

構造体コンクリートの破壊挙動モニタリングによる損傷度評価 Damage Evaluation of Structural Concrete based on Fractures Process Monitoring

鈴木哲也*・大津政康**
Tetsuya SUZUKI* and Masayasu OHTSU**

* 正会員 博士(工学) 日本大学助手 生物資源科学部生物環境工学科 (〒252-8510 神奈川県藤沢市亀井野 1866)

** 正会員 工学博士 熊本大学大学院教授 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本県熊本市黒髪 2-39-1)

The durability of concrete structures decreases easily due to such physical or chemical environmental effects as freezing-thawing process, chemical attack, fatigue or carbonation. The degree of damage in concrete is, in most cases, evaluated by a compression test and a rebound hammer test. For effective maintenance of concrete structures, it is necessary to evaluate not only the strength of concrete but also the damage degree. Quantitative damage evaluation system of concrete is proposed by applying acoustic emission (AE) method and damage mechanics. The procedure is named DeCAT, which is an abbreviation of "Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique". In this study, the relative damage evaluation of concrete by DeCAT in core tests. Core-samples were collected from a reinforced concrete water channel that had been used for 23 to 73 years. Mechanical properties of compressive strengths and Young's moduli were measured during the compression test, and dynamic Young's moduli were calculated from a longitudinal wave velocity. By estimating the concrete damage, it can be quantitatively evaluated from AE generating behavior under compression test and Calm ratio under cyclic loading test.

Key Words : AE, rate process theory, damage mechanics, DeCAT, structural concrete, Calm ratio

1. はじめに

近年、コンクリート構造物の維持管理の必要性が見直されるに伴い、コンクリート損傷の定量化手法の開発が急務な課題となっている。RC 構造物の耐久性の低下は、外部環境から物理および化学的影響を受けコンクリート損傷が蓄積された結果として引き起こされる。その原因には、荷重履歴による力学的損傷と環境要因による構造材料の変質の 2 種類が考えられる。実構造物のコンクリートを対象にした場合、損傷の進行は、これらが複合的に作用した結果であるが、明確に影響因子を区分することは困難である。このことから、コンクリート損傷を定量的に評価するためには、圧縮強度や弾性係数などの力学特性と損傷との関係を検討し、各種影響因子を踏まえた判断指標を定義することが合理的である。

損傷力学は、材料の損傷度を有効断面の減少により定義するもので、Kachanov により提案されて以来、各種構造材料において力学特性との関連が検討されてきた。筆者らは、損傷力学理論の初期損傷度概念を用いて健全時の弾性係数 E^* を定義し、アコースティック・エミッション (Acoustic Emission; AE) 法により計測したコア・コンクリートの圧縮破壊過程における破壊挙動から定量的損傷度評価を試みている^{1), 2), 3)}。これは、コンクリートの圧縮応力下での AE 発生挙動を AE レートプロセス解析により近似し、応力-ひずみ挙動から損傷パラメータを評価

するものである。既に水中凍結融解処理 (JIS A 1148) や促進中性化処理、アルカリ骨材反応 (ASR)、既設構造物から採取したコア供試体を用いて損傷の進行と評価値との関係を確認している。加えて、評価過程のプログラム化により DeCAT (Damage Estimation of Concrete by Acoustic Emission Technique) を提案し、計測結果のデータベース化と合わせて構造体コンクリートでの損傷度評価精度の向上を試みている。

本研究では、既往の研究では十分に行われていない構造体コンクリートを対象に施工年度の異なる 3 箇所でコア供試体を採取し、コンクリートの圧縮破壊挙動と物性値、空隙分布の関係から、コンクリート損傷と評価指標との関係を検討した。

コンクリート損傷は、DeCAT により弾性係数の相対値である相対損傷度を用いて評価した。加えて、繰返し載荷試験における除荷時の AE 発生挙動に着目した指標である Calm 比を用いて評価した。物性値評価は、応力-ひずみ曲線から求められる圧縮強度、初期接線弾性係数および終局時の割線弾性係数により行った。同一の供試体において、縦波速度からポアソン比を考慮した動弾性係数を評価した。コンクリート断面の空隙分布は、コア供試体の断面の可視画像を取得し、二値化処理を含む画像解析により空隙面積の観点から評価した。本論では、これらの物性値を含めた指標値とコンクリート損傷を圧縮破壊挙動の AE 発生挙動との関係から検証した。

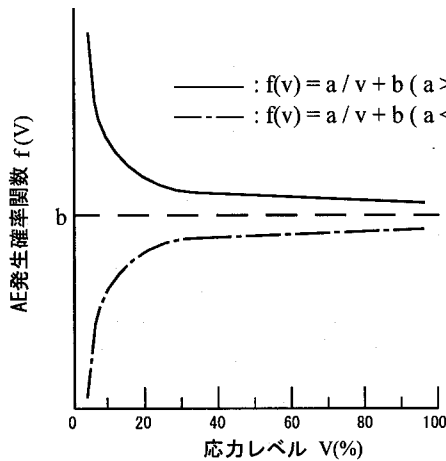


図-1 AE 発生確率関数と a 値の関係

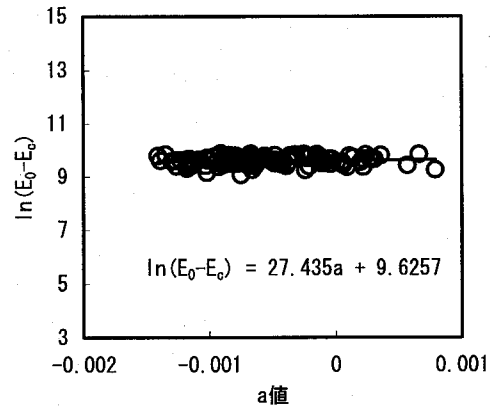


図-2 $\ln(E_0 - E_e)$ と a 値との関係

2. 解析手法

2.1 AE 発生挙動の定量的評価

コンクリート損傷は、コア供試体を圧縮破壊する際に AE 計測を導入し、応力下での AE 発生挙動から評価した。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、主破壊となり、耐荷力の低下をもたらす。ひび割れ発生に対応する AE 発生挙動は、微小ひび割れの集積により累進的に増加する。この過程は、ある応力レベルで発生するひび割れ総数に依存し、既存の破壊域が次の破壊域の進展を支配すると考えられる。その場合には確率過程論による取り扱いが可能であり、本研究では一軸圧縮下の AE 発生挙動の定式化にレートプロセス理論⁴⁾を適用した。

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

$$f(V)dV = \frac{dN}{N} \quad (1)$$

式(1)の $f(V)$ を以下の双曲線関数と仮定する。

$$f(V) = \frac{a}{V} + b \quad (2)$$

なお、 a 、 b は定数である。

式(2)で a 値は応力レベル V での AE 発生頻度を反映し、低応力レベルの段階では a 値の正負により AE の発生確率が大きく異なるモデルになっている。AE 発生確率関数 $f(V)$ と a 値の関係を図-1 に示す。 a 値が正ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで高いことを意味し、構造物が劣化した状態であると評価することができる。 a 値が負ならば、AE 発生確率関数は低応力レベルで低いことを意味し、構造物が健全な状態であることが評価できる。

式(1)および(2)より、AE 発生総数 N と応力レベル V

との関係を以下の式により近似できる。

$$N = C \cdot V^a \exp(b \cdot V) \quad (3)$$

なお、 C は積分定数である。

2.2 損傷力学による弾性係数の推定⁵⁾

損傷力学における損傷変数 Ω は弾性係数の相対的变化として、以下のように定義される。

$$\Omega = 1 - \frac{E}{E^*} \quad (4)$$

ここで、 E : コンクリートの弾性係数

E^* : 損傷のないと想定された場合の弾性係数

である。ローランドは、損傷変数 Ω と一軸圧縮下でのひずみとの関係を以下のように仮定している。

$$\Omega = \Omega_0 + A_0 \varepsilon^\lambda \quad (5)$$

なお、 Ω_0 : 一軸圧縮試験開始時点での初期損傷度

A_0 , λ : 材料固有の定数

式(4)および(5)より以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} \sigma &= E^* (1 - \Omega_0 - A_0 \varepsilon^\lambda) \varepsilon \\ &= E_0 \varepsilon - E^* A_0 \varepsilon^{\lambda+1} \end{aligned} \quad (6)$$

ただし

$$E_0 = E^* (1 - \Omega_0) \quad (7)$$

本研究では、AE 発生挙動をレートプロセス解析により、応力 - ひずみ曲線をローランドモデルにより近似した。定量的損傷度評価には、これらの結果を踏まえて健全時の弾性係数 E^* を推定し、初期接線弾性係数 E_0 との相対比である E_0/E^* を求めた。

その際、既設構造物から採取された少数の供試体でも

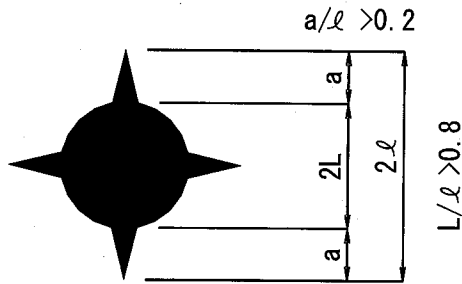


図-3 理論クラックモデル

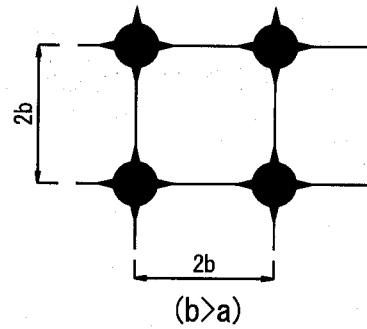


図-4 理論クラックモデルの連結

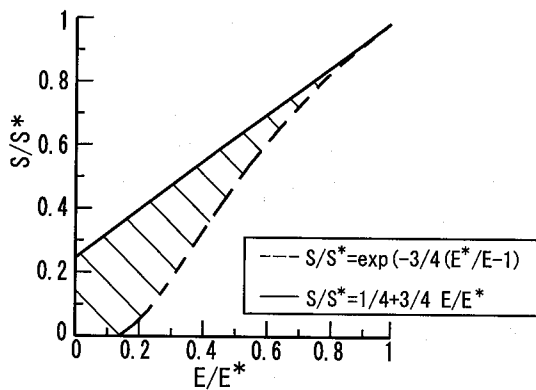


図-5 MOE-MOR の関係

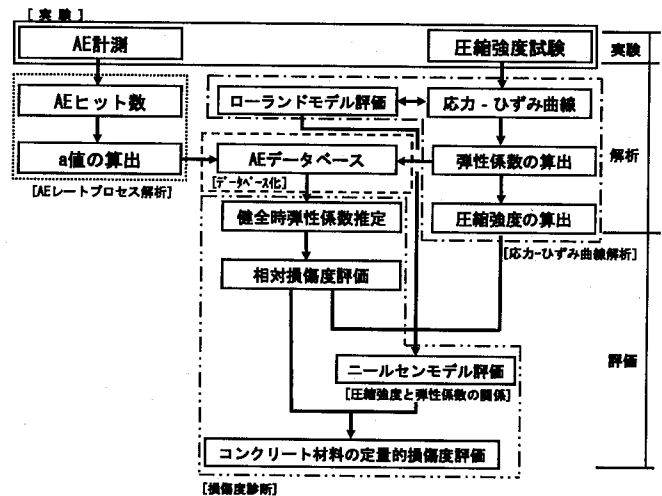


図-6 DeCAT 解析フロー

検討手法が適用できるよう、計測結果のデータベース (120 サンプル) を構築した⁹⁾。

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」の関係、「応力-ひずみ」の関係に着目した。一軸圧縮下での弾性係数の変化 $\ln(E_0 - E_c)$ とレートプロセス解析の a 値との関係を図-2 に示す。一軸圧縮下での弾性係数の低下 $E_0 - E_c$ は式 (4) より、

$$\begin{aligned} E_0 - E_c &= E^*(1 - \Omega_0) - E^*(1 - \Omega_c) \\ &= E^*(\Omega_c - \Omega_0) \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 E_0 : 初期接線弾性係数
 E_c : 終局時の割線弾性係数
 である。

図-2 中の近似式より、以下の式を得る。

$$\ln(E_0 - E_c) = \ln[E^*(\Omega_c - \Omega_0)]$$

これを直線近似すると、

$$\ln(E_0 - E_c) = aX + Y \quad (9)$$

ここで、 $E_0 = E^*$ のとき、 $\Omega_0 = 0$ 、 $a = 0$ と仮定すると、式 (10) が得られる。これにより、健全時の弾性係数 E^* を AE レートプロセス解析結果から推定することが可能となる。

$$E^* = E_c + e^Y \quad (10)$$

2.3 ニールセンモデルによる損傷度評価

Nielsen⁷⁾ は、図-3 に示すクラックを有する空隙が図-4 のように存在しているとき、弾性係数と圧縮強度の関係 (Modulus of Elasticity - Modulus of Rupture: MOE-MOR) として、以下の式を損傷力学理論より導いている。

$$\frac{S}{S^*} = \exp \left[-\frac{3}{4} \left(\frac{E^*}{E} - 1 \right) \right] \quad (11)$$

さらに、空隙が全てクラックとなった極限值として、次式が得られている。

$$\frac{S}{S^*} = \frac{1}{4} + \frac{3}{4} \frac{E}{E^*} \quad (12)$$

表-1 構造体コンクリート概要

No.	供試体名	建設時期	採取部位	構造	本数	備考
1	相模川 S9	1934 年	側壁・底版	現場打ちコンクリート	17	表面磨耗が顕在化
2	相模川 S36	1961 年	側壁	現場打ちコンクリート	10	試験方法: 単純荷重試験, 繰返し荷重試験
3	大和平野	1984 年	側壁・底版	側壁: 二次製品 底版: 現場打ちコンクリート	30	

*1 構造体は、いずれもコンクリート水利構造物（開水路）である。

表-2 コア供試体の力学特性

No.	供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	割線弾性係数 (GPa)	動弾性係数 (GPa)	縦波速度 (km/s)	中性化 (mm)
1	相模川 S9	13.2~21.9(18.1)	8.5~12.3(10.9)	13.5~29.9(19.8)	2.7~3.9(3.0)	3~48(22)
2	相模川 S36	25.7~40.7(30.5)	16.0~30.6(23.4)	12.8~32.7(24.2)	2.6~4.2(3.5)	2~14(7)
3	大和平野	14.0~41.8(27.5)	9.6~24.6(15.8)	12.9~31.5(20.5)	2.6~4.0(3.2)	1~26(9)

*1 圧縮強度、弾性係数、縦波速度および中性化深さのカッコ内数値は全サンプルの平均値を示す。

S: 損傷を受けた材料の強度

S*: 健全な材料に相当する強度

式(11)および(12)は、計算を行うと図-5に示す破線および実線となる。図-4のようなクラックシステムを有する損傷コンクリートでは、図-5の斜線部に MOE-MOR 関係が存在すると考えられ、本解析結果からクラックの進展に伴う損傷の有無を判断できる。本研究では、式(11)により健全時の強度特性 (S*) を評価し、構造体コンクリートの MOE-MOR 関係からコンクリート損傷を検討した。

DeCAT システムとは、上記の 2.1 項から 2.3 項を一連の解析として行うものである。図-6に解析フローを示す。

3. 実験概要

3.1 供試体

供試体は、打設後 73 年、46 年および 23 年経過したコンクリートである。供試体の概要を表-1に示す。構造物からは、径 10cm、高さ 20cm のコア供試体を合計 57 本採取した。構造体は水利構造物として使用されており、コンクリートと送流水との境界において表面磨耗の影響が顕在化していた。表層部において中性化が 1mm から 48mm 確認された。圧縮強度や弾性係数についても、中性化深さ同様、供試体による相違が認められた (表-2)。

3.2 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験では、コア供試体中央部に AE センサを設置し、圧縮破壊挙動をモニタリングした。供試体の上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って摩擦により発生する AE を低減させた。AE 計測では、広域帯型 (共振周波数: 約 1MHz)

の AE センサを使用した。周波数帯域は 60kHz~1MHz である。検出された AE 信号は、プリアンプ 40dB、メインアンプ 20dB の計 60dB で増幅した。しきい値は 42 dB に設定し、不感時間は 2msec とした。

3.3 動弾性係数評価

コンクリートの損傷度の目安として式(13)を用いてポアソン比を考慮した動弾性係数を算出した。

$$V_p = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1-2\nu)(1+\nu)}} \quad (13)$$

ここで、 V_p : 弾性波の波速測定試験による縦波速度 (m/s), E_d : 動弾性係数 (GPa), ν : ポアソン比, ρ : 供試体の密度 (kg/m³)

ポアソン比は、一軸圧縮試験から求めた応力-ひずみ曲線より求めた。縦波速度は、P 波計測装置 (東横エルメス社製) を用いて透過法により評価した。

3.4 空隙評価

コンクリート断面の空隙分布を画像解析により評価した。既設構造物より採取した供試体は、中性化試験後、表面より 2cm の部位をコンクリートカッターで切断し、切断面から 5mm 深まで研磨した。これは、表面から約 2cm の範囲においてコンクリート表面の磨耗の影響が顕在化していたためである。

研磨後、コンクリート断面が平滑であることを確認した後に蛍光剤を塗布し、近赤外線を照射して空隙を可視化した。空隙断面の定量的評価は、可視画像 (写真-1) から二値化処理を含む画像解析により面積 0.5mm² 以上を対象に行った。

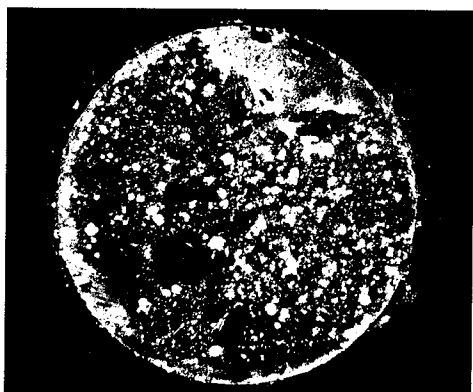


写真-1 空疎構造 (相模川 S9)

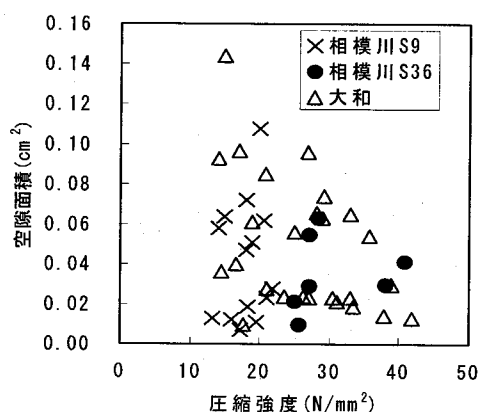


図-7 圧縮強度と空疎面積の関係

4. 実験結果および考察

4.1 コンクリート物性と空疎分布特性

(1) コンクリート物性評価

打設年度の異なる3箇所の既設構造物から採取した構造体コンクリートは、物性および空疎分布において異なる傾向が確認された。

昭和9年に打設されたコンクリート(表-1“相模川S9”)は、水流による表面磨耗が顕在化していたことから、コア供試体上部約2cmの磨耗部を削除した後に一軸圧縮試験を行った。力学特性は、圧縮強度13.2~21.9 N/mm²(平均18.1 N/mm²)を示し、終局時の割線弾性係数は8.5~12.3 GPa(平均10.9 GPa)を示した。同一路線で昭和36年に改修した区間から採取したコア供試体(表-1“相模川S36”)では、昭和9年施工区間とは異なり、圧縮強度が平均値で1.69倍の30.5 N/mm²(25.7~40.7 N/mm²)を示し、割線弾性係数も同様の傾向が確認された。打設後23年経過したコア供試体(表-1“大和平野”)は、圧縮強度14.0~41.8 N/mm²、割線弾性係数9.6~24.6 GPaが確認された。

動弾性係数は、12.8~32.7 GPaであり、供試体による明確な相違は確認されなかった。これは、縦波速度の供試体による相違が少ないことに起因していると考えられる。

中性化深さは、相模川S9において中性化の進行が確認された。相模川S36および大和平野では、平均7~9mmであり、明確な供試体による相違は確認されなかった。

(2) 空疎分布と力学特性の関係

コンクリートの力学特性と空疎構造に関する既往の研究では、強度と空疎量や空疎径分布範囲が耐久性と密接に関連していることが明らかにされている⁸⁾。本研究では、コンクリートの空疎分布の中でも力学特性に影響が大きいと考えられるエントラップトエア(寸法約1~10mm)を対象に、コア断面での分布特性を検討した。なお、本論では、空疎面積(平均値)に着目して議論を進める。

供試した構造体コンクリートでは、平均空疎面積の増

加に伴い、画像解析から明らかになった空疎面積の最大値と最小値の範囲が増加する傾向が確認された。昭和9年に打設されたコンクリート(“相模川S9”)では、空疎面積の平均値が0.05 cm²(範囲1.47 cm²)であるのに対して、昭和36年施工区間(“相模川S36”)では、0.03 cm²(範囲1.27 cm²)と相模川S9の約60%であった。両サンプルの力学特性は、前述4.1(1)項で言及したとおり、相模川S36が相模川S9と比較して平均強度で1.69倍が確認されている。既往の研究では、コンクリート強度を支配する要因として、骨材とモルタルとの遷移帯の範囲や空疎構造の関係が指摘されている。特に空疎率と強度との関係から両者の評価式も提案⁹⁾されており、相関の高さが推察される。本研究で用いた供試体の圧縮強度と平均空疎面積の関係を図-7に示す。両指標の関係は、低強度コンクリートほど供試体による空疎面積の相違が拡大する傾向が確認された。平均空疎面積の範囲は、圧縮強度の増加に伴い0.13 cm²(0.01~0.14 cm², 圧縮強度15 N/mm²部分)から0.04 cm²(0.01~0.05 cm², 圧縮強度40 N/mm²部分)に減少した。この同一圧縮強度での平均空疎面積の相違は、圧縮強度が空疎構造のみならず骨材やモルタル成分などの影響を受けることに起因していると考えられる。コンクリート材料では、物理的損傷が進行(クラックが進展)したものほど空疎構造が発達し、かつ圧縮強度の低下を引き起こすことから、平均空疎面積の相違はコンクリート材質と損傷因子とが複合的に影響した結果であると考えられる。

コンクリート物性値は、圧縮強度やひずみが負荷状態に依存した状態量であるのに対して、弾性係数は負荷状態に依存しない材料特性である。このことから、本研究では、材料特性である弾性係数に着目し、弾性係数の相対値によりコンクリート損傷の定量的評価を試みた(4.3項)。加えて、圧縮荷重過程のAE発生特性から、コンクリート破壊挙動をAEパラメータにより評価し、損傷度と破壊挙動との関係を考察した(4.4項)。

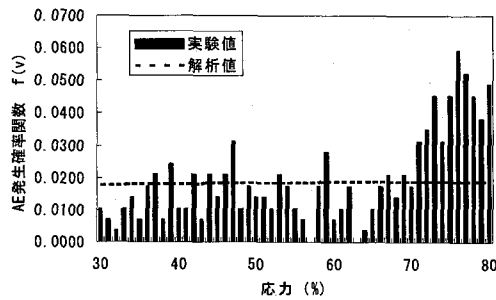


図-8 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(相模川 S9, 圧縮強度 16.8N/mm²)

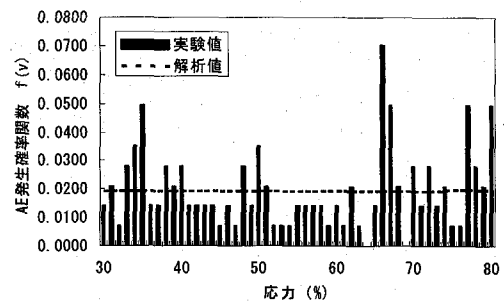


図-9 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(大和平野, 圧縮強度 14.0N/mm²)

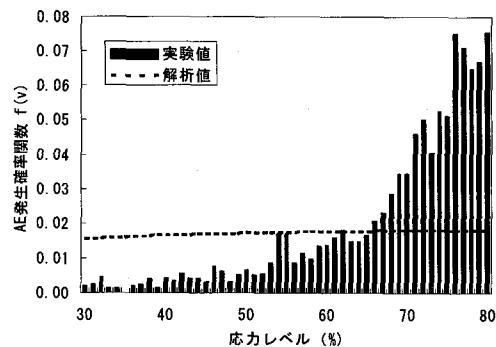


図-10 AE 発生確率関数と応力レベルの関係
(未損傷コンクリート, 圧縮強度 21.3N/mm²)

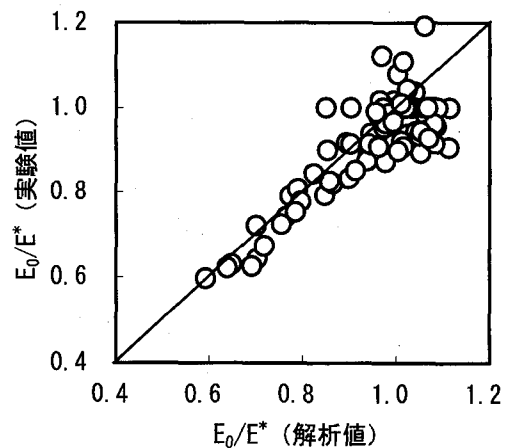


図-11 相対損傷度評価の実験値と解析値の比較²⁾

4.2 圧縮破壊過程における AE 発生挙動

コンクリート損傷度を圧縮応力下の AE 発生挙動から評価した。AE 発生挙動の解析には、レートプロセス理論を適用した。AE レートプロセス解析では、実測値から応力レベル 30%~80%の範囲を対象とした。これは、载荷初期に端面に発生する応力レベル 30%以下での AE と、80%以上の終局付近で加速度的に発生する AE は、損傷に直接関連するとは考えにくいためである。

実験結果である AE 発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルとの関係を図-8 および図-9 に示す。図中の実験値とは、式(1)による評価値である。解析値とは、式(2)により評価したものである。両図を比較すると、図-9 において 30~40%の低応力レベルでの AE の頻発が確認された。

既往の研究²⁾では、損傷を受けていない健全なコンクリートでは、図-10 に示す AE 発生挙動が確認されている。AE 発生確率関数 $f(v)$ は、载荷レベルの進行に伴い増加し、応力レベル 80%の終局時において高頻度の AE が計測される。応力レベル 30%~40%の低応力レベルでは、AE 発生確率関数 $f(v)$ が非常に低く、応力レベル 80%の 1.5%程度の値に留まっていることが確認されている。

図-8 および図-9 では、図-10 とは異なり、载荷初期において AE が頻発したことから、物性値の低下や空隙構造の粗大化に伴う損傷の蓄積が示唆された。

4.3 弾性係数の推定に基づく損傷度評価

(1) 相対損傷度評価値の実験値と解析値の比較

本研究では、弾性係数の推定に基づく構造体コンクリートの定量的損傷度評価を試みた。損傷力学における損傷度 Ω は、式(4)に示す通り、コンクリート損傷に関する定量的な指標として定義されている。本研究では、初期接線弾性係数 E_0 (実験値) と AE レートプロセス解析結果を踏まえて DeCAT により推定した E^* の相対比である E_0/E^* を求めることにより、相対損傷度評価を試みた。評価値の実験値と解析値の関係を図-11²⁾ に示す。図中の実験値とは、健全時の弾性係数として実験室内で打設した損傷の無いコア供試体の実験結果 (応力-ひずみ曲線) から算出した初期接線弾性係数 E_0 を用いたものである。解析値とは、健全時の弾性係数をデータベース (図-2) の活用し、DeCAT (図-6) により推定したものである。本図より、実験値と解析値が良い対応関係にあり、損傷を受けたコンクリートや建設当初の弾性係数が不明な構造体コンクリートなどにおいて、弾性係数の推定に基づく相対損傷度評価が可能であるものと考えられる。

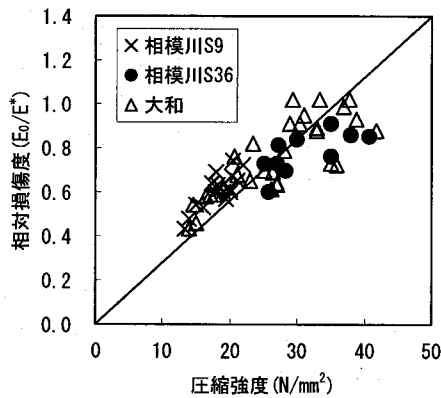


図-12 相対損傷度と圧縮強度の関係

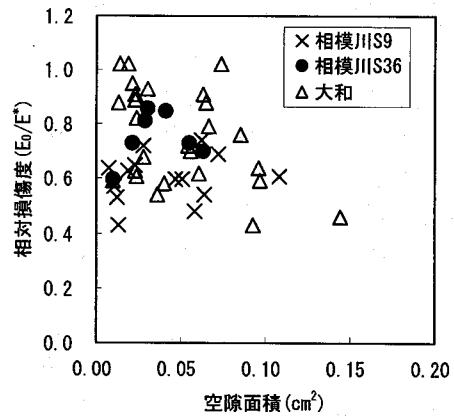


図-13 相対損傷度と空隙面積の関係

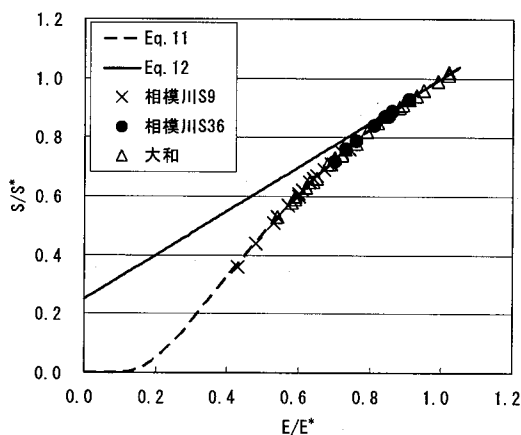


図-14 MOE-MOR の関係

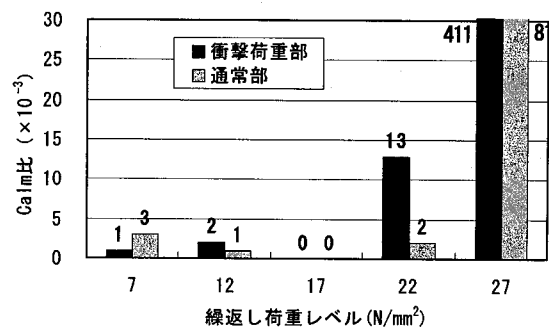


図-15 載荷重条件の異なる構造体コンクリートでの CaIm 比の比較

(2) 損傷度評価値と圧縮強度の関係

相対損傷度と物性値の関係を圧縮強度の観点から考察した。両指標の関係を図-12に示す。本図より評価値と圧縮強度とが良好な対応関係にあることが確認できる。加えて、全体の傾向として相対損傷度が1.0以下(相対損傷度<1.0:損傷有り)となっており、供試したサンプルの損傷度と力学特性とが密接に関係していることが示唆された。

相対損傷度と空隙面積(平均値)の関係は、相対損傷度の低下に伴い空隙面積の分布範囲が増加する傾向が確認された(図-13)。

これらのことから、健全時の弾性係数 E^* の推定に基づく相対損傷度評価は、構造体コンクリートにおいて、圧縮強度などの力学特性と共に、供試したコンクリート材料の物理的損傷を定量的に評価できる指標であると考えられる。

損傷度の推定精度とコンクリート材質との関係については、圧縮強度の低いもののほど空隙面積の分布範囲が増加することから(図-7)、低強度コンクリートほど物性値と空隙構造との相関が弱くなり、結果として損傷度の推定精度が影響されるものと考えられる。

(3) MOE-MOR の関係

相対損傷度と圧縮強度との密接な関係が明らかになったことから、ニールセンモデルによるMOE-MORの関係による損傷度評価を試みた(図-14)。構造体コンクリートの健全時の圧縮強度(S^*)は、式(11)により推定した。

ニールセンモデルの理論式と解析値の関係から、構造体コンクリートは相対弾性係数(=相対損傷度; E_d/E^*)の低下に伴い相対強度(S/S^*)が減少する傾向が確認された。

4.4 CaIm比を用いたコンクリート破壊挙動評価

コンクリートに代表される多孔質材料の破壊挙動は、終局時までに各種の破壊段階が存在する。AE法によりコンクリート損傷度を定量的に評価する指標として除荷時のAE発生挙動に着目したCaIm比(Ratio of cumulative AE activity under unloading to that of previous maximum loading cycle)⁹⁾が提案されている。本研究では、CaIm比を用いて既往載荷履歴の異なる供試体の破壊挙動を繰返し載荷試験により評価した。

CaIm比とは、式(14)に示す、除荷時のAE発生頻度に着目した指標である。

$$Calm比 = \frac{\text{除荷時に計数されたAEヒット数}}{\text{履歴のサイクル中に計数されたAEヒット数}} \quad (14)$$

検討結果を図-15に示す。供試したコンクリートは、表-1に示す相模川S36の衝撃荷重(鉄道)を常時受けている側壁部(以後、“衝撃荷重部”と記す)と土圧のみを受けている側壁部(以後、“通常部”と記す)である。圧縮強度は、通常部26.8N/mm²に対して、衝撃荷重部25.9N/mm²であり、圧縮強度の相違は3%(25.9/26.8=0.97)である。

検討の結果、載荷初期の繰返し載荷レベル12N/mm²まではCalm比が $1.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-3}$ であり、除荷時AEの頻発は確認されなかった。17N/mm²では、通常部と衝撃荷重部では共に除荷時のAEは確認されなかったが、17N/mm²以上の載荷レベルでは、衝撃荷重部においてCalm比の急増が確認された。本試験は、少数の供試体による検討結果であることから、確定的な議論は困難であるが、圧縮強度がほぼ同一だとしても、既往載荷履歴の相違により載荷試験時のAE発生挙動は異なるものと推察される。通常部では、最大荷重の81%程度(=22N/mm²/27N/mm²)までは構造材としての安定性を確保できるが、衝撃荷重部では65%程度(=17N/mm²/26N/mm²)で除荷時においてもクラックが進展しているものと考えられる。

以上の結果から、供試した構造体コンクリートでは、AEパラメータであるCalm比を用いた除荷時のAE発生特性から、既往載荷履歴の相違による損傷の蓄積が破壊挙動に影響していることが示唆された。

5. まとめ

本研究では、AE計測を一軸圧縮試験に応用し、構造体コンクリートの定量的損傷度評価を試みた。その結果、圧縮応力下でのAE発生挙動は、コンクリート破壊挙動と物性値との緊密な関係が示唆された。AE発生挙動の定量的評価には、AEレートプロセス解析を含む一連の提案手法をまとめたDeCATと除荷時の指標であるCalm比を用いて行なった。以下に、本研究から明らかになった事項を列挙する。

- (1) 既設コンクリート構造物から採取した57本のコア供試体を用いて圧縮応力下での破壊挙動をAE法でモニタリングした結果、損傷が蓄積したコンクリートでは載荷初期の低応力段階からAEの頻発がAE発生確率関数 $f(v)$ と応力レベルの関係から明らかになった。
- (2) 健全時の弾性係数 E^* の推定に基づく相対損傷度と圧縮強度の密接な関係が示唆された。構造体コンクリートでは、損傷の進行に伴い強度特性の低下と平均空隙面積のサンプルによる相違(最大値と最小値の範囲)が拡大する傾向にあった。

- (3) 圧縮応力下でのコンクリート破壊過程を除荷時のAE発生挙動の指標であるCalm比を用いて評価した。既往の物理的作用(鉄道荷重、土圧)の異なるコア供試体を比較した結果、繰返し載荷試験でのCalm比の挙動から既往載荷履歴の相違による損傷の蓄積が示唆された。

参考文献

- 1) Suzuki, T., Komeno, G and Ohtsu, M.: Damage Evaluation of Concrete in a Road Bridge by DeCAT, The 11th Int. Con. Structural Faults+Repair-2006, CD-R, 2006.
- 2) 鈴木哲也, 米野現樹, 池田幸史, 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 E, Vol. 62, No. 1, pp. 95-106, 2006.
- 3) 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劣化コンクリートの定量的損傷度評価, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 1, pp. 1791-1796, 2004.
- 4) 横堀武夫: 材料強度学, 技報堂出版, 1955.
- 5) Suredra P.Shah, Stuart E.Swartz, Chengsheng Ouyang: Fracture Mechanics of Concrete, John Wiley & Sons, Inc., pp.452-459, 1995.
- 6) 鈴木哲也, 米野現樹, 磯田俊朗, 大津政康: AE法によるコンクリート力学特性の推定に基づく損傷度評価法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1841-1846, 2006.
- 7) Nielsen, L.F.: On Strength of Porous Material: Simple Systems and Densified Systems, Materials and Structures, vol.31, pp.651-661, 1998.
- 8) 笠井芳夫編著: コンクリート総覧, 技術書院, pp. 369-373, 1998.
- 9) 日本非破壊検査協会: NDIS2421 コンクリート構造物のアカースティック・エミッション試験方法, 2000.

(2007年4月12日受付)