

(39) 爆破における応力波の伝ば特性と亀裂進展制御に関するモデル実験

Model experiments on propagation characteristics of stress wave and crack control in Blasting

犬童勇氣*, 中村裕一**, 尾原祐三***
Yuki Indo, Yuichi Nakamura and Yuzo Obara

*院生, 熊本大学大学院自然科学研究科社会環境工学専攻 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

** 工博, 八代高専教授, 土木建築工学科 (〒866-8501 熊本県八代市平山新町 2627)

*** 工博, 熊本大学大学院教授, 自然科学研究科 (〒860-8555 熊本市黒髪 2-39-1)

Key Words: stress wave, crack control, guide hole, charge holder, X-ray CT

キーワード: 応力波, き裂制御, ガイドホール, 装薬ホルダー, X線CT

1. 緒論

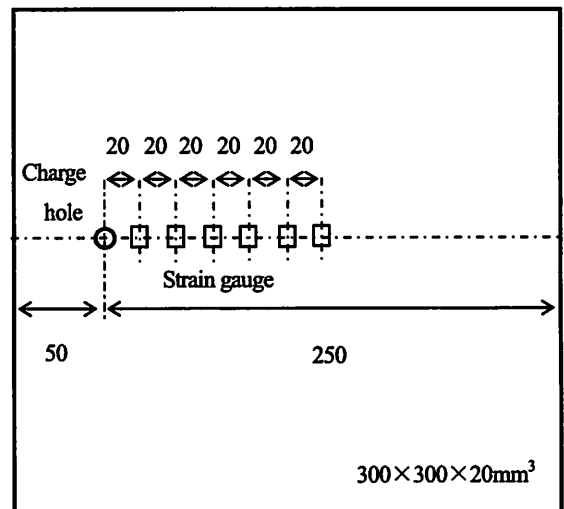
構造物の爆破解体や爆発荷重作用下での構造物の挙動解明に関係して, 材料中に生じる爆破応力波の伝ば特性を明らかにする必要がある. また, 爆破における亀裂進展制御は, 効率的な破断面制御爆破工法の開発に関わる重要な課題である¹⁾. 爆破現象は, 瞬間的な破壊現象であるが, 爆破に伴う応力波・爆発ガス・亀裂挙動を観察することによって, 高精度で効率的な亀裂制御爆破工法を確立するための有益な情報を得ることができる.

本研究では, 少量の爆薬と材料に PMMA を使用した爆破モデル実験を行い, 爆源から伝ばする応力波の動ひずみをひずみゲージを用いて測定し, 応力波面及び, その背後のひずみの時間履歴から, 爆源近傍での応力波の伝ば特性を明らかにした. また, 応力波と切り欠きを有するガイドホールの干渉効果を利用した破断面制御に関するモデル実験を行い, 破断面制御のための二段階時間制御起爆工法の有効性を明らかにした. これらの成果をもとに, 爆源からの亀裂進展方向を制御するための技術を適用して, 材料にモルタルを使用した爆破モデル実験を行い, 提案法の有効性を確認するとともに, 爆破後の供試体内部の亀裂状態を X 線 CT スキャナを使用し, 材料の損傷状態を調べた²⁾.

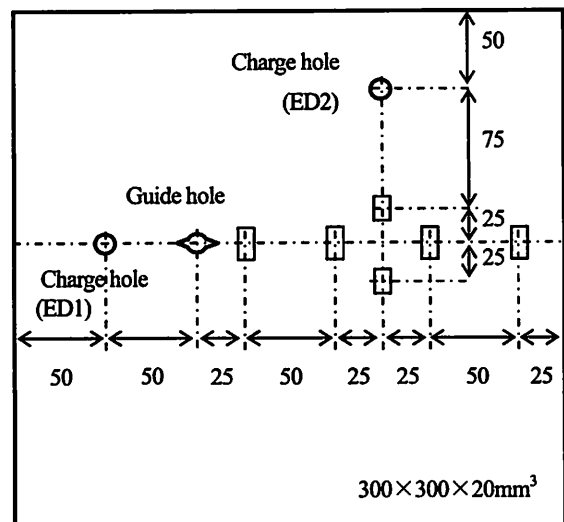
2. 実験方法

2.1 供試体の形状

PMMA は, 衝撃荷重作用下での破壊性状が岩質材料と類似であることが知られており, 亀裂挙動を岩質材料よりも精緻に捕らえることが出来るため, 本研究における爆破モデル実験での供試材として使用した. 供試体の形



(a) Type 1



(b) Type 2

図-1 PMMA供試体の形状

状を、図-1(a), (b)に示す。Type 1 の供試体は、爆源近傍における応力波の伝ば特性に関する実験に使用され、Type 2 は、切り欠きを有するガイドホールを設けて、破断面制御を行い、二段階時間制御起爆法³⁾の有効性を検証するための実験に使用した。二段階時間制御起爆法とは、装薬(ED1)を起爆して、予定破断面に沿う亀裂面を形成した後、設定遅延時間経過後に、装薬(ED2)を起爆して、破碎域を爆破する方法である。本研究では岩質材料中の亀裂進展挙動を観察するため、モルタル供試体(300×450×100mm³)を作製した。水セメント比(W/C)を55%とし、供試体作製には、普通ポルトランドセメント(比重=3.15)を使用した。供試体表面には、白色の塗料を薄く塗り、亀裂面を明瞭に撮影できるようにした。モルタル供試体の形状を、図-2に示す。切り欠きを有するガイドホールは、亀裂進展方向に沿う円孔(φ15mm)に、頂角70°、長さ4mmの切り欠きが設けられている。モルタル供試体については、装薬(ED1)の装薬孔に、この形状の切り欠きを設け、図-3に示す鋼製のスプリットチューブ形装薬ホルダーを装着して、爆源近傍の亀裂進展制御を行った。

本実験で使用した PMMA およびモルタル供試体の主な力学的性質を表-1に示す。P波速度、S波速度および動弾性係数は超音波パルス法⁴⁾によって算定し、モルタル供試体の圧縮強度、引張強度は、JIS A 1108, JIS A 1113に基づいて求め、静弾性係数は応力-ひずみ線図より求めた。

2.2 実験装置及び実験方法

(1) 爆破モデル実験

本実験のブロック線図を図-4に示す。本実験では、高速度ビデオカメラ(フォトロン社製 FASTCAM-ultima-02, 最高撮影速度 40500 f/s)を使用して、爆破現象の画像

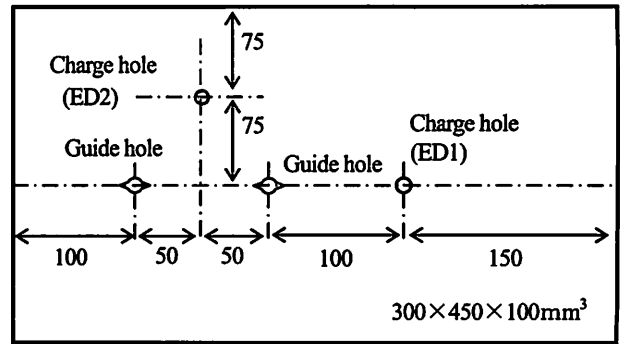


図-2 モルタル供試体の形状

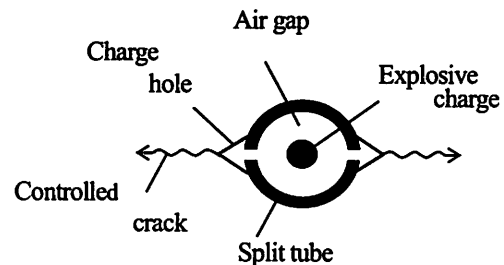


図-3 スプリットチューブの形状

表-1 供試体の主な力学的性質

	PMMA	Mortar
Density (kg/m ³)	1188	2170
P-wave velocity (km/s)	2.62	3.9
S-wave velocity (km/s)	1.3	2.03
Compressive strength (Pa)	—	4.42×10 ⁷
Tensile strength (Pa)	*7.6×10 ⁷	3.86×10 ⁶
Modulus of elasticity (Pa)	Dynamic	5.39×10 ⁹
	Static	*3.0×10 ⁹

*メーカーカタログのデータ引用

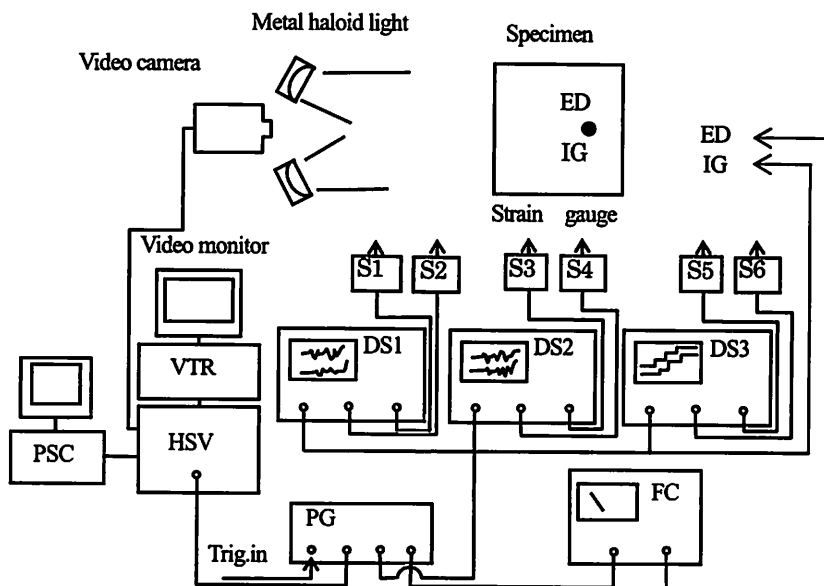


図-4 爆破モデル実験のブロック線図

観察を行った。このカメラはデジタルメモリー方式の画像記録装置で、トリガー機能により爆破現象に同期させて画像記録が出来るため、パルス発生器からのトリガー信号を、高速度ビデオカメラと起爆回路に入力して同期をとった。動ひずみ波形を記録するデジタルストレージスコープの起動は、この同期信号、又は、起爆時刻を測定するためのイオンギャップ信号⁵⁾によって行った。爆破に伴う PMMA 中の応力波の伝ば特性を調べるために使用したひずみゲージは、共和電業製の KFEL-2-120-C1 および KLM-6-120-A9 である。KFEL ゲージは、爆源近傍における応力波の半径方向の動ひずみを測定するために使用し、KLM ゲージは円周方向の動ひずみ及び亀裂の進展速度を測定するために使用した。装薬には、起爆遅れのばらつきが少ない地震探鉱用瞬発電気雷管 6 号、(添装薬は PETN0.4g) を使用した。電気雷管は、PMMA 供試体へ直接、装着し、その上からスチールパイプを被せた。スチールパイプを被せることにより、爆破の際に生じるガスの拡散を防止することができる。スプリットチューブを使用しない場合のモルタル供試体へは、 $\phi 8\text{mm}$ 、深さ 6cm の装薬孔に電気雷管を直接、装着した。

(2) X 線 CT 観察

モルタル供試体については、爆破実験後、X 線 CT スキャナ装置(熊本大学工学部所有の東芝製産業用 X 線 CT スキャナ TOSCANNER-20000RE)を使用し、内部き裂観察を行った⁶⁾。装置のシステム構成を図-5 に示す⁷⁾。被検査物は試料台に置かれ、X 線管から 176 個の検出器に向かう X 線ビームを横切るようにトラバースした後、回転し、再びトラバースする。X 線ビーム形状が 30° の扇形をしているので最小 180° 分のデータを取るために 6 回のトラバース/ローテーションで測定が完了する。このとき得られるデータ数は 2.8×10^8 個であり、これを画像処理装置に取り込み、フィルター補正逆投影法によって再構成し、ワークステーション上の CRT に表示される。本実験では、管電圧 300kV、管電流 2mA、X 線ビームの厚さ 2mm、撮影領域 $\phi 150\text{mm}$ 、マトリックスサイズ 512×512 として撮影を行った。

3. 実験結果および考察

3.1 PMMA 中の応力波の動ひずみ履歴と伝ば特性

応力波の半径方向(伝ば方向)の動ひずみ波形履歴を図-6 に示す。波形写真(a)の上側波形は、爆源から 20mm、下側波形は爆源から 40mm、波形写真(b)の上側波形は爆源から 60mm、下側波形は爆源から 80mm のものである。爆源に非常に近い点においては、第 1 波到達直後に最大値を示し、急激に減衰していることがわかる。しかし、波形写真(b)に示されるように、爆源から離れるにつれて、応力波によって生じる動ひずみは、階段状の立ち上がり

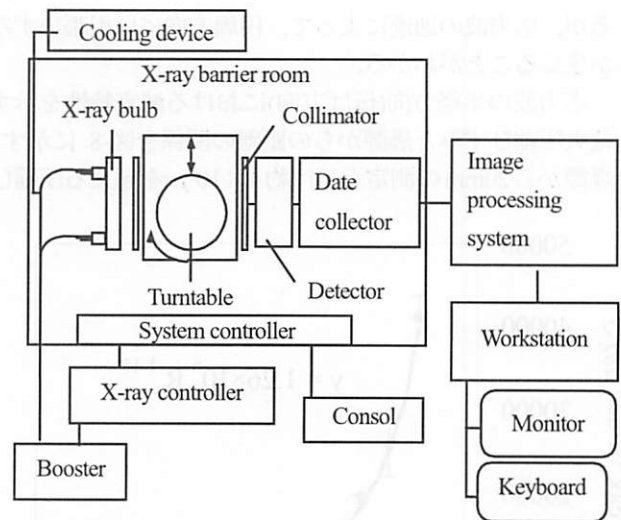
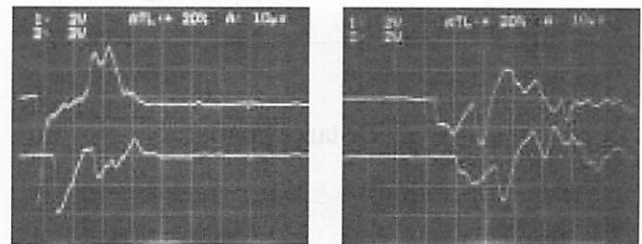
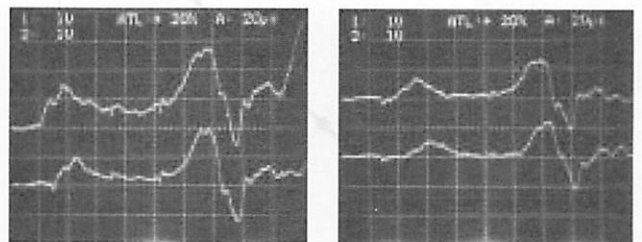


図-5 X 線 CT スキャナのシステム構成



(a) 距離 20,40mm (b) 距離 60,80mm

図-6 応力波の半径方向の動ひずみ波形履歴



(a) 距離 60,80mm (b) 距離 100,120mm

図-7 応力波の円周方向の動ひずみ波形履歴

履歴を示している。最大圧縮ひずみは、爆源近傍では、最初の立ち上がりによって示されるが、爆源から離れた点においては、2 番目に到達する応力波のひずみのピーク値であった。応力波の円周方向(伝ば方向の直交方向)の動ひずみ波形履歴を図-7 に示す。波形写真(a)の上側波形は爆源から 60mm、下側波形は爆源から 80mm、波形写真(b)の上側波形は爆源から 100mm、下側波形は爆源から 120mm のものである。爆源近傍においては、応力波の到達時刻を記録したものの、爆発によってゲージが剥離、もしくは断線してしまったため、明確なひずみのピーク値は測定することが出来なかった。円周方向のひずみ履歴の測定については、波面が円筒波面であることから、ゲージ長の大きさも影響していることも考えられ

るが、応力波の通過によって、円周方向には引張ひずみが生じることがわかる。

応力波の半径方向(伝ば方向)における減衰特性を示す最大圧縮ひずみと爆源からの距離の関係を図-8に示す。爆源から20mmの測定点では約 $4 \times 10^4 \mu\epsilon$ を超える圧縮ひ

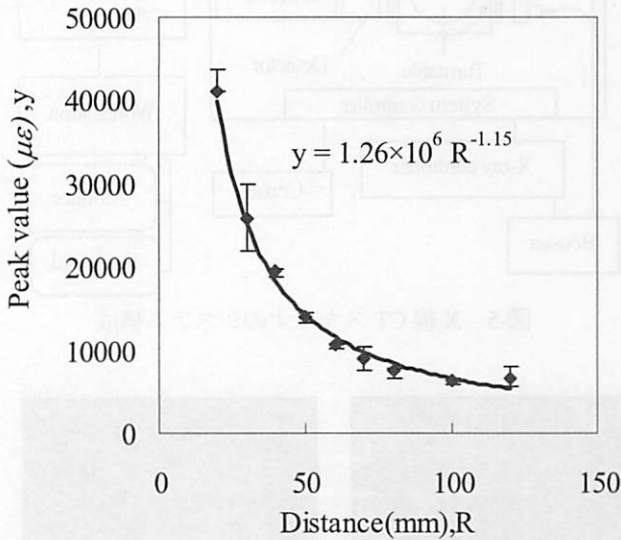


図-8 最大圧縮ひずみと爆源からの距離の関係

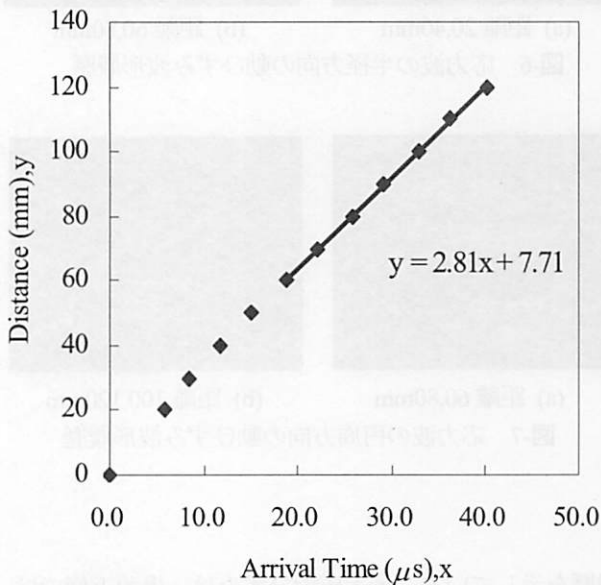


図-9 爆源からの距離と応力波の到達時間の関係

ずみが測定されており、40mmではその半分近くまで減衰しているが、その減衰は爆源から遠ざかるとともに緩やかになっている。爆源からの距離と応力波の到達時間との関係を図-9に示す。応力波の伝ば速度は爆源近傍では縦波弾性波速度を超える約3km/sであるが、遠ざかるにつれて縦波弾性波速度に近い伝ば速度であることがわかる。図-10に3回の実験の同一点における動ひずみ波形を示す。図-10に示されるように、得られた動ひずみ波形から動ひずみ履歴の再現性を確認することができる。

3.2 破断面制御のための二段階時間制御起爆法の有効性

予定破断面に沿って伝ばする亀裂と応力波の干渉挙動の解明は、破断面制御爆破工法を確立するための課題である。このため、PMMA 供試体(Type 2)を使用して、2つの装薬の起爆時刻を遅延時間によって制御して爆破する二段階時間制御起爆実験を行った。図-11は、設定遅延時間500μsの場合の亀裂パターンである。応力波と亀裂が干渉点より手前で干渉し、亀裂が応力波の進行方向に曲げられながら進展することがわかる。即ち、ガイドホール付近で、亀裂と応力波が衝突する場合は、応

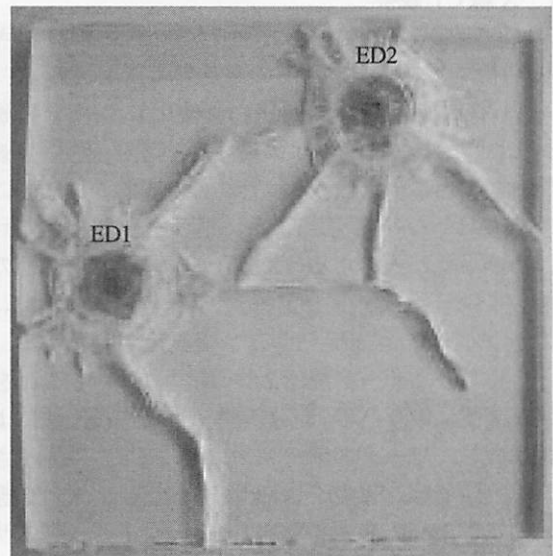


図-11 設定遅延時間500μsの場合の亀裂パターン

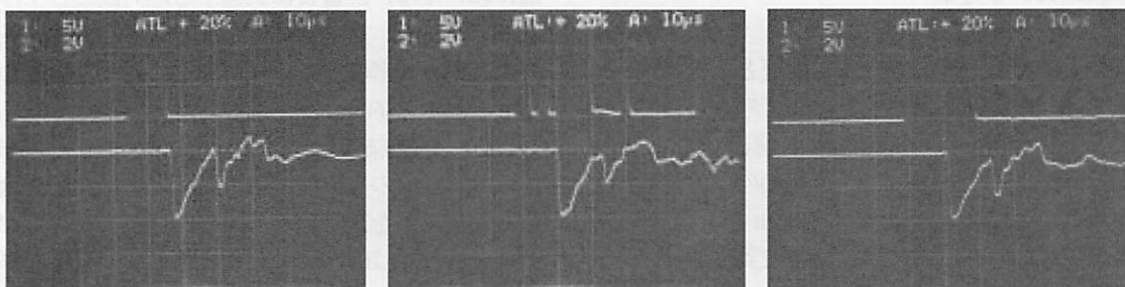


図-10 PMMA 供試体 (Type1)での動ひずみ波形(下側の波形)の再現性 (ゲージ位置: 爆源から40mm) 時間軸: 10μs/div, 感度: 5000μϵ/V

力波は亀裂面が自由面となり応力波が反射されている。しかし、亀裂の到達が応力波の通過よりも遅い場合、亀裂は応力波の進行方向に曲げられながら進展していることがわかる。そのため亀裂の進展は、応力波によって生じるひずみ場の影響を受けていると考えられる。図-12は、設定遅延時間 $700\mu\text{s}$ の場合の亀裂パターンである。この場合は、亀裂進展を応力波が妨げることなく予定破断面に沿って亀裂が進展している。装薬(ED2)の遅延起爆によって発生する応力波は、予定破断面に沿う亀裂面によって反射されるため、亀裂面より下の領域には亀裂は進展しない。また、予定破断面より下の領域では、応力波の作用も図-13の動ひずみ波形に示されるように微弱である。

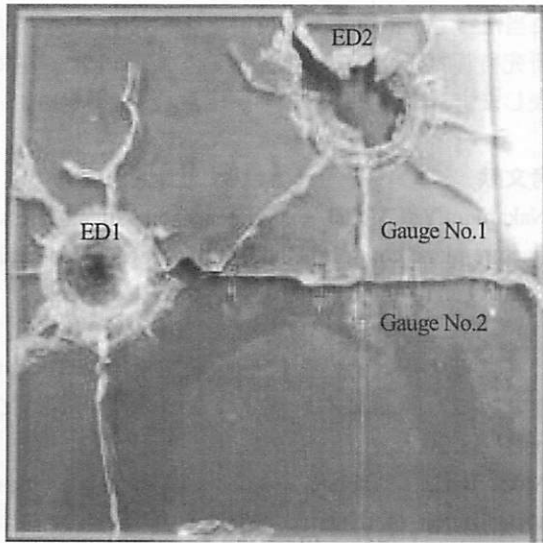
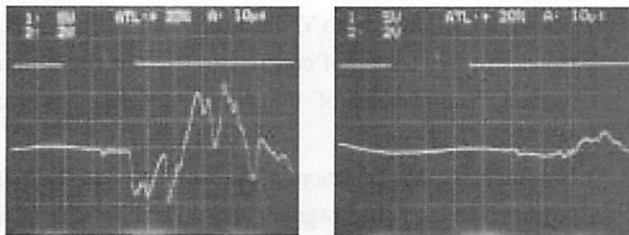


図-12 設定遅延時間 $700\mu\text{s}$ の場合の亀裂パターン

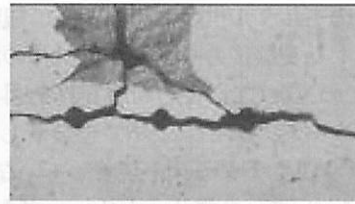


(a) Gauge No.1

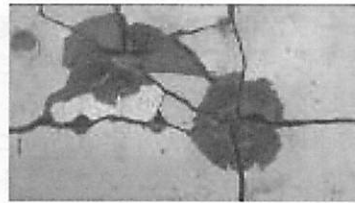
(b) Gauge No.2

図-13 亀裂面の前後の動ひずみ波形(下側波形)

(a)亀裂前面 (b)亀裂背面



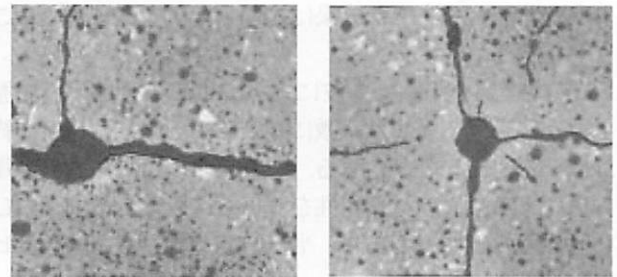
(a)スプリットチューブ有り



(b)スプリットチューブ無し

図-15 モルタル供試体の亀裂パターン

設定遅延時間を 1.2ms に設定して、時間制御起爆したモルタル供試体の爆破のビデオ画像を図-14に示す。2コマ目で、装薬(ED1)が起爆され、11コマ目で装薬孔からの亀裂がガイドホールに到達し、亀裂が助長される。15コマ目では完全に予定破断面に沿った亀裂がつくられる。16コマ目で2発目の雷管が起爆される。25コマ目では、遅延起爆によって生成される亀裂が予定破断面に向かって進展している。実験後のモルタル供試体の亀裂パターンを、図-15に示す。(a)では、装薬(ED1)は、切り欠きを有する装薬孔にスプリットチューブを装着し、装填されている。(b)では $\phi 8\text{mm}$ の円孔に装填している。図-14からわかるように、装薬(ED2)の起爆によって生じる応力波は、予定破断面に沿って生成された亀裂面が自由面として作用することによって反射されるため、予定破断面より下の領域には亀裂の進展は見られない。



(a)スプリットチューブ有り (b)スプリットチューブ無し

図-16 モルタル供試体深さ 5cm 位置における断層写真

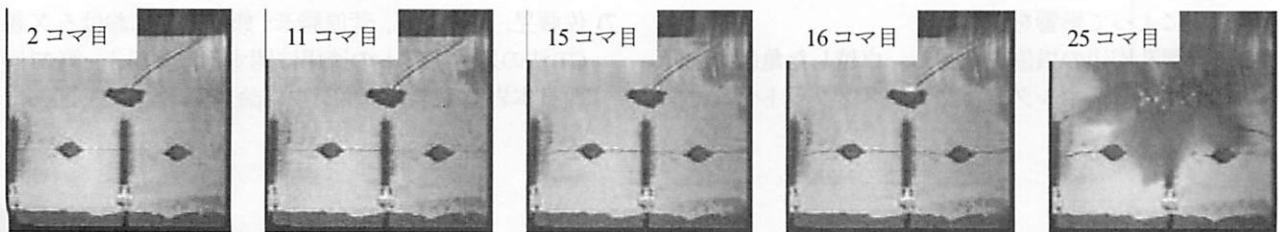


図-14 設定遅延時間 1.2ms で時間制御起爆したモルタル供試体の爆破ビデオ画像

(撮影速度; 13500 f/s)

3.3 実験後のモルタル供試体の X 線 CT 観察

図-14 に示した実験後のモルタル供試体の深さ 5cm における断面での X 線 CT による断層写真を図-16 に示す。(a) は装薬孔にスプリットチューブを装着した場合であり、(b) はスプリットチューブを装着していない場合である。図-14(a) において、スプリットチューブを挿入した装薬孔周辺にはクレーターが存在していないが、(b) ではスプリットチューブが挿入されていない装薬孔周辺にクレーターが存在している。クレーターが生じると、飛石となって散乱したということを示している。また、(a) は、(b) と比較して卓越した亀裂が予定破断面に沿って最小抵抗線側へ進展していることや、スプリットチューブを挿入した装薬孔周辺には予定破断面に沿う亀裂以外の大きな亀裂が生じていないことがわかる。(b) において、スプリットチューブが挿入されていない装薬孔周辺には放射状の亀裂が多数存在している。深さ 5cm における図-16 の X 線 CT 画像からも、スプリットチューブを挿入した場合には、予定破断面に沿った明瞭な亀裂が形成されることがわかる。

4. 結論

爆源近傍における応力波の伝ば特性及び切り欠きを有するガイドホールを使用した亀裂進展制御に関するモデル実験を行った。応力波の伝ば特性については、動ひずみの多点測定を行い、応力波の伝ば履歴と最大圧縮ひずみ及び最大引張ひずみとの関係を明らかにした。また、切り欠きを有するガイドホールを用いて破断面制御を行う二段階時間制御起爆実験を行い、設定遅延時間が亀裂進展に及ぼす影響について調べた。実験後のモルタル供試体については、内部の亀裂状態を X 線 CT 観察した。本研究の主要な成果は、以下のようにまとめることができる。

(1) 爆源近傍の応力波によって生じる動ひずみ履歴の測定から、応力波は急激に減衰し、その伝ば速度は約 3km/s~2.8km/s で変化する。応力波によって生じる半径方向圧縮ひずみの減衰特性を明らかにした。円周方向ひずみは引張ひずみであり、半径方向ひずみほど大きなピークは示さない。

(2) 破断面制御のための二段階時間制御起爆の有効性が確認され、破砕する側からの亀裂は予定破断面を横切って進展しない。予定破断面に沿う亀裂進展は応力波の干渉時刻によって影響を受ける。

(3) 装薬孔周辺の損傷を抑制し、卓越した亀裂を進展させるための装薬ホルダーとして、スプリットチューブ

を使用する方法の有効性を明らかにした。モルタル供試体の内部亀裂の状態を X 線 CT 観察し、スプリットチューブなしの場合は、装薬孔(ED1)近傍に放射状の亀裂が生じていること示した。

スプリットチューブのような装薬ホルダーは、装薬条件を工夫することによって、爆破エネルギーの効率化や騒音の低減化が可能となるため、本研究成果を発展させた環境負荷低減化破断面制御工法に関する研究取り組み(科学研究費補助金：課題番号 1956085)を進めている。

謝辞

本論文は、発表者が八代高専本科及び専攻科在籍時に取り組んだ研究成果をまとめたものであります。爆破実験に携わった全ての関係者、X 線 CT スキャナを使用するに当たって、指導・支援頂いた熊本大学大学院自然科学研究科菅原研究室(当時院生)斉藤幸良氏に、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Nakamura.Y.: Model experiments on effectiveness of fracture plane control methods in blasting, Int. Journal for Blasting and Fragmentation, Vol.3, pp.59-78, 1999.
- 2) 犬童勇氣, 中村裕一, 宮本憲隆, 福元伸也: 爆破に伴う応力波の伝ば特性と破断面制御に関するモデル実験, 第 27 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.33-38, 2006
- 3) Nakamura.Y, Yabu.K, Kubota.S, and Kiritani.Y.: Visualization of dynamic behavior of stress waves and cracks in blasting processes by high-speed videography, 9th Int. Symposium on Flow Visualization, Paper No.222, 2000.
- 4) Nakamura.Y, Matsumoto.Y, Tanaka.M and Nishimura.N.: Nondestructive testing of concrete by the ultrasonic pulse method, Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol.11, pp.7-11, 1989.
- 5) Nakamura.Y.: Visualization of stress waves in blasting process by a laser shadowgraph method and its application to dynamic fracture control, Post Conference Proc of 8th Int. Congress on Experimental Mechanics, pp.272-278, 1996.
- 6) 犬童勇氣, 中村裕一, 尾原祐三: 爆破に伴う固体中の応力波伝ば特性と破壊挙動, 資源・素材学会九州支部平成 19 年度春季例会講演要旨集, pp52-54, 2007
- 7) 佐藤晃, 尾原祐三, 菅原勝彦: 熊本大学における X 線 CT 法の岩盤工学への適用に関する取り組み, 第 27 回西日本岩盤工学シンポジウム論文集, pp.17-23, 2006