

(46) 装薬ホルダーを使用したモルタル及びコンクリートのき裂進展挙動の観察

OBSERVATIONS OF CRACK PROPAGATION IN MORTAR AND CONCRETE
PRODUCED BY CHARGE HOLDERS

中村裕一*, 岩本誠治**, 深浦貴之***, 上米良健***

Yuichi NAKAMURA, Seiji IWAMOTO, Yoshiyuki FUKAURA and Takeru KANMERA

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

**八代高専専攻科環境建設工学専攻 (〒866 八代市平山新町 2627)

***八代高専土木建築工学科 (〒866 八代市平山新町 2627)

キーワード: コンクリート、動的破壊、高速き裂、装薬ホルダー
(Concrete, Dynamic fracture, Fast propagating crack, Charge holders)

1. はじめに

爆力の作用方向を制御するために考案されたくさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用して、モルタル及びコンクリートの動的破壊実験を行い、そのき裂進展挙動を観察した。このような高速引張負荷によって生じるモルタル、コンクリートや岩石などの構造材料中の高速のき裂進展挙動に関する研究は、実験する上での困難さのために、これまでに十分なされてはいないと思われる。この問題は爆破によるコンクリート構造物の部分解体、強震時のコンクリートの衝撃破壊や岩盤掘削に関係して重要である。本論文では、まず、き裂進展方向の制御が可能なくさび形空洞を有する装薬ホルダーの作用原理を説明し、これによって生じるホルダー近傍の応力波の挙動を明らかにするために行った PMMA 供試体を使用したレーザーシャドウグラフ法による可視化観察や動ひずみ測定の結果を示す。次に、モルタル及びコンクリート供試体に装着した装薬ホルダーによって生じるき裂の進展挙動を高速度デジタルビデオカメラによって観察した結果を示す。

2. 実験方法

2.1 装薬ホルダーの作用原理とその形状

装薬ホルダーは、丸鋼を機械加工して作製された部品を組み合わせ構成され、同一直径上に適当

な角度を有するくさび形空洞(空気のギャップ)を形成する。デカップリング状態で装てんさ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¹⁾。き裂がくさび先端に形成された後、爆破ガスが作用して、き裂進展が促進される。実験に使用した装薬ホルダーの形状を図-1に示す。この2つの装薬ホルダーは、ホルダーの外径とくさび形空洞の体積が異なっている。ホルダーの長さは70mmである。

2.2 PMMA 供試体、モルタル供試体及びコンクリート供試体の形状と装薬条件

装薬ホルダーの有効性を確認するために PMMA 供試体、モルタル供試体およびコンクリート供試体を用いた。装薬には、地震探鉱用電気雷管(6号)を用いた。装薬の外径で定義される装薬のデカップリング指数は、すべて2.73である。装薬ホルダー周囲の動ひずみ測定と応力波の可視化観察のために、材料として均質で、光を透過し、爆破モデル実験に

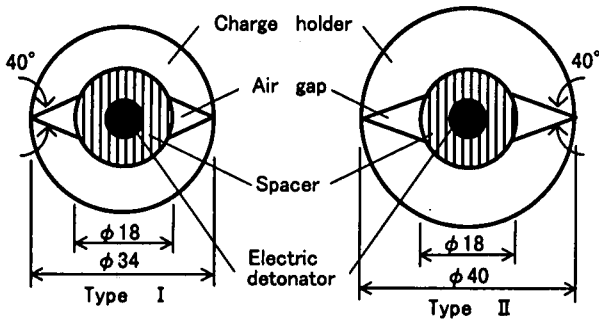


図-1 実験に使用した装薬ホルダーの形状

常用される PMMA 供試体を使用した。動ひずみ測定の実験は各々の装薬ホルダーについて 3 回行い、動ひずみ波形とその効果の再現性を確認した。供試体の形状は 20×20×2cm で、装薬孔は供試体中央にある。モルタル供試体の形状は 45×30×10cm および 30×30×10cm、装薬孔深さは 6cm である。コンクリート供試体の形状は 30×30×10cm で、装薬孔深さが 6cm である。装薬孔には、各装薬ホルダーの外径に等しい直径を有する丸鋼をモルタル及びコンクリート打設時に供試体中央部に所定の深さで埋め込み、半硬化後抜き取るにより作製した。装薬ホルダー上部は粘土と速硬性樹脂でタンピングを施した。装薬孔底部の損傷を防止するためにスペーサーを装薬ホルダー底部に入れた。各タイプの装薬ホルダーについて、モルタル供試体で 9 回、コンクリート供試体で 3 回の破壊実験を行い、き裂形成の再現性を確認した。検討項目は予定破断面に沿うき裂の進展状況、破断面の状態などである。

2. 3 装薬ホルダー近傍の動ひずみとき裂進展速度の測定

装薬ホルダーのき裂制御効果を確認するために、装薬ホルダー近傍の動ひずみとき裂進展速度を測定した。実験で使用したひずみゲージは、市販の大ひずみ測定用ゲージで、接着位置は装薬孔中心から予定破断面方向とその垂直方向に各々 40mm で、表は横方向、裏は縦方向に貼った。また、き裂進展速度測定には、市販のクラックゲージの両端に設けてあるトリガー線と自作した回路を使用した。き裂進展速度の計測原理は、き裂の進展によって、トリガー線が破断されると回路の抵抗値が変化して電圧変化を生じ、その時間的変化を計測器で測定する方法である。図-2 に PMMA 供試体への各ゲージの接着位置を示す。

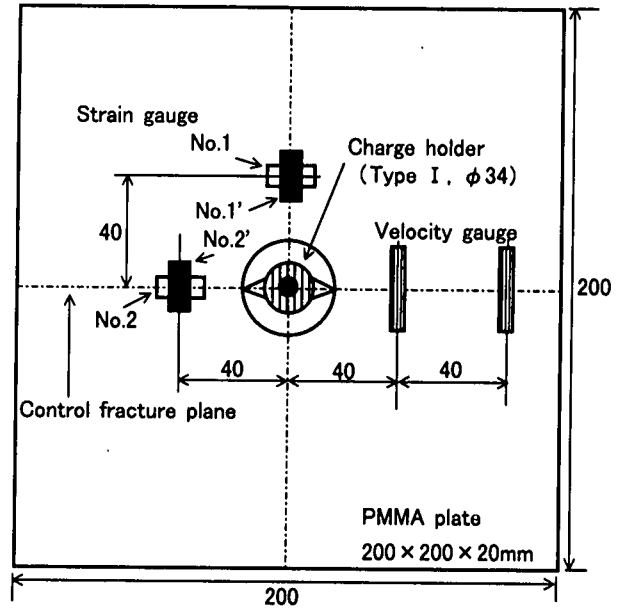


図-2 ひずみゲージと速度ゲージの接着位置

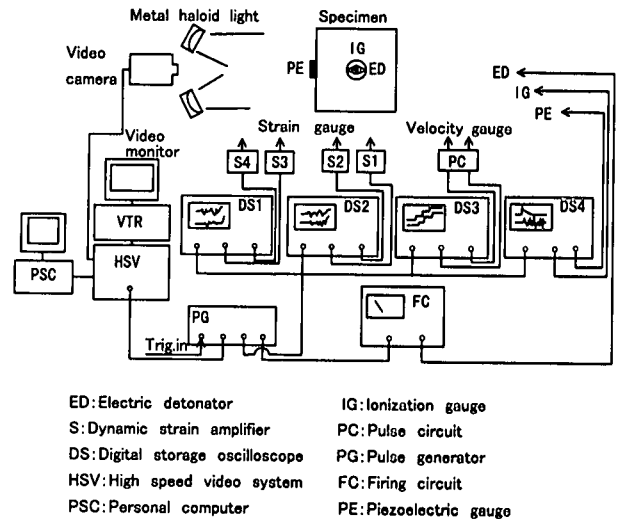


図-3 本実験のブロック線図

置を示す。図-3 に本実験における計測のブロック線図を示す。使用した高速度ビデオ撮影装置はデジタルメモリー方式の画像記録装置で、分割フレームにすれば、最高撮影速度 40500 コマ/秒で画像記録ができ、最大 49152 枚の画像を記録できる。自作した起爆回路は充電電圧 45V、放電時定数 2ms である。供試体は 2 個のハロゲンランプで照明され、装薬の正確な起爆時刻と応力波の自由面到達時刻を各タイオンギャップ及び自作した圧電ゲージで測定した。レーザーシャドウグラフ法による可視化システムは 2 個の凹面鏡（焦点距離 1.5m、有効径 15cm）を用いた 2 面对向法である²⁾。レーザーの作動と起爆の同期のために 2 台の遅延パルス発生器を使用した。

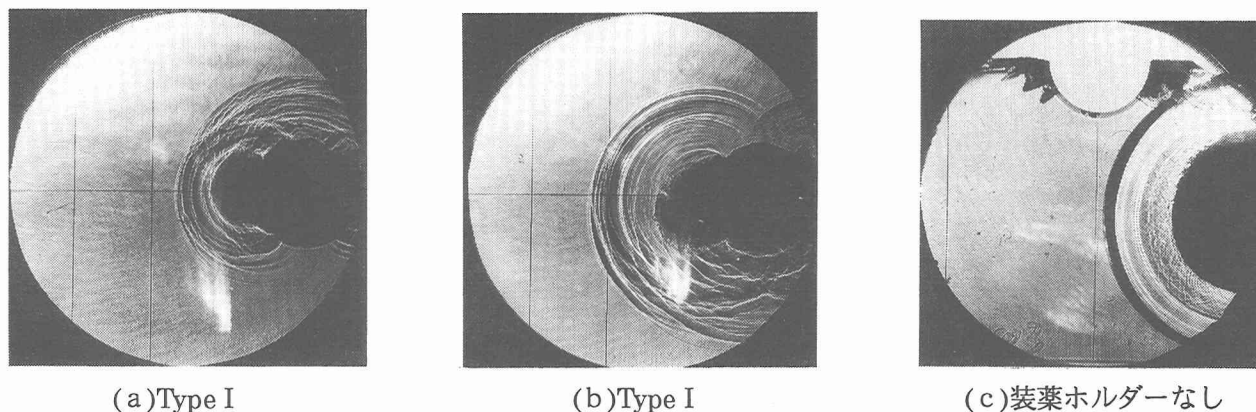


図-4 PMMA 供試体中の応力波の可視化写真

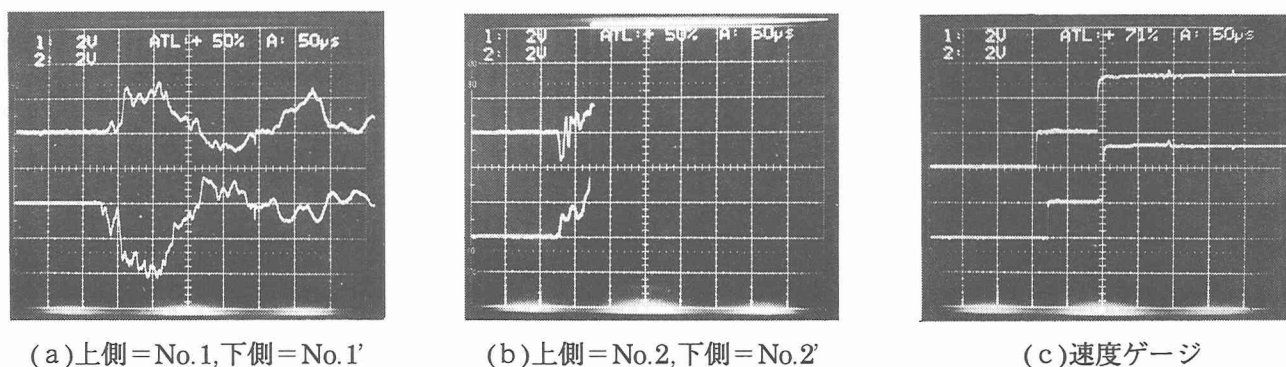


図-5 装薬ホルダー (Type II) を使用した場合の動ひずみ波形と速度ゲージ波形

3. 実験結果及び考察

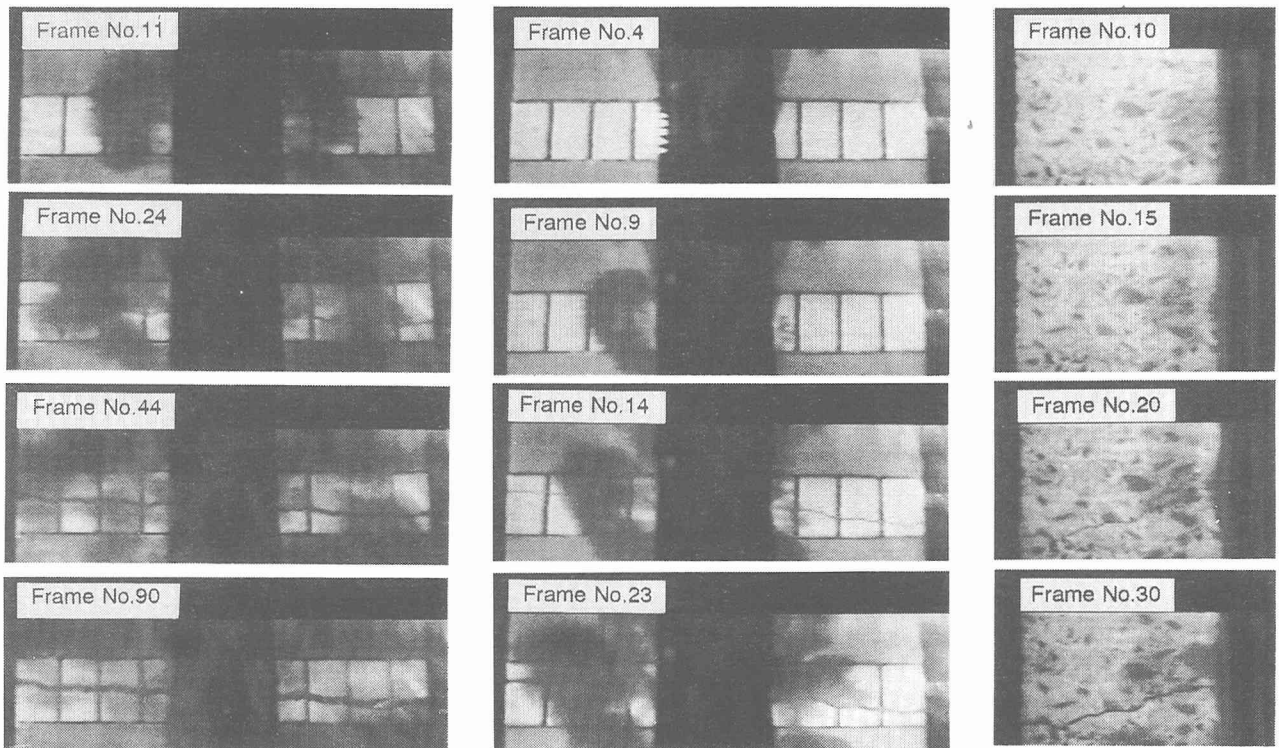
3.1 装薬ホルダー周囲の応力波のシャドウグラフ写真

図-4 (a)、(b) は、PMMA 供試体の中央に装着されたくさび形空洞を有する装薬ホルダー周囲の応力波の挙動を示すシャドウグラフ写真である。写真から左右のくさび形空洞先端を中心とする応力波が発生し、伝ばすることがわかる。これは装薬ホルダー内部での衝撃波の動的集中作用によって生じるものであり、くさび形空洞を有する装薬ホルダーを使用することによって、爆発エネルギーの作用方向と作用時間を制御することが可能であることを示している。可視化写真から求めた予定破断面方向の応力波の伝ば速度は PMMA の縦波弾性波速度に近い。また、ホルダーのくさび形空洞先端から爆発ガスが噴き出していることがわかる。予定破断面方向にき裂が形成されると爆発ガスが作用することによってき裂の進展が促進されることになる。参考のために、装薬ホルダーを使用しない場合の PMMA 供試体中の応力波のシャドウグラフ写真を図-4 (c) に示した。この写真からもわかるように、装薬ホルダーを使用しない場合は装薬孔を中心とする同心円状に応力波が

伝ばする。なお、図-4 (c) の写真の供試体はくさび形空洞を有する装薬ホルダーによって破断制御された供試体が再使用されており、予定破断面に沿う装薬孔付近でのき裂の進展状況がわかる。

3.2 装薬ホルダー周囲の動ひずみとき裂進展速度

同一条件ごとに実験を 3 回行い、ひずみ波形に再現性があることを確認した。動ひずみ波形の一例を図-5 (a)、(b) に示す。起爆後、応力波の到達によって No. 1 ゲージは引張ひずみが、No. 1' ゲージには圧縮ひずみが生じる。装薬ホルダーは、ホルダー内部のくさび形空洞に衝撃波の動的集中作用を生じさせ、予定破断面の直角方向に大きな引張力を作用させることを意図しているが、No. 2' ゲージのひずみ波形から、応力波到達後約 $50 \mu\text{s}$ 後に大きな引張ひずみが生じていることがわかる。この事から装薬ホルダーを使用することによって、くさび形空洞での爆発衝撃波の集中作用が確認された。図-5 (c) は、き裂進展速度計測のための速度ゲージ切断による電圧変化を示す波形である。これから求めた 3 回の実験におけるき裂進展速度の平均値は 2 つの速度



(a) 撮影速度 18000pps (b) 撮影速度 18000pps (c) 撮影速度 27000pps
 図-6 高速度ビデオの記録画像 : (a), (b) はモルタル供試体、(c) はコンクリート供試体

ゲージの間隔距離で求めた場合 Type I が 588 m/s、Type II が 506m/s であった。このき裂進展速度の違いは、くさび形空洞の体積の大きさに関係しており、Type II の方がくさび形空洞の体積が大きいため、爆力の緩和効果（デカップリング効果）が大きいことが考えられる。

3. 3 き裂進展挙動と破断面の状態

図-6 は、記録画像をビデオプリンターに出力したものである。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) では、供試体の左側自由面で、き裂面の食い違いが生じている。これは供試体中を伝ばする応力波と自由面の干渉によるものと思われる。破断面の平滑さは、き裂の直進性に関係するが、45×30×10cm のモルタル供試体を使用した実験（実験回数 9 回）からは、Type II の方が予定破断面からのずれが小さいことがわかった。これは Type II の方が、ホルダー内部の体積デカップリングが大きいため、装薬孔周囲への引張荷重が緩和されることに関係していると思われる。また、ビデオ画像から、き裂は装薬孔から自由面に向かって、開口き裂として伝ばするのではなくて、ブリッジした微

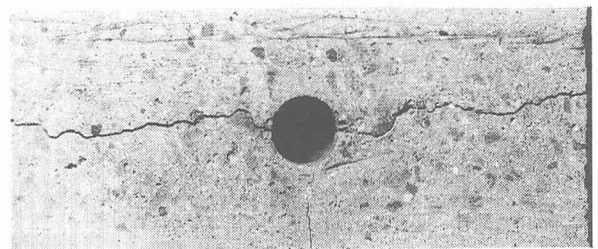


図-7 コンクリート供試体のき裂形成状態

視き裂が高速に進展し、その後、爆発ガスの作用もあって、き裂面が開口して、破断面が形成されることがわかる。(a)、(b) と (c) の比較及び図-7 から、コンクリートの場合、基本的には、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。粗骨材中をき裂面が通過する場合もあるが、粗骨材に碎石を使用しているために、粗骨材中の先在クラックの存在が考えられる。

参考文献

- 1) 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
- 2) 中村裕一, 山本雅昭, 松永博文: 火薬学会誌, vol. 56, no. 1, pp. 19-25, 1995