

精密制御爆発成形法による複合材料加工技術の開発

横浜国立大学 工学部物質工学科

助教授 三宅淳巳

(平成 8 年度研究開発助成 AF-96024)

キーワード：衝撃波、ユゴニオ、モルタル

1. 研究の目的と背景

ナノ秒オーダーで高温・高圧状態場を創成するエネルギー物質の爆発現象は、様々な分野において工業的に利用されており、特に爆轟現象を利用した各種の材料加工技術に関しては、ほぼ実用化の段階にある。これらは総称して爆発加工と呼ばれており、以下のような特徴を有している。(1)加工対象物には極めて高い圧力が極短時間作用する。(2)そのような高圧力が、材料中を衝撃波として伝播する。(3)爆発圧着や爆発粉末圧搾では、材料の接合界面近傍は摩擦や局所的な塑性変形によって融点を超える高温となるが、材料表面からの熱伝達により内部の温度上昇は低く抑えられ、熱的影響は界面近傍の極薄い層に限られる。(4)材料の塑性変形は静的荷重の場合と異なって、高ひずみ速度および動的な変形機構の下で行われる¹⁾。

爆発加工技術には、爆発成形、爆発圧着、爆発粉末圧搾、爆発表面硬化、爆発切断、爆発衝撃合成等があるが、本研究においては、従来報告例のない、モルタルを含む複合材料の爆発加工技術の開発を目的として、モルタルおよび砂中内の爆発衝撃波伝播特性について基礎的な検討を行い、モルタルおよびモルタル・砂複合材料の衝撃圧縮下での状態方程式の決定を行ったので報告する。

2. モルタルの状態方程式の導出

2.1 モルタルの作成

モルタル板の作成に関しては、セメントには普通ポルトランドセメントを用い、細骨材には 4.75mm ふるいにかけた砂を用いた。配合の重量比は、セメント：砂：水 = 1 : 2 : 0.65 とした。養生に関しては、打ち込みから約

48 時間後に全体をぬれた布で覆い、さらにポリエチレンの袋で密閉し、湿潤状態を保った。実験には材齢が 28 日以上経過したものを用い、その平均密度は 2.08 (g/cm³)であった。

2.2 圧力計測に基づく状態方程式の導出方法

実験にはピエゾ抵抗素子であるマンガニンゲージを用い、ゲージをモルタル板の間に挿入することにより、モルタル中を伝播する衝撃波の圧力プロファイルの観測を行った。そして特にモルタルの状態方程式を得るため、状態方程式が既知である Al 6061 でゲージをはさみこみ、これをさらにモルタル板の間に挿入するという型式の実験を実施した。この場合のゲージの設置状況を図 1 に示す。図中のマンガニンゲージにおいては、図 2 に示すよ

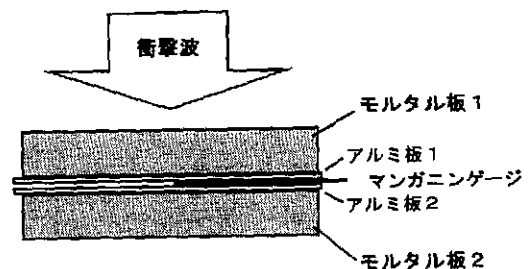


図 1. マンガニンゲージの設置状態

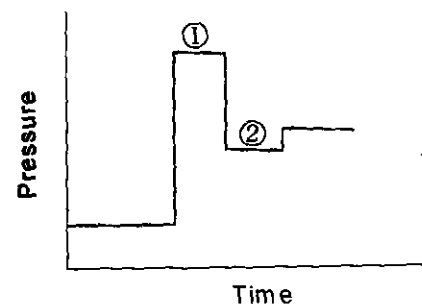


図 2. 圧力プロファイルの概念図

うな圧力プロファイルが得られる。図2の①における圧力は、図1においてモルタル板1とアルミ板1とを伝播してきた衝撃波の圧力に対応する。そして図2の②は、図1のモルタル板2とアルミ板2との界面で生じた反射波の圧力に相当する。

この関係について、インピーダンスミスマッチ法を用い $P - u_p$ 図上に表したものが図3である。Al 6061の状態方程式は既知であり、①、②に対応する圧力値もマンガニンゲージの圧力プロファイルから求めることができるので、図3に示すようにモルタルの状態量を表す座標 (P, u_p) を特定することができる。さらに、 $P - u_p$ 平面においては、曲線上のある1点に向かって原点から引いた直線の傾きは $\rho_0 U_s$ であり、モルタルの初期密度に関しては既知であることから、②に対応するモルタルの U_s の値も求めることができる。したがって、入射衝撃波の圧力を様々に変化させることによりモルタルの状態量 (P, u_p) を数点獲得することができ、それらデータ間の関係から状態方程式を求めることが可能である。

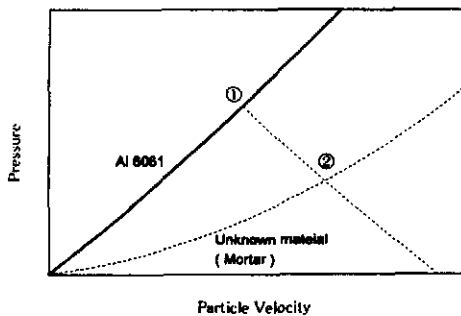


図3. インピーダンスミスマッチ法の適用

2.3 実験結果

モルタルの状態方程式を得るために用いた実験装置の概略図を図4に示す。主爆薬には、モルタルに入射する衝撃波の圧力を変化させるため、ニトロメタン、PBX、HN/HH = 75/25 wt%，および Composition-B、の4種類を用いた。前節の手法に基づき、 $U_s - u_p$ の関係を求めた結果を図5に示す。図5より、各観測データは直線近似が可能であり、これより衝撃圧縮下でのモルタルの状態方程式は $U_s = 1053 + 3.41u_p$ であると決定できる。図6に主爆薬にニトロメタンを用いたときに得られた圧力プロ

ファイルと、1次元ラグランジュ流体計算コードによるシミュレーション結果を示す。両者は極めてよい一致をしていることが分かる²⁾。

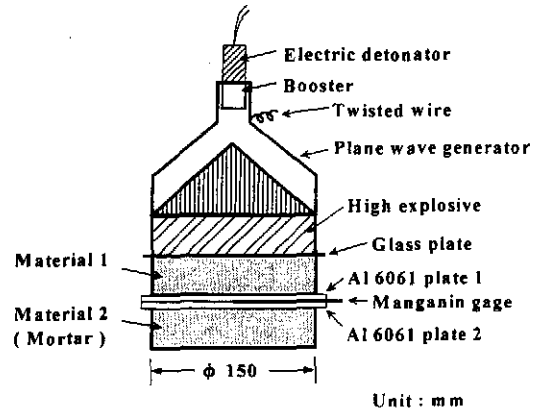


図4. 実験装置概略図

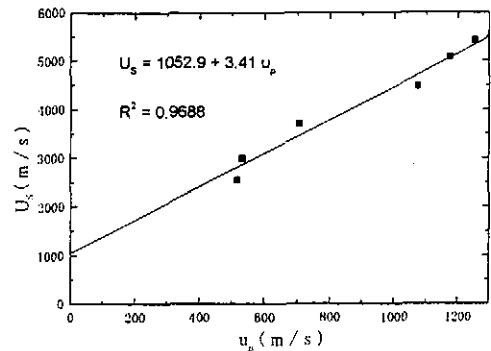


図5. $U_s - u_p$ 図上への観測データのプロット

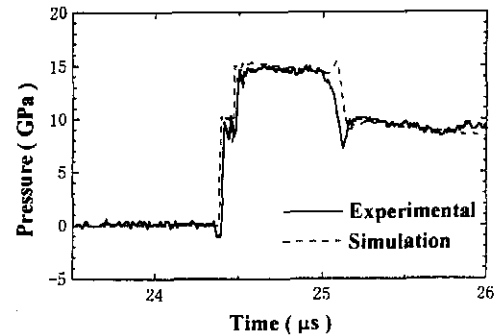


図6. 観測データとシミュレーションとの比較

3. モルタル・砂複合材料の状態方程式の導出

3.1 モルタル・砂複合材料

爆発事故の被害を最小限に防ぐ防爆壁に求められる性能は、衝撃波の減衰効果と衝撃波や飛散物に対する耐力

であり、防爆壁の素材としては一般にコンクリートが用いられている。しかし、衝撃波の持つエネルギーの吸収・減衰という点では、コンクリートより砂の方が有効な建築材であると考えられ、コンクリートの間に砂層を設けた複合型防爆壁は、耐力はコンクリートに、衝撃波減衰効果は砂層に期待できるため、コンクリート単相防爆壁よりも有効な防爆壁になると考えられる。そこで本節では爆発災害時の防護対策として、コンクリート・砂を用いた複合材料による多層構造防爆壁を提案し、砂の状態方程式を導出することとする。

3.2 モルタル単相隔壁とモルタル・砂複合型隔壁との比較

隔壁中を伝播する爆発衝撃波を、マンガニンゲージで観測した。実験装置の概略を図7, 8に示す。爆薬はComposition-B 10kgを使用した。爆薬に近い順で2番目のゲージ(爆薬から約92mmの位置)で観測されたピーク圧力は、図7ではおよそ11GPa, 図8では6GPaであった。実験結果から、複合材料はモルタル単相よりも明らかに衝撃圧力減衰効果が高いことが分かる。

3.3 砂の状態方程式導出

砂のように被圧縮物体が空隙のある物質(粉体)の衝撃圧縮下における状態方程式を求める場合には特別な取り扱いが必要である。そこでまず、以下の2点について仮定する。

(1) どのような弱い衝撃波でも、空隙のない状態に直ちに圧縮されその後は固体として取り扱える。

(2) 初期の内部エネルギーは、Hugoniot エネルギーに比べて無視でき、さらに $\gamma(v) = \text{const.}$ とする。

と定義する。まず、 $v_{00}/v_0 < h$ ($h = 1 + 2/\gamma$) の場合、粉体における衝撃の内部エネルギーは上記の過程から

$$E = \frac{1}{2} P_{H00} (v_{00} - v) \quad (1)$$

ただし、 P_{H00} は粉体の Hugoniot 圧力を示す。これを Mie-Grüneisen 式に代入すると、

$$P_{H00} = \frac{(h-1)P_c - 2E_c/v}{h - v_{00}/v} \quad (2)$$

また同様に、固体における Hugoniot 圧力 P_{i0} は

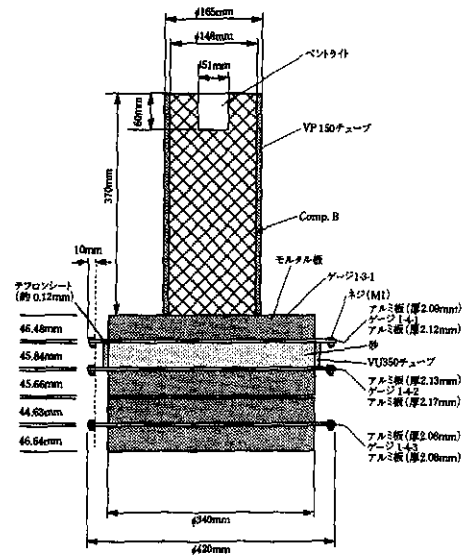


図7. モルタル単相隔壁実験装置

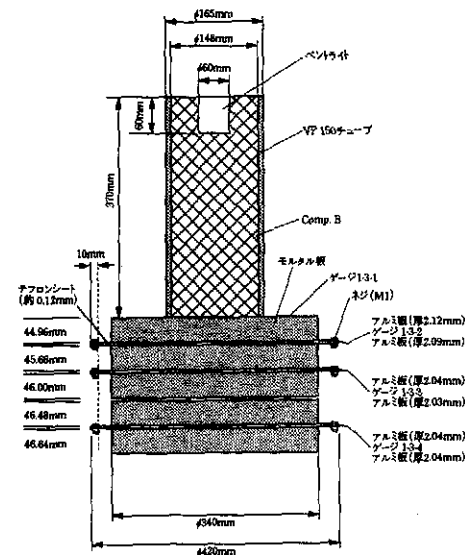


図8. モルタル・砂複合型隔壁実験装置 1

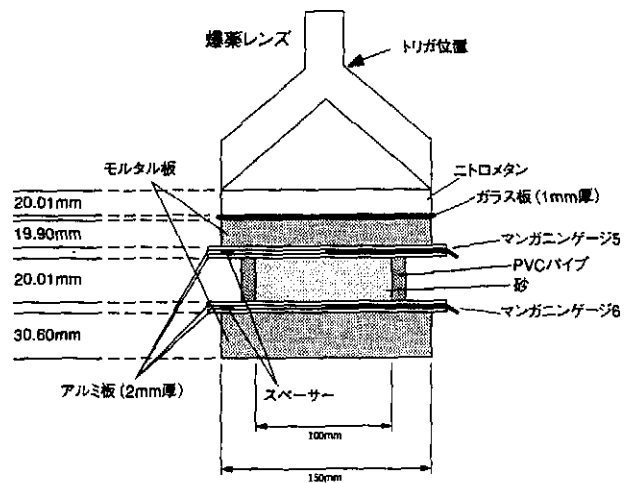


図9. モルタル・砂複合型隔壁実験装置 2

$$P_{H0} = \frac{(h-1)P_c - 2E_c/v}{h-v_0/v} \quad (3)$$

式(2), (3)より

$$\frac{P_{H00}}{P_{H0}} = \frac{h-v_0/v}{h-v_{00}/v} \quad (4)$$

式(4)より, P_{H00} は P_{H0} に比べて圧力の上昇が大きく ($v = v_{00}/h$ で $P \rightarrow \infty$), v_0 を基準とする圧縮よりも高い圧力を必要とすることが分かる。したがって固体状態の P_{H0} が分かれば, 粉体の P_{H00} を v の式として得ることができる。砂質岩の化学組成は理科年表によると, セキエイ(SiO_2)が78.7%を占め, 次いでCaO 5.5%, と253個のサンプルから求めている。そこでここでは砂をセキエイの粉体と見なし, 衝撃パラメータを求めた。文献値によると, セキエイの $U_s - u_p$ の関係は $U_s = 3815 + 1.06 u_p$ (m/s)である。図8, 9の実験データから衝撃パラメータを求め, $P-u_p$ の関係を示したものが図10である。実験データと, 導出した曲線は極めてよい一致をしていることが分かる。さらに図11に示すように, 観測データとシミュレーション結果とは極めてよい一致をしていることが分かる。モルタルと砂の状態方程式を導出したことにより, 任意の設計の複合型隔壁に対して性能評価が可能となった³⁾⁴⁾。

4. 結言

モルタルおよびモルタル・砂複合材料に関し, 衝撃波伝播特性を求めたところ, 以下のような結論が得られた。

- (1)モルタルの衝撃圧縮下の状態方程式を導出し, 衝撃波速度 U_s と粒子速度 u_p との間に $U_s = 1053 + 3.41u_p$ (m/s)という関係を得た。
- (2)モルタル単相とモルタル・砂複合素材中を伝播する衝撃波圧力を比較すると, 厚さ約92mmに対して, 前者よりも後者の方が, 半分程度の6GPaに減衰することが分かった(ただし使用爆薬はComposition-B 10kg, 測定位置は爆薬より92mm)。
- (3)砂をセキエイの粉体と見なして状態方程式を導出し, 実験結果から導いた衝撃パラメータとよい一致を得た。
- (4)モルタルと砂の状態方程式を導出したことにより,

任意の設計の複合材料に対する性能評価を可能とした。

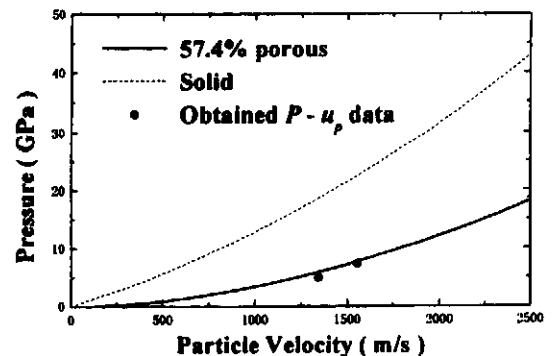


図10. セキエイの $P - u_p$ の関係

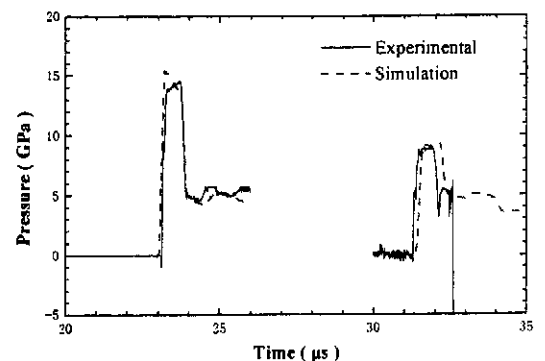


図11. 実験装置2における観測データとシミュレーション結果との比較

謝 辞

本研究は, 通産省工業技術院物質工学工業技術研究所の御協力を得て遂行した。ここに記し, 関係諸氏に深く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- (1)火薬学会編:「エネルギー物質ハンドブック」, 共立出版(1999)
- (2)石口・三宅他:モルタル中を伝播する衝撃波に関する研究, 火薬学会年会講演要旨集, 東京(1999)
- (3)石口・三宅他:モルタル中を伝播する衝撃波の減衰に関する研究, 衝撃波シンポジウム, 東京(2000)
- (4)M. Ishiguchi, A. Miyake et al.: J. Ind. Explos. Soc, Japan, 61, 249-253 (2000)