

超高速ビデオカメラを用いた衝撃破壊試験の計測に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE MEASUREMENT OF IMPACT FRACTURE TEST WITH
ULTRA-HIGH-SPEED DIGITAL VIDEO CAMERA

沖中知雄*, 江藤剛治**

Tomoo OKINAKA, Takeharu ETOH

*Ph.D. 近畿大学講師 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

**工博 近畿大学教授 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 大阪府東大阪市小若江3-4-1)

キーワード：亀裂進展・画像解析・超高速ビデオカメラ

(Crack propagation, picture analysis, high-speed video camera)

1. はじめに

土木分野において、構造物の衝撃問題、岩やコンクリートの圧縮破壊、金属材料中での亀裂進展といった高速で進行する現象への対応の必要性が増している。これらの研究において、面的・動的に現象を記録することのできるデジタル式ビデオカメラによる画像解析は、現象の解明と数値解析の検証に有効な手段である。

しかしながら、これらの研究においてデジタル式ビデオカメラを用いた画像解析の適用例は多いとはいえない。この原因としては、以下の点が挙げられる。

1. 対象としている現象が $1\sim 100\mu\text{s}$ といった短時間で進行し完了するため、毎秒数千枚オーダーという既存のデジタル式ビデオカメラの撮影速度では現象を記録するために十分ではない。
2. 一般的に画像解析によって測定される変位やひずみは、力学分野で通常要求される精度を満たさない。

撮影速度の具体例として、現在市販されているデジタル式ビデオカメラの撮影速度は毎秒4,500枚程度に留まる。これは、 $222\mu\text{s}$ に一枚の撮影速度に相当し、対象としている現象の撮影、記録には十分とはいえない。また、高速での撮影が期待できる銀塩式カメラに

よる撮影は、撮影タイミングの処理に熟練を要する上、画像解析に適さないという欠点がある。

次に精度の例をあげれば、レーザーの干渉縞等の利用により、変位を増幅させる手法が用いられているが、大型実験に適さない。

そこで筆者の一人である江藤を中心とするグループは、まず撮影速度の点に着目し毎秒100万枚、上書き撮影可能な超高速デジタル式ビデオカメラの開発に着手、平成13年度にその完成をみた⁽¹⁾。完成したビデオカメラは、毎秒100万枚以上の撮影速度と約8万画素(256×312)の解像度を持ち、連続100枚以上の撮影が可能である。このカメラの性能の例として、毎秒100万枚の撮影速度で秒速1kmで進展する亀裂の先端部を撮影した場合、亀裂進展を1mm毎に記録できることとなる。これは、破壊現象の計測に十分な撮影速度とすることができる。

本報告では、まず、開発されたビデオカメラの概要を記述する。次に、開発されたカメラを用いた画像解析のための基礎的研究として、簡単な錘落下試験を行い、石膏試験体中の亀裂進展速度を計測する。

2. カメラの概要

カメラに用いられている撮像素子の概要を図 1 に示す。斜線部は光電変換部と呼ばれ、感知した光を電子に変換する部位である。光電変換部で生成された電子は画像信号蓄積部を順次下に送られ、最終的には蓄積部最下端の排出部より排出される。そのため、信号蓄積部には常に最新の 103 枚の信号が蓄積されることとなる。

この形式の撮像素子は画素周辺記録型撮像素子と呼ばれ、画像信号を各画素周辺に蓄積するタイプの撮像素子である。この名称は、既存の高速撮影カメラに多く用いられている並列読み出し型と呼ばれる形式に対応するものである。並列読み出し型では、素子は多数の信号読み出し線を持ち、その線数と同じ数の走査線を一齐に操作して画像信号をリアルタイムで読み出すため、原理的に撮像素子の上限が無いという利点を持つ。しかしながら、1 万画素程度まで解像度を下げたとしても、撮影速度は数万枚/秒が実用的には限界となる。

画素周辺記録型撮像素子を用いた場合、撮影枚数は画素周辺に配置できる電荷蓄積部の数に制限される反面、大幅な高速化が可能となる。開発されたカメラでは、画像信号蓄積部を斜行して設けることにより、画素周辺部に 103 個の画像信号蓄積部を配置すると共に、最下端に排出部を設けて上書き可能な設計にすることに成功した。同時に開口部（光電変換部）の大幅な大型化に成功し、高速撮影時に要求される感度が大幅に改善された。

本カメラでは撮影枚数が 103 枚に限定されるが、100 枚以上の撮影枚数があれば毎秒 5 枚の再生速度で 20 秒以上の動画再生が可能である。このように、今回開発されたカメラは、おおむね最低限のユーザーの要求水準を満たすものと言うことができる⁽²⁾。

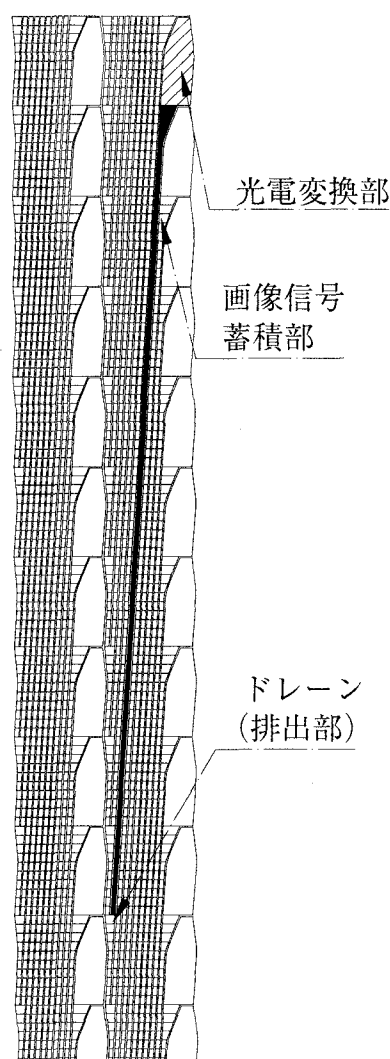


図-1 撮像素子の概要

3. 試験概要

本研究では、開発されたビデオカメラを用いた画像解析のための基礎的研究として、簡単な錘落下試験を行い、亀裂の進展速度を計測する。

実験では材料として石膏を採用する。これは、試験体の作成が容易である、試験体表面が形成し易い、脆性破壊材料であり亀裂進展が容易に観察できる、等の理由に依るものである。材料の物性が亀裂進展速度に与える影響をみるため、普通石膏 (Type-R)、ポリマー

表-1：使用石膏の物性

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cm ³)	圧縮強度 (MPa)	引張強度 (Mpa)	引張伸び (μ)
Type-R	8.83	0.27	0.33	12.33	1.74	92
Type-P	7.67	0.23	0.34	11.79	2.31	249
Type-H	10.38	0.26	0.36	17.43	1.45	127

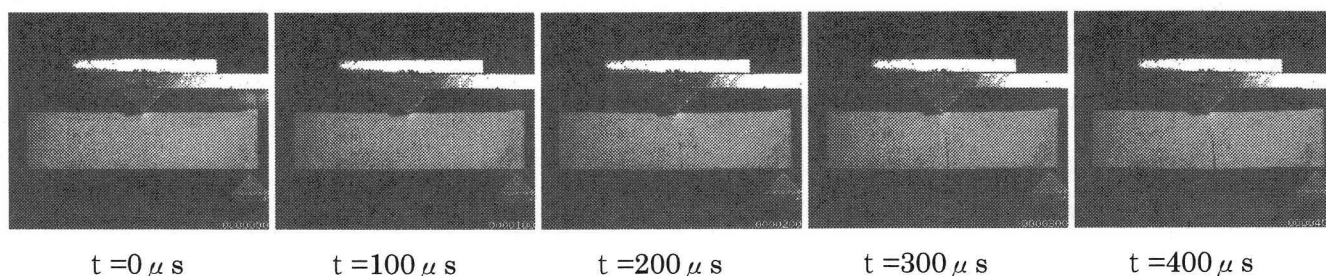


図-2 普通石膏試験体中の亀裂進展(撮影速度：毎秒 20 万枚)

添加普通石膏 (Type-P), 硬石膏 (Type-H) の 3 種類の配合を使用した。

本研究ではまず, 材料試験を行い材料の物性を決定した。材料試験としては, $\Phi 50 \times 100\text{mm}$ の円柱供試体による一軸圧縮試験, $70 \times 25 \times 25\text{mm}$ のブリケット型供試体による引張試験を行った。材料試験結果を表-1 に示す。特に Type-P では, ポリマーの添加により引張伸びが大きく改善されている。

次に $40 \times 40 \times 160\text{mm}$ の角柱試験体を作成, 5kgf の錘を 75cm の高さから落下させる 3 点曲げ錘落下試験を行った。

試験体中の亀裂進展を, 毎秒 20 万枚の撮影速度で撮影する。試験体位置に設置したスケールを別途に撮影, このスケールを試験結果の画像と重ね合わせることで, 亀裂長さを計測した。

4. 試験結果

3 種類の配合を用いた錘落下試験結果の中から, Type-R (ポリマー混入普通石膏) の試験結果を図-2 に示す。 $5\mu\text{s}$ 毎に撮影された 103 枚の画像のうち, $100\mu\text{s}$ 毎に 5 枚の画像を抜き出している。試験体中央の下部から発生した亀裂が徐々に進展していく様子が観察される。実験では, 図-2 に示された各々の画像の間に 20 枚が記録されており, 亀裂の進展を詳細に検討することが可能であった。

3 種類の配合について, 亀裂長さと亀裂進展速度の関係を図-3 に示す。図-3 中で, グラフが亀裂長さ 0mm から始まっていないのは, 目視できる長さの亀裂が試験体表面に現れてから, 亀裂長さの計測を開始したためである。

各配合とも, 亀裂長さ 20mm の近傍から進展速度が急速に低下しているが, これは試験体の破壊が全体に

及んだためと思われる。進展速度の低下するまでの, 比較的安定した部分での亀裂進展速度の平均値を V_c と定義し, これを

$$Vs = \sqrt{E/\rho}$$

で求められる, 物体中の波動の伝播速度と比較した結果を表-2 に示す。Type-R と Type-H では, 物性の違いに依らず Vs/Vc がほぼ一致しているのに対し, Type-P では大きく低下している。これはポリマーの添加により引張り靱性が向上したため, 新たな亀裂面の生成に要するエネルギーが増大するとともに, 亀裂の進展に

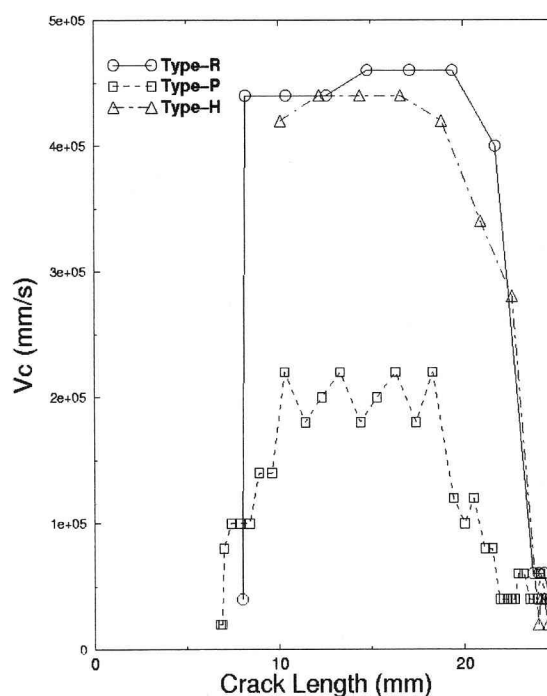


図-3 亀裂長さと亀裂進展速度

より解放されるエネルギーが減少したためと思われる。

5. 圧縮供試体の衝撃破壊試験

Φ50×100mm の円柱供試体に、10kgf の錘を 0.75m の高さから落下させた錘落下試験の結果を図-4 に示す。試験は毎秒 2 万枚の撮影速度で撮影されている。普通石膏では試験体中央部より輪切り型に破壊が進行しているのに対し、硬石膏では供試体下部から発生した亀裂が進行し、供試体の破壊に至っている。

6. 今後の課題

本研究では、超高速デジタル式ビデオカメラを用いて石膏試験片中での亀裂進展挙動の観察を行うことができた。

今後、より詳細かつ定量的な計測を行うためには、画像解析手法の確立が必要となる。画像解析の手法として、試験体表面にマーキングを施し、その変位を撮影画像から読み取る手法が多く用いられている。今回カメラでこの手法を適用した場合のメリットとして、以下の点を上げることができる：

1. 撮像素子上での画素と光電変換部のサイズ、配置が完全に既知である、
2. 各光電変換部の感度を計測することができる。
3. 出力画像として、補正を加えていない画像を得

表-2 波動の伝播速度と亀裂進展速度の比較

	$V_s(\text{m/s})$	$V_c(\text{m/s})$	V_s/V_c
Type-R	2,970	442	6.72
Type-P	3,325	202	16.46
Type-H	3,306	416	7.95

ることができる。

この結果、1 画素サイズの 0.1 倍程度の精度でマーキングの位置を決定することができると期待される。これにより計測し得る変位は撮影領域の高さの 2500 分の 1 程度となる。この精度は、微小な弾性変形を追うには十分とはいえないが、塑性領域の変形はある程度の精度で追えることが期待できる。したがって、この精度での、画像解析手法の確立が当面の課題であると言える。

参考文献

- 1) 江藤剛治他：斜行直線 CCD 型画素周辺記録領域を持つ 100 万枚/秒の撮像素子、映像情報メディア学会誌, vol56,483-486, 2002
- 2) 高野保英他：高速ビデオカメラに関するアンケート調査、可視化情報, Vol21,2001

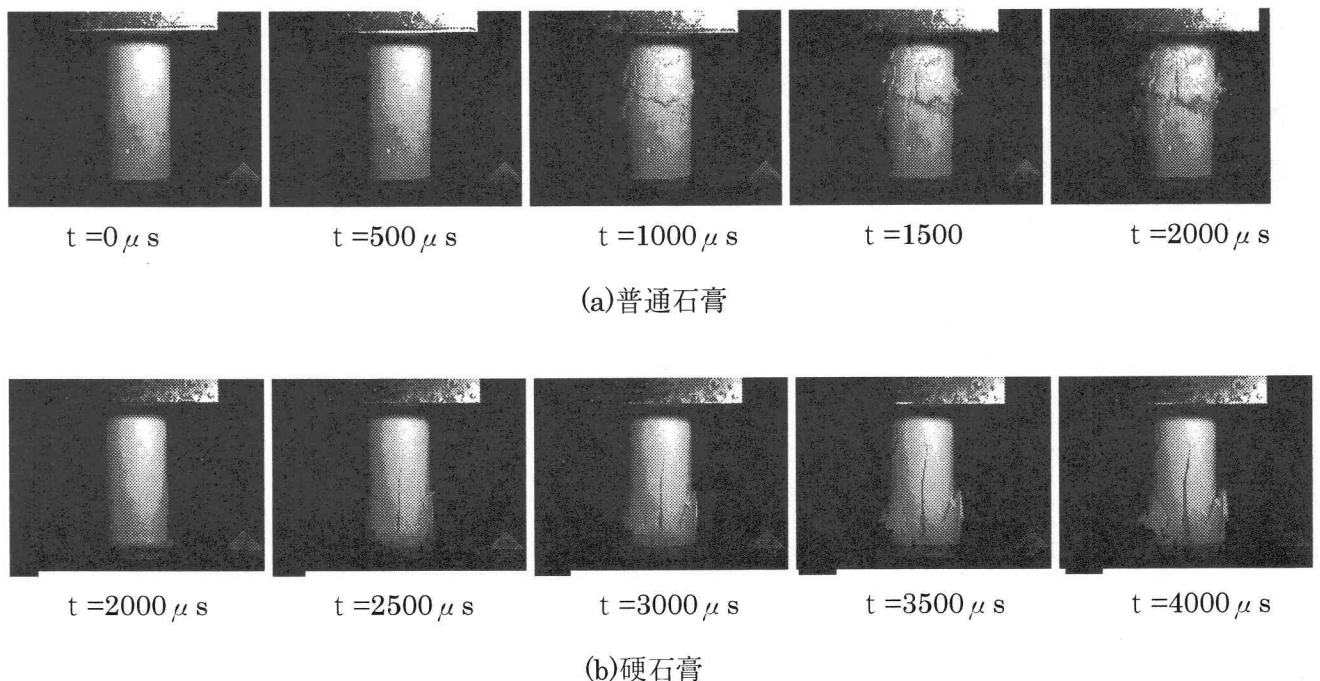


図-4 圧縮衝撃破壊試験結果（撮影速度：毎秒 2 万枚）