

# AE法を用いた損傷発生確率論によるコンクリートの圧縮破壊過程の観察

熊本大学大学院 学生会員 ○堀川あさみ  
 熊本大学大学院 正会員 重石光弘

## 1. はじめに

全国約 72 万の道路橋梁のうち建設後 50 年を経過する施設の割合は、2029 年 3 月には 52% に達すると予想されている<sup>1)</sup>。このような橋梁やトンネル等のインフラを安全かつ安定して供用・稼働させるための保全においては、コンクリートの損傷・劣化過程の観察が特に重要である。そのため、コンクリートの健全性ならびに信頼性のさらなる合理的な評価手法が考案されることが望まれる。

そこで本研究ではコンクリート材料ではより重要視される圧縮強度特性とその破壊に至る損傷過程に着目し、ある強度水準を満たしたコンクリートでもその圧縮破壊に至るまで漸増する荷重に対し損傷を生じ易い、あるいは損傷を生じ難いといった性質、言い換えれば堅牢性 (robustness) について、確率論的信頼性解析を用いて考察を試みた。

## 2. 実験概要

本実験で使用するコンクリート供試体は、材齢 7 日、14 日、および 28 日の直径 100mm、高さ 200mm の円柱供試体各 5 本である。コンクリートの配合は、管理材齢 7 日、呼び強度 18 N/mm<sup>2</sup> を満たす既往の JIS A 5308 レディーミクストコンクリートの配合を参考に表 1 とした。コンクリートは材齢 7 日で呼び強度を十分満たすが、さらに材齢を経て品質を高進させ、つまり、圧縮強度や静弾性係数にて判定される圧縮荷重に対する抵抗性を高めた材齢 14 日および 28 日のコンクリートを準備した。

これらのコンクリート円柱供試体にひずみゲージおよび

表1 示方配合 (kg/m<sup>3</sup>)

C	W	S		G	AE 減水剤
早強 307	189	山砂 507	砕砂 396	碎石 1031	3.07

W/C = 61.5 %    s/a = 49.3 %    G<sub>max</sub> = 20 mm

表2 一軸圧縮試験結果

材齢	7 日	14 日	28 日
平均圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	29.2	32.9	34.8
平均静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	28.7	31.4	31.7
平均ポアソン比	0.20	0.21	0.22

コンプレッソメータを取り付け、JISA 1108 「コンクリートの圧縮強度試験方法」、ならびに JIS A 1149 「コンクリートの静弾性係数試験方法」に準じ、一軸圧縮荷重を実施した。

また、圧縮荷重によってコンクリートに生じる損傷を観察するために微小ひび割れの発生に伴う弾性波動、すなわちアコースティック・エミッション (AE) を検出することとした。150kHz 共振型 AE センサーを供試体の高さ中央の対角 2 箇所に取り付け、圧縮強度試験中の AE 波動を検出し、信号処理により各 AE 波動 (hit) の検出時間、最大振幅、エネルギー等の代表的な AE 波形パラメータを記録した<sup>2)</sup>。

## 3. 実験結果

得られた材齢ごとの圧縮強度と静弾性係数それぞれの平均を表 2 に、各 5 本の内の典型的な応力ひずみ曲線を図 1 に示す。これらより明確な材齢に伴う品質の向上が伺える。

図 2 に圧縮荷重試験において漸増する応力に対し AE 検出数の累積 (累積 AE ヒット) と活性度 (AE ヒットレート) の変化を示した。いずれの各供試体も荷重開始直後と降伏直前において AE が急激に発生している。AE ヒットレートはその応力における累積 AE ヒットの増分の傾きを表すが、材齢 7 日供試体では荷重初期から降伏直前まで恒常的に AE の発生が見られたのに対し、材齢 14 日供試体では AE は荷重初期から継続して発生していたが、およそ 14 N/mm<sup>2</sup> 以降から降伏直前までは沈静化した。一方、材齢 28 日供試体では荷重開始期に急増した後早々に AE は沈静化した。14 N/mm<sup>2</sup> 付近で微増に転じて降伏直前に急増している。

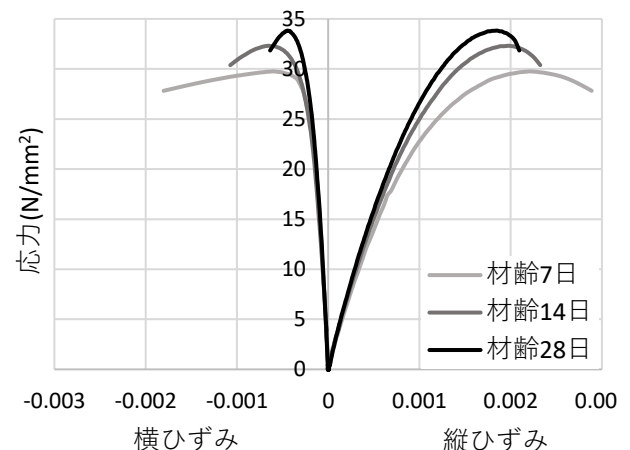


図1 応力ひずみ曲線 (典型例)

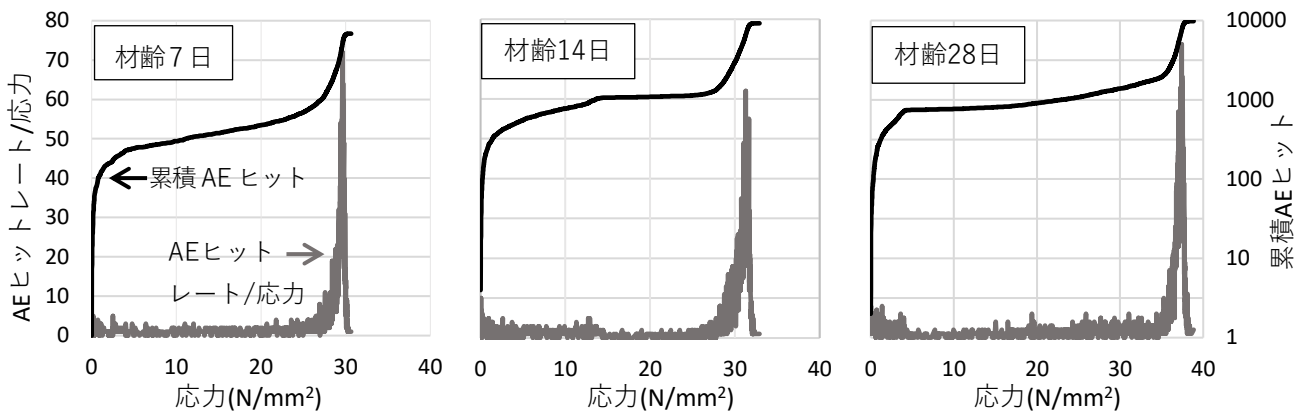


図2 圧縮荷重載荷時の累積AEヒットとAE活性度

#### 4. AEを用いた損傷発生確率(ワイブル解析)

前項で述べたようなAEの発生挙動の特徴を定量化する手法として統計的信頼性解析を試みる。載荷時に検出したAEを供試体中の故障の発生とみなし、故障要因となった荷重増加に伴うAE発生数に対して信頼性解析手法であるワイブル解析を適用できると考えた。供試体によって降伏荷重が異なるため降伏時応力(強度)を100%として正規化した応力レベルを故障要因 $x$ とする。一方、供試体の降伏時の累積AEヒット数を100%として正規化した応力レベル $x$ における累積AEヒット数を累積故障確率 $F(x)$ とすれば、次のように両対数直線近似で可視化することができる<sup>3)</sup>。

$$\ln \left[ \ln \left\{ \frac{1}{1-F(x)} \right\} \right] = m \ln x - \alpha \quad (1)$$

ここでパラメータ $m$ 値が、 $m < 1$ で初期故障型、 $m = 1$ で偶発故障型、さらに $m > 1$ で摩耗故障型に分類でき、 $m$ 値が大きいくほど故障の累積が降伏時に集中することを意味する。

試行として、AE検出しきい値を30dB、40dB、ならびに50dBと変化させた累積AEヒットを累積故障とみなした場合のワイブルパラメータ $m$ 値を図3に示す。供試体材齢つまり強度や弾性係数と $m$ 値との相関は、材齢14日供試体と材齢28日供試体との間に見られた。しかし、材齢7日供試体は強度も弾性係数も最小だが $m$ 値は最大である。材齢7日供試体は管理強度を満たすものの硬化の程度は軟弱で、低い荷重での変形による微弱なAEが検出されず累積AEヒットが過少となった可能性があり、載荷初期の微弱なAEを検出可能として確かめなくてはならない。また、図2に示されたように、載荷初期と降伏直前を除いた荷重範囲におけるAE発生挙動の特徴には明確な相違がみられるため、この荷重範囲に限定した検討も必要と考えられる。

#### 5. まとめ

材齢7日、14日、および28日のコンクリート圧縮強度

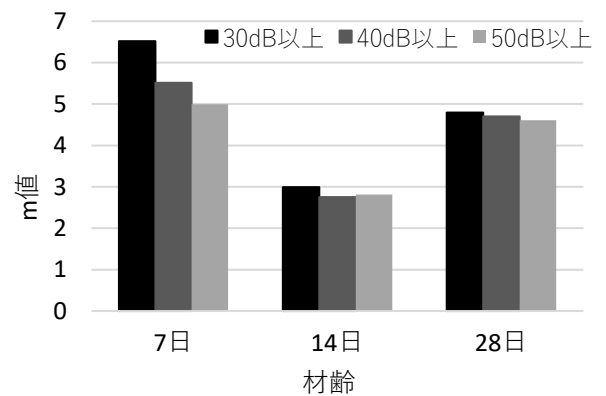


図3 ワイブル解析結果(m値)

試験を行い発生したAEを計測した。いずれの供試体も目標強度を十分に上回ったが、圧縮荷重過程におけるAE発生挙動には材齢による相違がみられた。そこで、それぞれ正規化された荷重を故障要因、累積AEヒットを累積故障確率としたワイブルパラメータ $m$ 値を求めた。その結果、材齢14日供試体と材齢28日供試体では材齢に伴い $m$ 値が増加し、圧縮強度と静弾性係数の上昇と相関がみられた。一方、材齢7日供試体の $m$ 値が最も大きくなった。材齢7日コンクリートは硬化の途中で未だ軟弱であったため載荷初期に発生するAEが微弱となり未検出だった可能性がある。ワイブルパラメータ $m$ 値を用いたコンクリートの堅牢性の判定は、材齢が十分経過した場合に可能と考えられる。

#### 参考文献

- 国土交通省: 社会構造に関する予測, 令和2年版国土交通白書, 第1部, 第2章, 第1節, 2020.
- 日本非破壊検査協会: アコースティック・エミッション試験II, 2008.
- 飯笹真也, 重石光弘, 浪平隆男: 再生粗骨材への圧縮載荷時における破砕値とアコースティック・エミッションのワイブル解析, コンクリート工学年次論文集, 33 (1), pp.1541-1546, 2011.