

V—7 コンクリートの一軸圧縮試験におけるAE現象について

道都旭大建設科 正員 ○榎井 明

北大工学部

渡邊慶博

北大工学部

中島 巖

1. 緒言

現在、各種材料の破壊過程や破壊機構に関する研究において、AE手法が使用されるようになってきている。AE (Acoustic Emission) とは、材料の微小破壊にともなう弾性波の放出現象に対し用いられる用語である。

本研究は、コンクリートの一軸圧縮試験におけるAEを調べ、この結果からコンクリートの破壊現象について考察したものである。実験としては、コンクリートの材質を変えて、応力、ひずみ、AEカウントrate、およびAE振幅分布などを計測した。この結果、コンクリートの破壊過程で発生するAEは、内部の破壊現象と対応しマイクロクラックの集積と連結の結果、終局破壊にいたることが明らかになった。

2. 実験手法

2-1. 供試体

実験に使用した供試体 (150x300mm) の配合と材令は、右表の通りである。粗骨材の最大寸法は20mmである。供試体は、練上げ後1日で脱型し、水中養生 (20°C±2°) の後、試験日前日に水槽より出し室内に放置した。

記号	内 容	配合 C : G : S : W	材 令
SS	モルタル	1 : 0 : 1.8 : 0.6	135 mm
SC	セメントペースト	1 : 0 : 0 : 0.4	135 mm
SA	ペースト+砂利	1 : 1.8 : 0 : 0.45	135 mm
06	コンクリート	1 : 2.9 : 2 : 0.55	8, 4, 21, 28, 190 mm

2-2 圧縮試験

実験では、供試体端面をイオウキマッピングし、加圧板との間には、試験機からの機械的雑音と端面接触にともなう雑音を除去するために、テフロンシートを介した。ひずみ測定は、軸ひずみ ϵ_z と円周ひずみ ϵ_θ を測定し、体積ひずみ ϵ_v は、 $\epsilon_v = \epsilon_z - 2\epsilon_\theta$ の関係から求めた。

2-3 AEの計測

供試体の側面に貼りつけた、円弧状に加工した金具にセンサーを取り付けてAEを検出した。AE、応力、ひずみ、の計測システムをFig.1に示す。このAE計測システムはDunegan/Endevco社のユニットと丸文社製のシグナルプロセッサを組み合わせたものである。センサーはS140B (共振周波数140 KHz) を用いた。センサーで検出したAE信号をアンプで40dB、シグナルコンディショナーで40dB、合計80dB増幅した。シグナルプロセッサには、AEカウント数と同時にストレーンアンプから応力とひずみの信号が入力され、相互の関係を表示した。一方、アンプの出力をアンプリティードディラクターに入力することによって、AE波の最大振幅を対数パルスに変換し、ディストリビューションアナライザーで最大振幅イベントの頻度分布 (以後、この分布をAEの振幅分布と称する) を分析した。なお、振幅分布の測定にあたっては、各荷重レベルでその都度、載荷を中断することによって求めた。

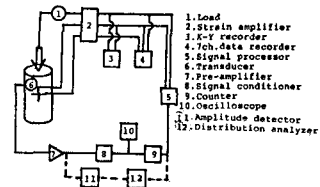


Fig. 1 Block diagram of instrumentation for AE monitoring and stress-strain measurement

3. 実験結果

3-1 コンクリートの材質とAE振幅分布の関係

ペースト、ペースト+砂利、モルタル、コンクリートの各供試体について、荷重レベル毎のAE振幅分布の結

果を、それぞれ Fig.2—Fig.5 に示す。これらの図は、 AE の累積イベント数 N と AE 最大振幅 a の関係を両対数座標にプロットしたものである。これらの結果から N と a とは、ほぼ直線関係にある。すなわち、地震学の分野において地震の規模と発生度数の間に成立する統計関係¹⁾ (Gutenberg-Richter の式 および 石本-飯田の式) が、コンクリートの破壊に対して成立するとみなされる。

いま、Gutenberg-Richter の式において、分布の勾配を表わす係数 b 値を求めてみると、ペースト 0.82, ペーストモルタル 1.13, モルタル 1.64, コンクリート 1.13 となった。Fig.2 (ペースト) では、初期荷重から破壊まで、分布に表われた変化は少ない。Fig.3 (モルタルとペースト) の振幅分布は、各荷重レベルでの乱れが多く、50t から 60t までの最終段階で振幅の大きい AE が急に増加している。Fig.4 (モルタル) では、35t から 50t の間に

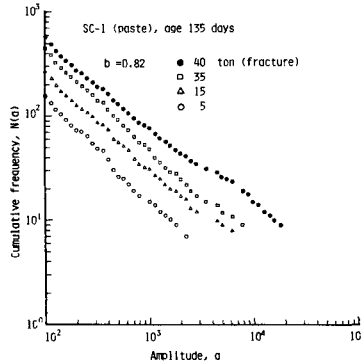


Fig. 2 Cumulative frequency vs. amplitude at four load levels in the compression of paste

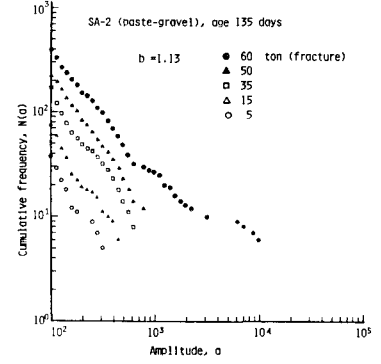


Fig. 3 Cumulative frequency vs. amplitude at five load levels in the compression of paste-gravel specimen

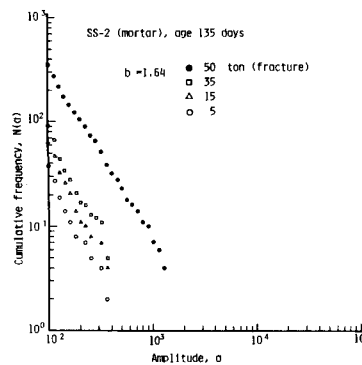


Fig. 4 Cumulative frequency vs. amplitude at four load levels in the compression of mortar

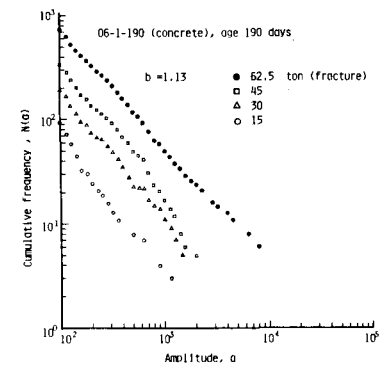


Fig. 5 Cumulative frequency vs. amplitude at four load levels in the compression of concrete

AE イベントが急に増加している。Fig.5 (コンクリート) では、最終段階で振幅の大きい AE が目立っている。以上の結果を、破壊応力比と b 値の関係についてまとめると、Fig.6 の様になる。同図より、 b 値はモルタル、コンクリート、ペーストの順に値が小さくなっている。破壊応力比の初期の段階では、ペースト以外、 b 値は大きい。応力比が 50% をこえると、 b 値の変化は少なくなり、最終段階では更に低下する。Fig.6 の結果から、初期荷重の段階で発生する AE は振幅の小さいものが多く、内部では極めて小さい破壊が数多く生じたものとみられる。後半では、 b 値の変化は少ないが Fig.3 にみられるように、直線から外れた振幅の大きい AE が認められるが、これは比較的大きな破壊がこの時生じたことを指示している。

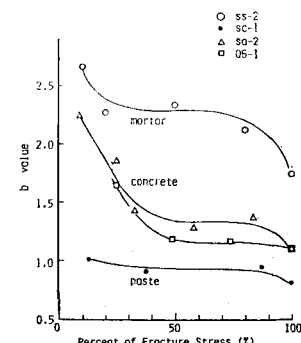


Fig. 6 b vs. normalized stress in uniaxial compression

3-2 体積ひずみとAEカウントrateの関係

材令8日、14日、21日、28日、のコンクリート供試体4本ずつについて行なった圧縮試験の結果から、平均圧縮強度は、それぞれ147, 189, 226, 255 Kg/cm^2 であった。これらの供試体から得られた結果をFig.7 - Fig.10に示す。これらの図は、応力と体積ひずみ、ポアソン比、および応力5 Kg/cm^2 毎のAEカウント数^{*1}との関係を示したものである。

図中、ポアソン比が連続的な増加を示す点

(開始応力点) および、^{*2}体積ひずみが減少から増加に反転する点(臨界応力点)を●印で示した。

Fig.7(材令8日)では、初期応力でAEは急激に増加したのち、破壊応力の約30%まで減少する。開始応力と臨界応力とはほぼ一致しており、破壊応力の約50%である。このことは、ポアソン比が増加しはじめると同時に材料内部の分離が始まったことを示している。AEはこの付近から増加しはじめ、破壊応力の約20%から急激に増加している。Fig.8(材令14日)では、AEは初期応力で急増する。この場合も約30%まで減少傾向を示す。

開始応力は応力比約63%で、この付近からAEは徐々に増加し始める。臨界応力は応力比約83%で、AEは急に増加する。Fig.9(材令21日)の場合については、初期応力でのAEは急激ではないが活発である。開始応力は応力比約61%で、このときAEは増加傾向を示している。臨界応力は応力比約92%でAEは急激に増加している。Fig.10(材令28日)の場合は、初期応力状態でもAEの増加は急激でないが、荷重の全域にわたってAEは平均して活発である。開始応力は応力比約66%、臨界応力は応力比約77%である。AEは後半に著しい増加を示している。以上の結果から、各応力レベルでのAEカウントrateの変化は各材令について、同一傾向を示している。

4. コンクリートの破壊に関する考察

コンクリートの一軸圧縮試験におけるAE現象としては、荷重の初期段階で活発であることと、体積ひずみが減少から増加に転ずる付近の後期の段階で急激に増加することが明らかにになった。特に、終局段階のAE現象に

*1 本文では、以後これをAEカウントrateと称す

*2 本文では、縮小側への体積ひずみの変化を減少と称し、膨張側への変化を、増加と表現する。

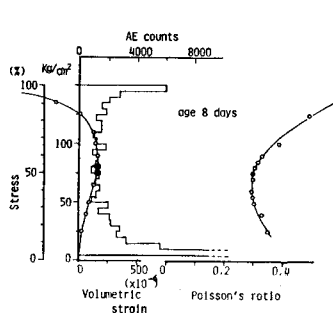


Fig. 7 Stress vs. volumetric strain, AE counts and Poisson's ratio for concrete

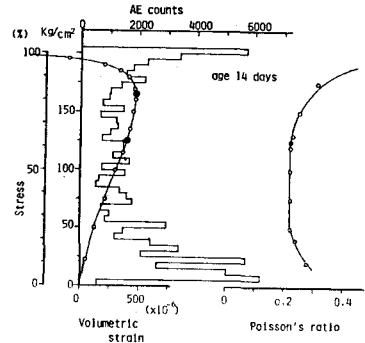


Fig. 8 Stress vs. volumetric strain, AE counts and Poisson's ratio for concrete

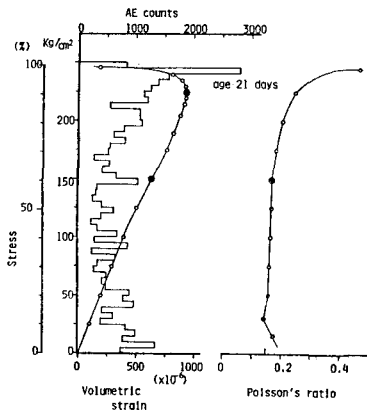


Fig. 9 Stress vs. volumetric strain, AE counts and Poisson's ratio for concrete

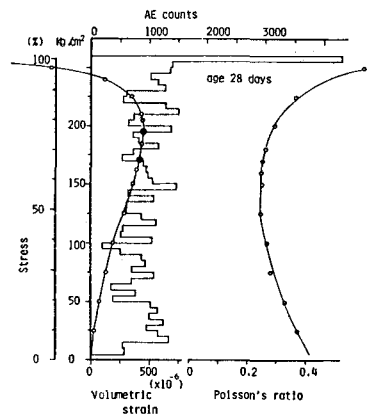


Fig. 10 Stress vs. volumetric strain, AE counts and Poisson's ratio for concrete

関しては、体積ひずみの増加に対応して、振幅の大きいAEの発生がみとめられる。このことは、Hsu²⁾やShah³⁾等が、コンクリートの破壊現象について指摘していることとよく符合する。すなわち、臨界応力状態に達した後、の応力状態では、コンクリート内部の粒子境界上にボンドクラックが急激に増加し、これらが連結されて、モルタル内を通過するクラックが生じるという解釈とよく対応している。これに対して、載荷の初期で発生するAEに関しては、AEカウント数が多い割には体積ひずみの増加は少ない。荷重レベル毎のAEの振幅分布の変化から、初期荷重で発生するAEには、振幅の小さいものが多く、小さな破壊が多数あったものと推定される。

以上述べたごとく、初期のAE活動で体積ひずみが減少しているのに対して、後期の活動では、体積ひずみが反転して増加した事象に対しては、現在、合理的な説明は困難である。いま、この問題に対して、1つの解釈をあげて試みるならば、次の様に考えられる。すなわち、初期の段階においてはクラックの方向性は無いが、後期の段階ではクラックの方向性が現われるという相関である。具体的に言えば、初期の段階においては、コンクリート内部の不均一な構造により、それらの欠陥においては、容易に、ランダムな方向に微小破壊が生じるものと考えられる。一軸圧縮応力下にあると、横方向の微小クラックの開口成分は肉迫されるために体積膨張の増分とはならない。一方、臨界応力状態になると、最大主応力方向のクラック、換言すれば縦割れが生じるものと推察される。このようなクラックの方向性は実際に観察される事象であり、Bieniawski⁴⁾などによりこれを理論的に考察とされている。いま、縦割れが生じると、それらの開口量は、全面的に体積ひずみの増加量となって現われ結果的には体積の膨張が生じる。このように考えれば、コンクリートの一軸圧縮試験において現われるAE活動と体積ひずみの変化との関係については一応の説明がつく。

5. 結 論

以上述べた、コンクリートの一軸圧縮試験における、ひずみとAEの計測結果から以下の事が明らかとなった。

- 1) 載荷の初期と後期で著しく特徴あるAE活動が現われた。
- 2) 載荷の初期では、振幅の小さい微小破壊が優先し、後期では、振幅の大きい破壊が目立った。
- 3) 載荷の初期過程では、AE活動が活発であるにもかかわらず、体積ひずみは減少した。
- 4) 載荷の後期過程では、AE活動が活発になると、それに体応して、体積ひずみは増加した。
- 5) これらの現象は、クラックの方向性を考慮することによって説明される。

参考文献

1. 宇津 徳治 「地震学」 共立全書
2. Hsu T., Slate F., et al., "Microcracking of Plain Concrete and the Shape of the Stress-Strain Curve," ACI Journal Proceedings V.60, No.2, Feb. 1963.
3. Shah S.P., and Chandra S., "Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete," ACI Journal Proceedings Sept. 1968 pp.770-781
4. Bieniawski Z.T., "Mechanism of Brittle Fracture of Rock," Int.J. Rock Mech. Min. Sci. V.4 1967