

爆薬駆動高速載荷による岩質材料の動的破壊実験

DYNAMIC FRACTURE EXPERIMENTS OF ROCK-LIKE MATERIALS
BY EXPLOSIVELY DRIVEN HIGH-SPEED LOADING

中村裕一*, 黒田泰徳**, 松本安喜***, 桐谷能生****

Yuichi NAKAMURA, Yasunori KURODA, Yasuki MATSUMOTO and Yoshio KIRITANI

*工博 八代高専教授 土木建築工学科 (〒866-8501八代市平山新町2627)

**八代高専専攻科環境建設工学専攻 (〒866-8501八代市平山新町2627)

***八代高専技術専門職員 技術室 (〒866-8501八代市平山新町2627)

****八代高専技官 技術室 (〒866-8501八代市平山新町2627)

キーワード：高速載荷、爆薬、き裂伝ば、高速度撮影

(high-speed loading, explosives, crack propagation, high-speed photography)

1. はじめに

高速載荷や衝撃的負荷を受けるコンクリート、モルタル、岩石などの岩質材料の変形性、強度変化やき裂進展挙動などの動的特性の解明は、破砕性や強震時の破壊挙動、爆破き裂制御などの問題に関係して重要である。初期の高速載荷実験では、強度の載荷速度依存性に関心が集まった。その後の実験的研究では、応力-ひずみ関係、ヤング係数などの載荷速度依存性が確認されているが、実験する上での困難さなどのために、これらの問題の十分な解明は未だなされていないようである¹⁾。

このような従来研究の背景の中で、著者らはこれまでに爆薬の動的作用に着目した装薬ホルダーを考案し、岩質材料中に進展方向が制御されたき裂を生じさせることが出来ることを明らかにしている²⁾。爆薬駆動高速載荷実験は、このような研究の取り組みを発展させたものであり、高速載荷時の岩質材料の強度変化や破壊挙動などの動的特性を調べる目的で、爆薬の爆発エネルギーを駆動源にした高速載荷装置を試作した。爆薬は非常に大きなエネルギーを放出するが、これを利用することによって、通常の試験機では困難な荷重速度を簡単な装置で安価に作り出すことが出来る。本報告では、試作した装置の概要と実験方法及びモルタルやコンクリートの圧

縮、圧裂引張試験における動的破壊現象を高速ビデオカメラで観察した結果について述べる。また、前述の装薬ホルダーを使用して実験を行ったコンクリート中のき裂進展挙動の観察結果についても述べる。

2. 実験方法

試作した高速載荷装置を図-1に示す。装置は、鋼製フレームに取り付けられた装薬室に市販の地震探鉱用電気雷管(6号)を装薬として装着し、その爆発力で負荷ピストンを駆動し、供試体に高速荷重を作用させようとするものである。この電気雷管には、主爆薬として0.4gのペンスリット(PETN)が使用されている。実験手順は、装薬室に電気雷管を装着した後、負荷ピストンを取り付け、装薬室上部の通水孔から水を装薬室に流し込み、充満させる。次に、これを鋼製フレーム上部に取り付け、負荷ピストン下部には球座を取り付けて載荷面とする。この載荷面と鋼製フレーム下部に取り付けられたロードセルの間に供試体を配置した後、装薬室上部の2個の固定ボルトをゆるめると、負荷ピストンの供試体側への運動が可能となる。電気雷管が起爆されると装薬室内に水中衝撃圧が発生し、負荷ピストンが駆動される。図-1からわかるように、負荷ピストンは、

れた爆薬の起爆によって生じた衝撃波は、くさび形空洞内を干渉しながらその先端に向かって伝ばし、爆発衝撃波の集中作用を作り出す。これにより、装薬孔の孔壁に作用する爆力の作用方向と作用時間の制御が可能となり、くさび形空洞先端位置の装薬孔壁面上に引張応力場が形成され、その位置を予定破断面方向に一致させることによって、き裂の進展方向を制御することを意図している。き裂がくさび形空洞先端に形成された後、爆発ガスが作用して、き裂進展が促進される。本実験に使用した供試体の形状は 30×30×10cm である。装薬孔は深さ 6cm で、供試体中央にある。

3. 実験結果及び考察

高速破壊現象を記録したビデオ画像の一例を図-4, 5, 6 に示す。図-4 は高速圧縮荷重作用下

表-1 供試体の力学的特性値

	モルタル	コンクリート
P波速度 (km/s)	3.77	4.50
S波速度 (km/s)	1.97	2.23
動弾性係数 (GPa)	20.5	29.0
圧縮強度 (MPa)	27.4	32.7
引張強度 (MPa)	2.73	2.70

でのモルタルの動的破壊挙動を示している。この時のロードセルの時間履歴の波形を図-7 に示す。ビデオ画像には、上側荷重面の運動開始が、No.4 フレームに捉えられている。供試体の爆裂的破壊挙動は、No.10 フレーム以後に捉えられている。図-4 から、この場合の破壊挙動として、供試体中央部が膨らみ、上部でせん断破壊が生じていることがわかる。これらは荷重面の端面拘束の影響と考えられ、供試体端面付近に沿って、せん断応力が生じ、供試

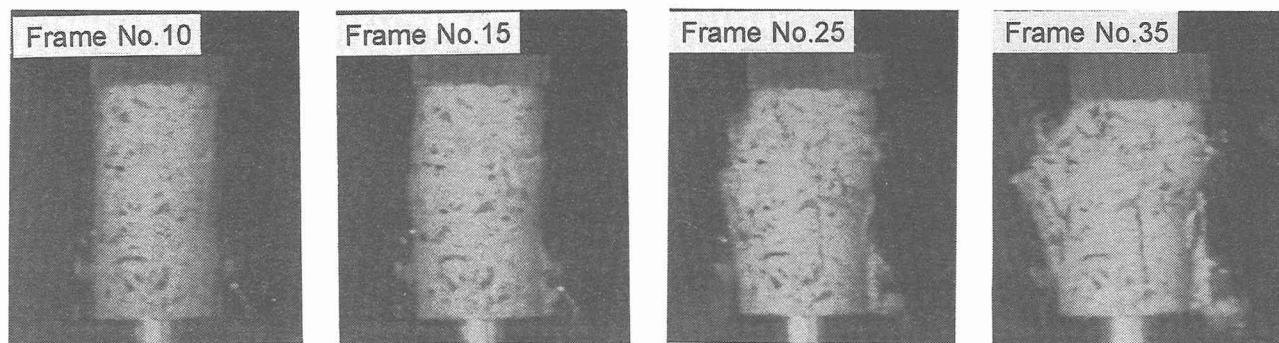


図-4 高速圧縮荷重作用下でのモルタルの破壊挙動 (ビデオ撮影速度:13500コマ/秒)

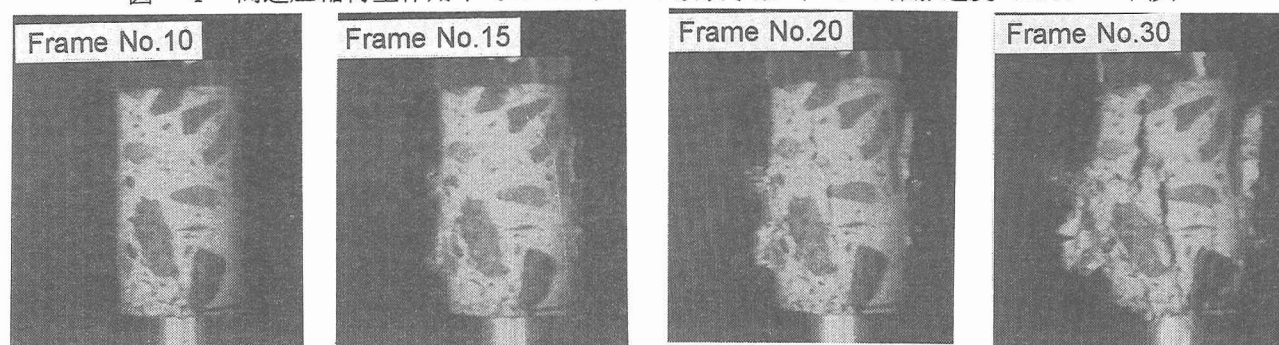


図-5 高速圧縮荷重作用下でのコンクリートの破壊挙動 (ビデオ撮影速度:13500コマ/秒)

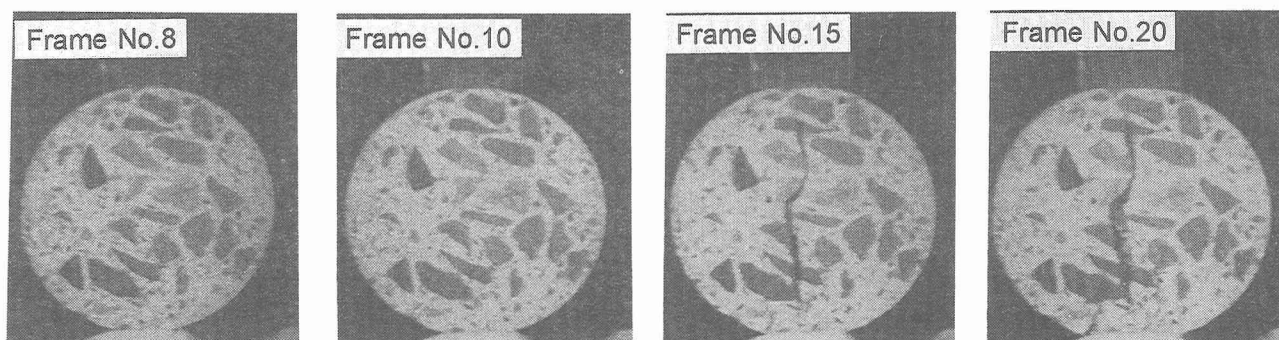


図-6 高速圧裂引張荷重作用下でのコンクリートの破壊挙動 (ビデオ撮影速度:13500コマ/秒)

体周縁部には応力集中が生じる。図-7のロードセルの波形から荷重速度と動的圧縮強度を求めると、200MN/秒及び52MPaが得られた。動的圧縮強度は静的圧縮強度の1.9倍になっている。図-5のコンクリートにおいては、No.4 フレームで負荷ピストンが始動し、No.10 フレームになると供試体周縁部が膨らみ、下部付近の粗骨材面に縦ひび割れが生じている。この場合の荷重速度と動的圧縮強度を求めると、220MN/秒及び56MPaが得られた。動的圧縮強度は静的圧縮強度の1.7倍になっている。図-6の高速圧裂引張荷重作用下でのコンクリートの破壊挙動に関しては、No.10 フレームで小さなき裂が供試体中央部に生じ、載荷点を結ぶ断面にある粗骨材をさけながらき裂面が拡大する。載荷点では、粗骨材中をこのき裂が進展している。これは載荷点付近の応力状態が関係していることが考えられる。静的圧裂引張荷重作用下での応力解析から載荷点を結ぶ線上の横方向に引張応力が生じるだけでなく、荷重方向にも圧縮応力が作用し、その値は載荷点付近では非常に大きくなることが示されている。このため、載荷点付近では、局所的な圧潰を引き起こすことも考えられる。高速載荷時には、荷重が面的な帯荷重として載荷点付近に作用することも考えられる。

図-8は、装薬ホルダーによって生じたき裂進展挙動を示している。き裂進展方向は横方向であり、モルタルの場合は、ほぼ予定破断面にそってき裂が進展している。(a)と(b)、(c)の比較から、

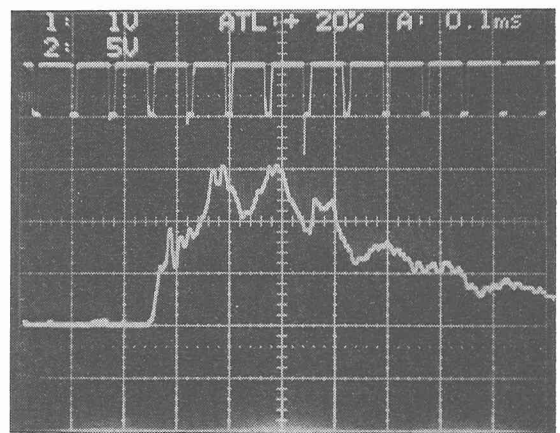
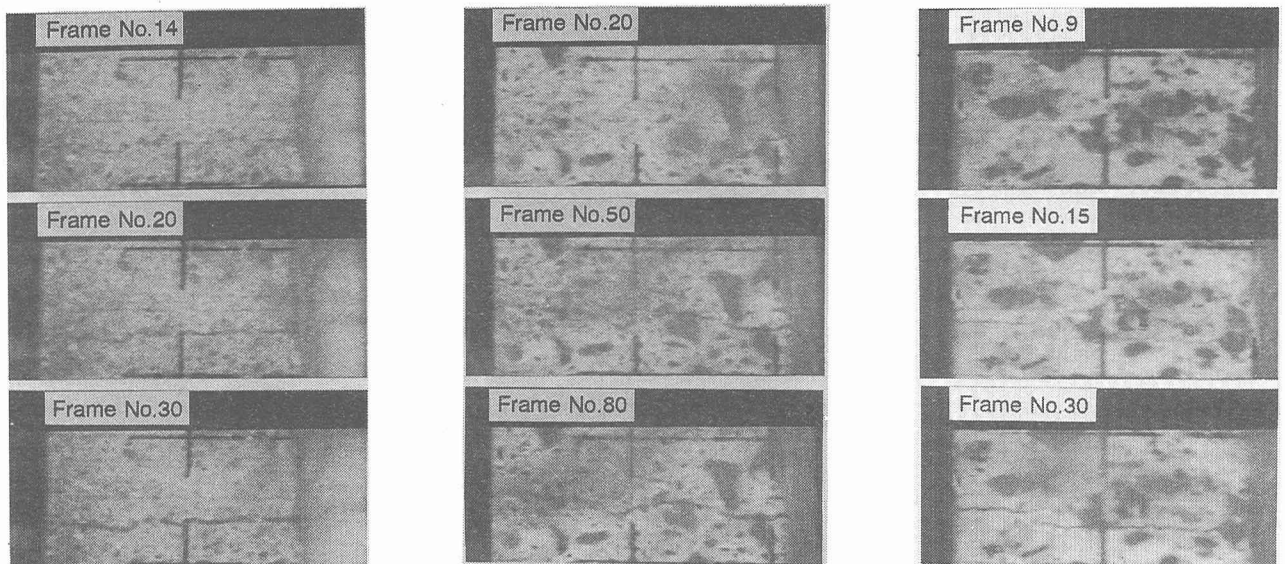


図-7 ロードセルの時間履歴 (下側波形)
時間軸 100 μ s/div. 感度 1.0 v/div.

コンクリートの場合、き裂進展が粗骨材の存在でジグザクして進むことがわかる。このことは、き裂進展抵抗の増大を意味し、破断面の形成により大きなエネルギーが必要となる。(c)では、供試体の左側自由面で、爆源から進展したき裂と自由面から進展したき裂が合体して破断面が生じている。自由面から生じるき裂は、爆源からの応力波と自由面の干渉によって生じたものである。

参考文献

- 1) P.H.Bischoff and S.H.Perry: Compressive behaviour of concrete at high strain rates. *Materials and Structures*, 1991,24,425-450
- 2) 中村裕一: き裂制御爆破工法, 特許庁特許公報 (特公平8-12040), 1996



(a)モルタル (b)コンクリート (c)コンクリート

図-8 装薬ホルダーを使用したき裂進展挙動観察 (ビデオ撮影速度:18000コマ/秒)