

VI-11

多孔発破における最大速度振幅の重畳効果について

山口大学工学部 正 国松 直 山口大学工学部 正 中川浩二
山口大学工学部 正 三浦房紀 鴻池組（株） 正○坂本匡規

1. はじめに 発破振動は従来より最大速度振幅（PPV）を用いて規制がなされてきた。その予測式として経験則に基づく $PPV = KW^{\alpha} D^{-\beta}$ なる式が一般的に使用されている。ここで、 K 、 α 、 β は定数、 W は薬量（kg）、 D は爆源からの距離（m）である。この式において、 W に対する明確な規定は今のところなく、多孔発破においては同段当りの薬量が用いられているようである。

本研究は薬量と発破のエネルギーが比例すると仮定して動的FEM解析により、多孔発破における薬量、発破孔間隔、秒時差がPPVに及ぼす影響を調べたものである。

2. 解析方法 図1に解析モデルを示す。境界はすべて粘性境界とし、波の反射を吸収するようにした。要素は1辺が10cmの正方形であり、材料定数はヤング率 $6 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$ 、単位体積重量 1600 kg/m^3 、ポアソン比 0.32である。解析は平面ひずみ問題とし、着目点A、Bの速度波形について PPVを求めた。载荷荷重は载荷時間 4msと極めて短いベル型荷重とした。解析における1ステップの時間刻みは0.1msである。

2-1 斉発発破を模擬した解析 1点载荷、2点、4点同時载荷を行い、それぞれ単発、2孔、4孔斉発発破を模擬した。2点、4点载荷ではモデル中心軸に対称に载荷点間隔をとり解析を行った。図1の下向き矢印は2点载荷時の载荷位置の1例である。载荷点間隔（ d ）は2点同時载荷では 0, 20, 40, 60, 80, 120cm、4点同時载荷では 0, 20, 40, 60, 80cmとした。また各载荷点に対応した位置で1点载荷を行った。

発破のエネルギーが薬量に比例するという考えは一般に認められているようである。この考えに従えば、多孔発破において各孔の薬量が同一の場合には各爆源におけるエネルギーは等しくなければならない。そこで、解析においても载荷点のエネルギーを荷重～変位曲線で囲まれた面積により算出し、各载荷点のエネルギーが等しくなるようにベル型荷重のピーク値を調整した。

2-2 段発発破を模擬した解析 2孔段発発破を模擬し、载荷点間隔 20cm、秒時差 8msの解析を行った。

3. 解析結果および考察 図2、3の実線は各々2点、4点同時载荷による点A、BのPPVを d に対してプロットした結果である。両図とも d が0のときPPVは最も小さく、 d の増加に伴いピークを示し、その後漸減する傾向を示している。

2点、4点同時载荷の载荷点に対応した位置で1点载荷により得られた点A、Bの速度波形を用いて2点、4点同時载荷に対する重畳シミュレーション（各波形の線

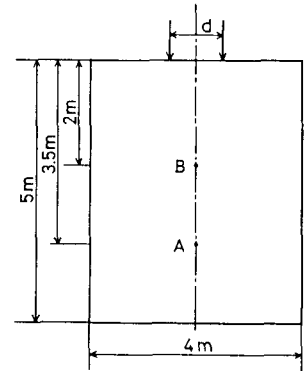


図1 解析モデル

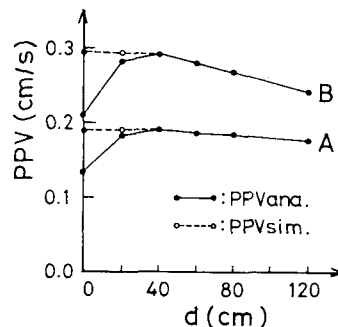


図2 2点载荷のPPV変化

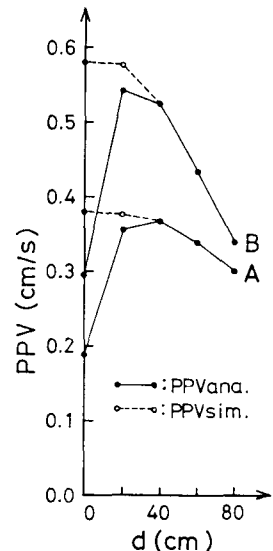


図3 4点载荷のPPV変化

形な重ね合せ）を行った。図2、3の破線はその結果である。これらの図からある孔間隔以上では重畳シミュレーションによる PPV (PPVsim.) は解析による PPV (PPVana.) と一致することがわかる。図4は図2、3をもとに縦軸に PPVana./PPVsim.、横軸に d をとりプロットした結果である。図4 (a) は2点、図6 (b) は4点载荷の場合である。どちらの場合も点A、Bの結果は等しく●で示した。PPVana./PPVsim. は d が 0 で最小を示し、d の増加に伴い PPVana./PPVsim. も増加し、ある孔間隔（これを d* とする）から一定 (PPVana./PPVsim. = 1) となることがわかる。また d=0 に対する PPVana./PPVsim. は2点载荷に対して $1/\sqrt{2}$ 、4点载荷に対して $1/2$ となっている。

図5は中心軸から 10cm の位置で、1点载荷により得られた点Bの速度波形である。図6は段発発破を模擬した解析より得られた速度波形である。図6の波形は図5の波形が 8ms 遅れて繰り返されていることがわかる。段発発破を模擬した解析結果は重畳シミュレーション結果と一致する。

4. 最大速度振幅の推定式 多孔発破で各孔の薬量が同じであるとき、単発発破による速度波形、または PPVs (単発発破のPPV) を用いて図4の結果をもとに次の3つの場合に分けて予測式が考えられる。

(1) 斉発発破

① 孔間隔が狭く集中装薬とみなせる場合

(図4の d=0 に相当)

$$PPV_{ana.}/PPV_{sim.} = 1/\sqrt{N} \quad \dots (1)$$

この場合、 $PPV_{sim.} = N \cdot PPVs$ と表せる。

② ①より孔間隔が広く集中装薬とみなせない場合

(図4の a 領域)

d* まで指数的に増加すると仮定すれば

$$PPV_{ana.}/PPV_{sim.} = ((d/d^*)^\gamma \cdot (1 - 1/\sqrt{N}) + (1/\sqrt{N})) \quad \dots (2)$$

③ ②以上の孔間隔の場合 (図4の b 領域)

重畳シミュレーションによる PPV

(2) 段発発破

斉発発破の③と同様、重畳シミュレーションによる PPV

ここに、 $PPVs = KW^\alpha d^{-\beta}$ であり、W は孔当りの薬量である。また N は孔数、d は孔間隔、d* は②と③の境界の孔間隔である。図4の実線は式 (2) を用いて d*=40cm、(a) は $\gamma=0.22$ 、(b) は $\gamma=0.155$ として計算した結果である。

以上の結果より、単発発破の速度波形から孔間隔、秒時差の影響を考慮するだけで多孔発破時の PPV を上記の3つの場合に分けて予測することが可能と思われる。

謝辞：本研究の一部は文部省科学研究費補助金（奨励）によったことを付記し謝意を表す。

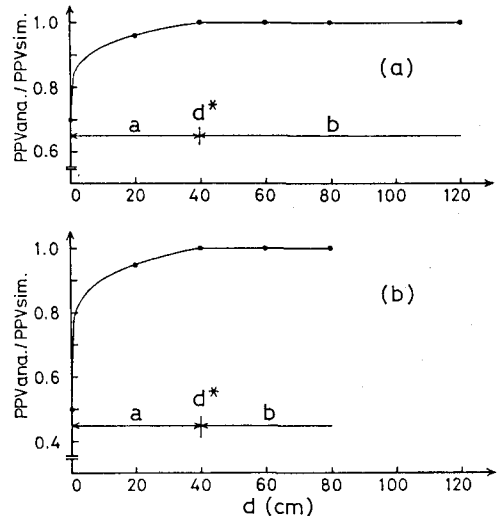


図4 PPVana./PPVsim. と孔間隔の関係

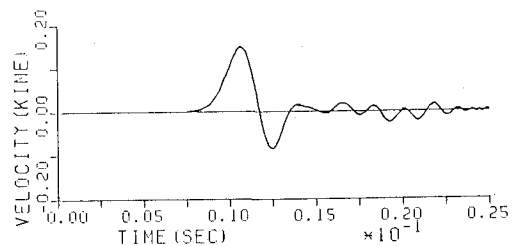


図5 1点载荷の速度波形 (d/2=10cm、点B)

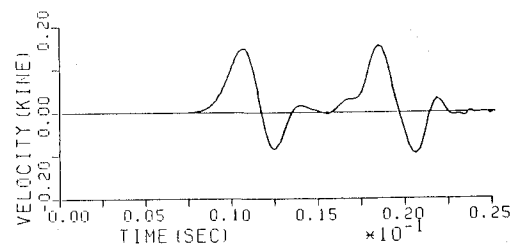


図6 時間差8msをつけた2点载荷の速度波形 (d=20cm、点B)