期欠陥を有する供試体の損傷は確認されなかった。

キーワード：損傷力学、アコースティック・エミッション、コンクリート損傷度

1. はじめに

日本コンクリート工学会では、JCI-TC125FS「コンクリート構造物のインフラドック構築フェージビリティ調査研究委員会」を2012年度より発足させ、コンクリート構造物の予防保全のための維持管理制度の構築に向けて調査・検討を行っている。これは、今後の劣化及び加齢構造物の増加を踏まえて診断から予後への展開を考慮している。そこでコンクリート構造物への適用可能な検査法として、アコースティック・エミッション（以下、AE と記す）法が挙げられている。著者らは AE 法によるコンクリートの劣化について研究を行ってきた¹⁾。損傷度評価法への適用についても DeCAT (Damage evaluation for Concrete damage by AE Technique) 法を開発している²⁾。これはデータベースの拡充により、様々な劣化コンクリートへの応用が可能となり、実際に地震被害を受けた構造物での損傷度の評価が可能なることを明らかにした³⁾。そして、DeCAT 法のインフラドックへの適用性および実用性を確認するためには十分な試験データの蓄積と検証が必要である。そこで、本研究では、乾燥収縮過程で AE が検出された供試体と、損傷度の不明確な初期欠陥である加水処理やジャンカを有する供試体で、定量的な損傷度評価について検討した。

2. 損傷力学の導入

損傷力学モデルとしては、弾性係数を考慮する Loland のモデル⁴⁾を採用した。まず、健全なコンクリートの弾性係数 E^* 、損傷を受けているコンクリートの弾性係数 E とし、以下のように損傷度 Ω を定義する。

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

ここで、圧縮強度試験時の初期損傷度を、荷重初期の初期弾性係数 E_0 を用いて $\Omega_0 = 1 - E_0/E^*$ と定義し、試験中の損傷度の増加を以下のような指数式で仮定する（図-1 (b) 参照）。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (2)$$

ここで、 λ 、 A_0 は材料固有の定数である。式(2)を式(1)に代入することにより、図-1 (a) に示す応力 (σ) - ひずみ (ε) 関係

$$\sigma = E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \quad (3)$$

が導かれる。終局ひずみ (ε_c) 時には $d\sigma/d\varepsilon = \varepsilon$ となるとすれば、図のように終局時の弾性係数を $\sigma_c/\varepsilon_c = E_c$ と置くことにより、

$$E_0 = \frac{\lambda+1}{\lambda} E_c \quad (4)$$

が導かれる。ここで、初期弾性係数 E_0 は接線弾性係数である。なお、上式で $\lambda=1$ と置けば、コンクリート標準示方書の

$$\sigma = \frac{\sigma_c}{\varepsilon_c} \varepsilon \left(2 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \right) \quad (5)$$

を得ることができる。

式(5)の一般のコンクリートへの適用性は十分な実績がある点を考慮すれば、健全なコンクリートの圧縮強度試験中の損傷度増加が式(2)より線形であり、図-1 (b) のような累加的な増加とはならず、 $E_0=2E_c$ となることが示される。一方、損傷を受けているコンクリートでは

*1 熊本大学大学院 工学部自然科学研究科社会環境工学専攻 修士課程 (正会員)

*2 日本工営 (株) インフラマネジメント部 (正会員)

*3 立命館大学 理工学部都市システム工学科 助教授 (正会員)

*4 熊本大学 工学部自然科学研究科複合新領域科学専攻 教授 (正会員)

図のような損傷度増加をし、初期弾性係数 E_0 が低下すれば、式(4)より $\lambda > 1$ となる。

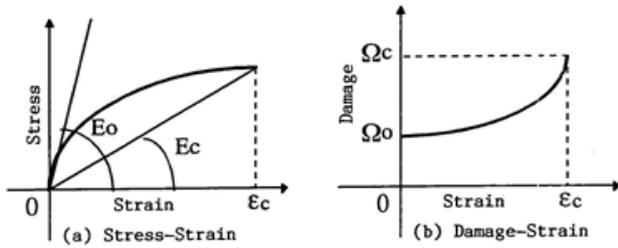


図-1 応力-ひずみ関係と損傷度⁶⁾

3. AE レートプロセス解析⁵⁾

コンクリートの一軸圧縮下でのAE発生挙動は、微小ひび割れの発生過程と対応している。微小ひび割れは漸増的に発生、集積され、主破壊へと耐力の低下をもたらす。このようにして、主破壊に至るまでの過程は微小破壊の集積となる。つまり、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配する場合には、確率過程論により評価できる。そこで、一軸圧縮強度試験下でのAE発生挙動の定式化に、レートプロセス理論を適用した。

AEの発生総数を N 、応力レベル V に対するAE発生確率関数を $f(V)$ とすると、応力レベル V から $V+dV$ への応力増分に対し、式(6)を得る。

$$f(V)dV = dN / N \quad (6)$$

式(6)で得たAE発生確率関数 $f(V)$ に対し、損傷度の定量化のために、式(7)の双曲線関数を用いた。

$$f(V) = a/V + b \quad (7)$$

ここで、 a 、 b は定数である。

式(6)、(7)より応力レベル V に対するAE発生総数 N の関係は下式により決定した。

$$N = CV^a \exp(bV) \quad (8)$$

ここで、 C は積分定数、 a 、 b は定数である。

次に、式(7)より得られる a 、 b について検討する。式(7)

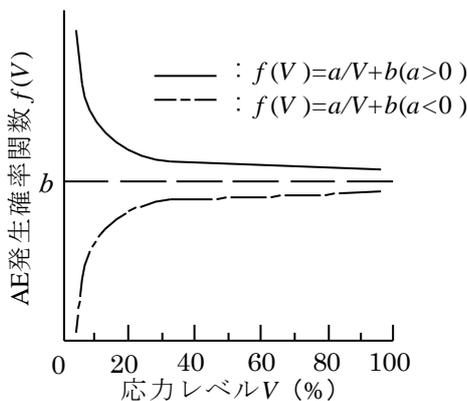


図-2 AE 発生確率関数と a 値

において示される、応力レベルに対するAEの発生確率関数の例を図-2に示す。図より、AE発生確率関数 $f(V)$ は応力レベルの増加に従って、 b 値に収束している。低応力レベルの段階を比較すると、 a 値の正負により、AE発生確率関数 $f(V)$ は大きく異なる。つまり、 a 値は材料の応力レベルでのAE発生頻度を示し、 b 値はAEの発生総数を示している。よって、 a 値が正ならば、AE発生確率関数 $f(V)$ が低応力レベルで高いことを示し、劣化していた状態を示す。一方、 a 値が負ならば、AE発生確率関数 $f(V)$ が低応力レベルで低いことを意味し、健全な状態であると評価することが可能である。

以上より、レートプロセス解析を適用すれば、一軸圧縮時のAE発生挙動を式(7)、(8)で近似することができ、得られたパラメータを用いてコンクリートの損傷度評価を定量的に行うことができる。また、式(4)より、材料固有の定数である λ は以下の式で表すことができる。

$$\lambda = \frac{E_c}{E_0 - E_c} \quad (9)$$

式(2)のように、損傷力学での初期損傷度 Ω_0 はコンクリートの損傷を示す定量的な指標として定義されている。しかし Loland のモデルにおいては、健全時の弾性係数 E^* が必須となる。実際、既存の構造物では、初期圧縮強度以外の資料は一般に存在しないため、調査時点での健全時の弾性係数 E^* を得ることは困難である。そこで、健全時の弾性係数 E^* を AE 計測結果から推定する手法について考察を行った。コンクリートの圧縮特性を示すものとして、AE 発生総数-応力レベル、応力-ひずみ間に関係が見出せれば、AE 法による損傷度評価が可能になる。

一軸圧縮強度試験下での損傷パラメータ λ の式(9)と AE レートプロセス解析値 a の式(8)の相関関係および相関式を図-3に示す。この図は、過去のコンクリートの199サンプルをデータベース⁶⁾として用いた相関図である。相関係数は0.909であり、 λ 値と a 値はよく対応していることが認められた。このデータベースに過去の実験結果を加えることにより供試体の数が少数であっても相対的な損傷度評価を行うことができる。

図-3中の近似式より、以下の式(10)を得る。

$$\lambda' = Xa' + Y \quad (10)$$

ここで、 $E_0 = E^*$ のとき、 $a = 0$ と仮定すると、式(9)、(10)より、健全時弾性係数 E^* を式(11)のようになる。

$$E^* = E_c + \frac{E_c}{Y} \quad (11)$$

この健全時弾性係数 E^* と、一軸圧縮試験から得られる

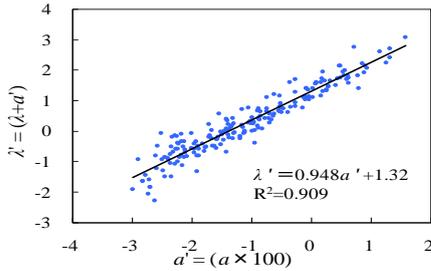


図-3 λ値とa値との関係⁶⁾

弾性係数を用いて相対的損傷度の評価を行った。

$$\frac{E_0}{E^*} \quad (12)$$

これにより、損傷度を弾性係数を用いて定量的に評価することが可能となる。

4. 実験概要

4.1 供試体

(1) 乾燥収縮を受けた供試体

試験供試体は、表-1および図-4に示すような骨材A(花崗岩)、骨材B(安山岩)の2種類の粗骨材を使用した。各供試体は供試体A(骨材A使用)、モルタル供試体、供試体B(骨材B使用)、FA供試体(フライアッシュ入り、骨材A使用)とする。ここでは、骨材の違いによる影響を把握するために水セメント比55%、細骨材率44%で一定とした。ただし、FA供試体ではB=C+FAとして、水結合材比W/Bを55%としている。全ての供試体の配合を表-2に示す。

乾燥収縮実験に使用したコンクリート供試体は図-5

表-1 使用した骨材の特性

	骨材A	骨材B
表乾密度(g/cm ³)	2.98	2.45
吸水率(%)	0.85	4.42
粗骨材最大寸法(mm)	20	20



骨材A(花崗岩)



骨材B(安山岩)

図-4 使用した粗骨材の種類

に示される100×100×400mmの角柱とした。各種類の角柱供試体は、長さ変化試験および重量変化試験用を3本作製し、そのうち1本はAE計測を行った。AE計測は、図-5に示すようにAEセンサを各供試体の中央に1個設置し、恒温室内(20°C, 60%)で7日間水中養生後から材齢91日目まで連続的にAEモニタリングを行った。AE計測装置は周波数帯域1kHz~300kHz, ゲイン60dB(プリアンプ40dB+メインアンプ20dB)、しきい値は40dBとして計測を行った。AEセンサには150kHz共振周波数を用い、グリースにて各供試体に貼付した。長さ変化試験および重量変化試験では、打設時に角柱供試体の両端にゲージプラグを埋め込み、作製した。なお、長さ変化試験および重量変化試験は7日間の水中養生後から材齢91日目まで計測を行った。全供試体の計測は全て恒温室内で行った。

また、圧縮強度試験に使用したコンクリート供試体は、Φ100×200mmの円柱とし、各試験用に3本ずつ作製した。コンクリートの圧縮強度試験は各供試体の材齢7, 14, 28日に行い、同時にAE計測実験を行った。

(2) 加水及びジャンカ供試体

試験供試体は標準の高炉セメントB種を用いた呼び強度27N/mm²で作製されたΦ100×200mmの円柱供試体である。なお、水セメント比は55%、粗骨材最大寸法は20mmでスランプは8cmであった。加水供試体は、打設直前に水量を10%追加し練り混ぜを行った後に型枠に打設した。ジャンカ供試体は、型枠に全く締固めを行わず打設した。そのジャンカの程度を図-6に示す。これらの3種の供試体は、28日標準養生後に2か月間気中に放置した後の84日目に、圧縮強度試験およびAE計測実験を同時に行った。なお、今回は、それぞれ1本ずつしか供試体を入手することができなかったため、それぞれ1本の実験を行った。

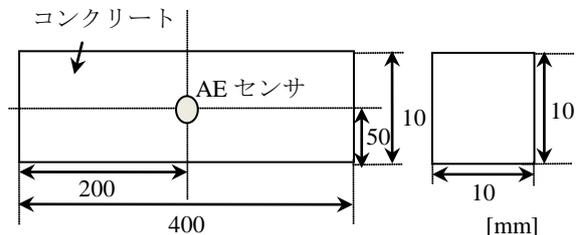


図-5 乾燥収縮実験に使用した供試体寸法

表-2 全供試体の配合

	最大寸法 (mm)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	空気量 (%)	スランプ値 (cm)	単位量 (kg/m ³)					AE減水剤 (g)	AE助剤 (g)
						W	C	FA	S	G		
供試体A	20	55	44	5	8	174	317	-	755	1141	1.3	0.6
モルタル供試体	20	55	-	6	22	288	524	-	1249	-	-	0.6
供試体B	20	55	44	5	7	174	317	-	755	911	1.3	0.6
FA供試体	20	55	44	2	10	174	253	63	755	1141	1.3	0.6



図-6 ジャンカ供試体のジャンカの程度

4.2 圧縮強度試験と AE 計測

圧縮強度試験時、供試体中央部分に広帯域型 AE センサを 2 個接着し、載荷時での AE 検出に用いた。また、供試体中央部分には対称に、ひずみゲージを縦横方向にそれぞれ 1 枚ずつ接着し、弾性係数とポアソン比を算出した。なお、供試体の上面と下面にはシリコングリースを塗布し、テフロンシートを挿入することにより、載荷時の摩擦により発生する AE の低減に努めた。AE 計測条件として、AE センサは広域帯型(共振周波数：約 1MHz)のものを使用し、周波数帯域は 60kHz~1000kHz、AE センサの出力信号はプリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。また、AE 計測に際して、しきい値は 42dB、不感時間は 2ms とした。

5. 結果と考察

5.1 乾燥収縮シリーズ

5.1.1 乾燥収縮実験結果

各供試体の長さ変化率および重量変化率の平均値のグラフをそれぞれ図-7 および図-8 に、累積 AE ヒット数のグラフを図-9 に示す。

モルタル供試体は、コンクリートよりも多くの水分を保持しているため、長さ変化率および重量変化率が大きくなっており、材齢 91 日目では供試体 A の 2 倍程度になった。同様に、供試体 B の両変化率も大きく、これは、使用した骨材 B の吸水率が非常に高く、骨材内部に多くの水分を保持していたと考えられる。FA 供試体において、フライアッシュは収縮を抑制する効果があると考えられたが、材齢 42 日時点では両変化率において、供試体 B と同程度の変化率が確認された。重量変化率が大きくなった原因として、セメントの一部をフライアッシュに置換したため、セメントと反応しなかった水分が存在したと考えられる。しかし、長さ変化率が材齢 42 日以降から小さくなる結果となり、材齢 91 日付近では供試体 A と同程度の値をとっていることが確認された。

このように、長さ変化率および重量変化率からは、使用骨材による収縮特性の違いを主に材齢 42 日以降で明確に確認することができた。

図-9 より、材齢 14 日から材齢 28 日の間で、すでに各供試体特性の差異が顕著であることが確認できた。FA

供試体において、材齢初期に AE ヒット数の増加が顕著であることが確認され、図-7 および図-8 の両変化率も大きく、収縮が進んでいると推測された。供試体 B は、FA 供試体と同様に AE ヒット数が材齢初期より多く検出された。これは、骨材 B が安山岩であるために強度が低く、モルタル部分の収縮により骨材 B が圧縮変形を起こしていることが原因であると考えられる。AE 法による結果では、供試体 B の継続的な増加が特徴的であった。また、使用材料の異なるコンクリート供試体の収縮特性を材齢 1 ヶ月程度で評価できる可能性が認められた。

そこで、横軸に長さ変化率、縦軸に累積 AE ヒット数を取り、材齢 7 日から 91 日まで 7 日間ごとにプロットしたグラフを図-10 に示す。供試体 A は、モルタル供試

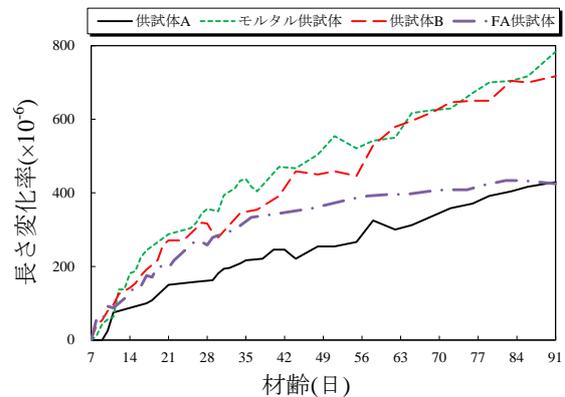


図-7 各供試体の長さ変化率

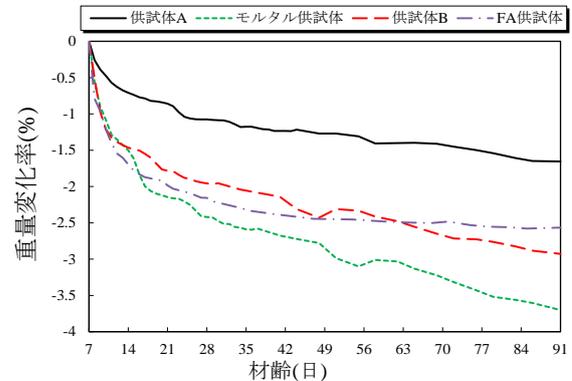


図-8 各供試体の重量変化率

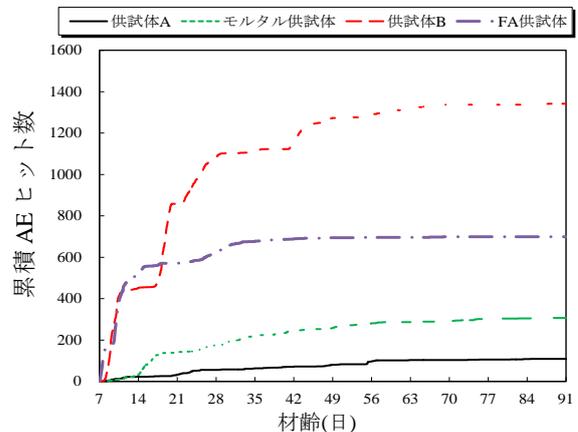


図-9 各供試体の累積 AE ヒット数

体と比較すると AE 発生は同程度に推移するが、骨材がモルタルの収縮を拘束していることが確認できた。さらに、供試体 B と比較すると骨材 B がモルタルの収縮を拘束できず多くの AE が発生していることが確認できる。これより、粗骨材がコンクリートに与える影響は大きく、粗骨材の選定は非常に重要であると確認できる。また、フライアッシュは乾燥収縮を抑える効果があるとされているが、材齢初期に大きく収縮を起こし、その時期に多くの AE が発生した。この初期材齢での収縮と AE 発生は今後さらに検討する必要がある。

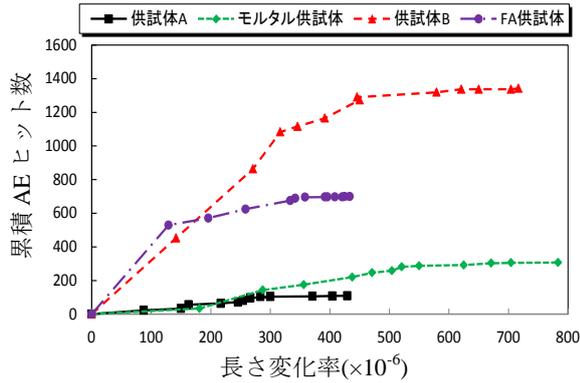


図-10 各供試体の長さ変化率と累積 AE ヒット数の関係

5.1.2 圧縮強度試験結果

表-3 に各供試体の重量、圧縮強度(f_c), 初期弾性係数 E_0 および DeCAT で評価した弾性係数 E^* を示す。なお、表にはそれぞれ試験供試体 3 本の平均とした。さらに、各供試体の E_0/E^* と長さ変化率の関係を図-11, 図-12, 図-13 および図-14 に示す。表-3 より全供試体において、 f_c は材齢が経つにつれ増加が確認されるが、 E_0/E^* は低下しているため、微小ひび割れの蓄積が推測される。ただし、 E_0/E^* の値が相対損傷度として数値的に 1.0 以上であるため、損傷はしていないと評価できる。また、図より全供試体において、収縮が進むにつれて E_0/E^* が低下していることから、収縮が原因として微小ひび割れが発生している可能性が推測できる。

表-3 乾燥収縮シリーズ試験結果

供試体	材齢(日)	重量(kg)	f_c (N/mm ²)	E_0 (kN/mm ²)	E^* (kN/mm ²)	E_0/E^*
供試体A	7	3.70	27.4	30.6	21.0	1.5
	14	3.72	31.2	33.3	25.7	1.3
	28	3.74	35.5	32.3	27.7	1.2
供試体B	7	3.77	20.9	25.9	14.1	1.8
	14	3.78	25.2	25.5	17.4	1.5
	28	3.79	27.2	25.1	19.4	1.3
モルタル供試体	7	3.66	21.8	32.3	18.5	1.7
	14	3.53	28.2	22.0	17.6	1.3
	28	3.40	31.1	20.4	19.9	1.0
FA供試体	7	3.39	23.2	36.1	17.6	2.1
	14	3.38	28.8	38.7	21.2	1.8
	28	3.37	33.0	40.7	25.1	1.6

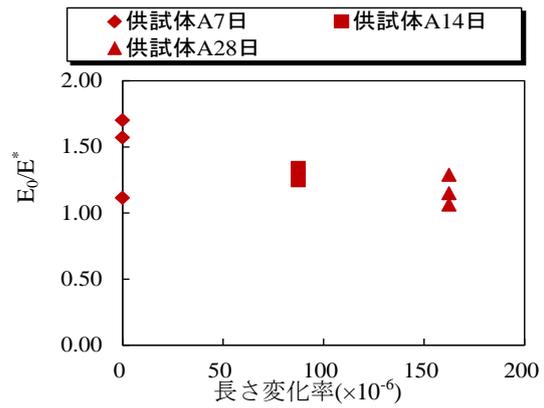


図-11 供試体 A の損傷度評価

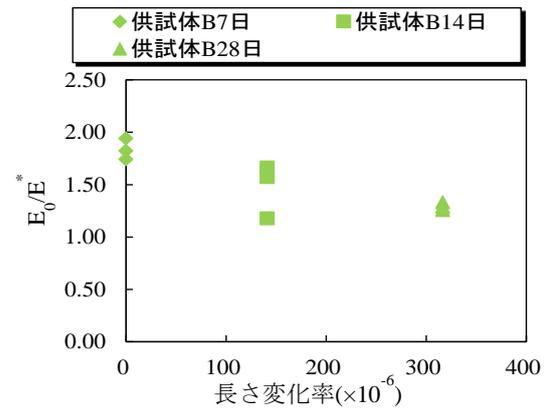


図-12 供試体 B の損傷度評価

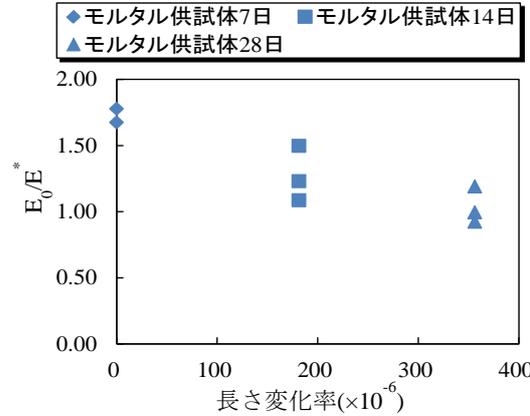


図-13 モルタル供試体の損傷度評価

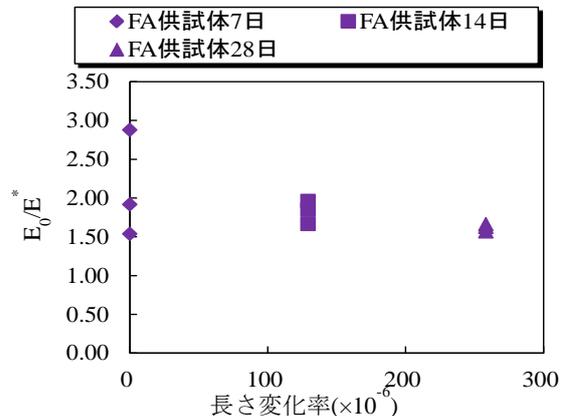


図-14 FA 供試体の損傷度評価

5.2 加水・ジャンカシリーズ

表-4 に標準供試体、加水供試体、ジャンカ供試体の重量、圧縮強度(f_c)、初期弾性係数 E_0 および DeCAT で評価された弾性係数 E^* 、AE ヒット発生総数 Tot-AE を示す。標準供試体に比べて加水供試体では強度低下が顕著であるが、弾性係数の低下はそれほどではない。一方、ジャンカ供試体では、重量の低下と弾性係数の低下が顕著である。また、AE ヒット発生総数は、ジャンカ供試体が最も多く、次いで加水が多い結果となった。

相対損傷度 E_0/E^* と強度の関係を図-15 に示す。これより損傷の可能性が考えられるのは、 $E_0/E^* < 1.0$ である標準供試体およびジャンカ供試体であるが、 E_0/E^* による評価において、健全なものは 1.0 あたりを上下することが知られているため、標準供試体およびジャンカ供試体は健全であると評価できる。しかし、ジャンカ供試体は標準供試体よりも E_0/E^* がやや低いことが確認されるため、標準供試体よりも損傷度が高い可能性が認められる。加水供試体では強度の低下は認められるが、損傷は認められないことがわかる。

表-4 加水・ジャンカシリーズ試験結果

供試体	重量 (kg)	f_c (N/mm ²)	E_0 (kN/mm ²)	E^* (kN/mm ²)	E_0/E^*	Tot-AE
標準	3.65	32.7	32.8	35.3	0.93	2346
加水	3.47	21.4	29.2	27	1.08	2710
ジャンカ	3.37	24.8	20.7	23.2	0.89	3678

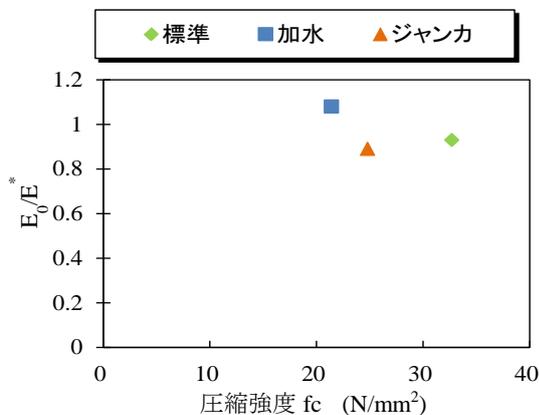


図-15 標準、加水およびジャンカの損傷度評価

6. 結論

コンクリート乾燥収縮において、骨材の違いによる特性評価を行うために、長さ変化および重量変化の計測、および AE の計測を行った。また、乾燥収縮、加水処理、およびジャンカによる欠陥を有する供試体の損傷度評価をするために、AE レートプロセス解析を行った。

まず、乾燥収縮シリーズの結果より、以下のようなことが明らかになった。

- (1) 長さ変化率および重量変化率より、材齢 42 日までは各供試体の違いを判断することは難しく、材齢

42 日以降で各供試体の明確な特性が確認された。また、吸水率の高い粗骨材を使った供試体やモルタル供試体などの、供試体内部に水分を多く含む供試体の収縮は大きくなる傾向が認められた。

- (2) AE 発生挙動より、累積 AE ヒット数では長さ変化率および重量変化率よりも早期に使用材料によるコンクリートの乾燥収縮特性を捉えられる可能性が認められた。また、AE 発生挙動と長さ変化率とを比較することで、モルタルの収縮を抑える粗骨材の拘束力を明確に評価することができた。
- (3) AE レートプロセス解析より、全供試体の材齢 28 日時点において、乾燥収縮により供試体の微小ひび割れの蓄積が推測されたが、 E_0/E^* の値が相対損傷度として数値的に 1.0 以上であったため、損傷に至っていない評価となった。

次に、加水・ジャンカシリーズの結果より、以下のようことが明らかになった。

- (4) 圧縮強度試験より、標準供試体に比べて加水供試体では強度低下が顕著であったが、弾性係数の低下はそれほどではなかった。一方、ジャンカ供試体では、強度低下は加水ほどではないが、重量および弾性係数の低下が顕著であった。
- (5) AE レートプロセス解析より、損傷が認められるものはなかった。しかし、初期欠陥であるジャンカにより、損傷度が高くなる可能性があることが評価することができた。

参考文献

- 1) Ohtsu, M. and Grosse, C, Acoustic Emission Testing, Springer, 2008.
- 2) Suzuki, T., Ohtsu, M. and Shigeishi, M: Relative Damage Evaluation of Concrete in a Road Bridge by AE Rate Process Analysis, Materials and Structures, Vol. 40, No. 2, pp. 221-227, 2007.
- 3) 鈴木哲也, 大津政康: 東日本大震災で被災したコンクリート構造物の定量的損傷度評価, 第 39 回セメント・コンクリート研究討論会論文報告集, pp. 65-70, 2012
- 4) Shah, S. P., Swartz, S. and Ouyang, C., Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, pp. 452-459, 1995.
- 5) 大津政康: アコースティック・エミッションの特性と理論 (第 2 版), pp.44-49, 森北出版, 2005.8
- 6) 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, Vol.26, No.1, pp.1791-1796, 2004.