

爆風波を受ける梁構造物の応答(第2報)

モデル及び爆源の換算について

板垣晴彦*, 小川輝繁*, 中野雅司**, 越智弘二**

爆薬を利用した作業の際に発生する爆風波は近傍の構造物に対して変形や破損を引き起こす。この構造物の変形の基礎研究として、モデル構造物に梁構造物を選び、モデル構造物と爆源のスケール変化に対する曲げ変形の挙動について測定を行った。また、前報¹⁾で述べた等価1自由度振動モデルの適用を試みた。

この実験において、モデルのたわみ量はピーク圧力あるいはインパルスのいずれかの単独に支配されるのではないとの結果が得られ、爆源の換算は両方の効果に依存するとして扱う必要があることがわかった。

梁の曲げ変形における梁中央の変位の時間変化は、モデル構造物のスケールが変化しても、等価モデルを用いて表すことができた。ただし、その際の等価モデルのパラメーターは、弾性変形領域に対しては、ヤング率を静的荷重の値の約2倍に見積った際の値に相当した。塑性変形領域に対しては、小スケールでひずみ速度が速い場合は降伏応力を静的荷重の値の約1.5倍と見積る必要があったが、スケールが大きくなると静的荷重の値に近づいた。

1. 緒言

発破や掘削などの爆薬を利用した作業の際に発生する爆風波が構造物に及ぼす荷重は、非常に短い持続時間ではあるが、その大きさは構造物の許容荷重の数倍から数十倍以上にもなり得る。この荷重特性から、爆風波を受ける構造物の応答解析は、静的な取扱いではなく、動的な取扱いが必要である。²⁾

前報¹⁾では、梁構造物の曲げ変形に対する等価1自由度振動モデルを示して実測値へ適用した。そして、等価モデルが曲げ変形の様子を適切に表現できることを明らかにした。しかし、実験は小スケール、小薬量に限られており、広範囲にわたる適用には問題が残されていた。

そこで、今回モデル構造物のスケールや爆源の薬量を変化させる実験を行った。薬量に対してはモデル構造物に加わる爆風波のピーク圧力やインパルスと曲げ変形の関係を調べた。モデル構造物に対しては長さや厚さの比を一定に保ちつつ、スケールを変化させた。そして、広い範囲への適用に必要な換算手法を実験的

に検討した。また、等価1自由度振動モデルのスケール変化への対処について考察し、実測値への適用を試みた。

2. 梁の曲げ変形に対する等価1自由度振動モデル
多自由度の系を1自由度の系とみなすためには、パラメーター1つで系を表さねばならない。ここでは梁構造物の曲げ変形が、弾性状態では静的な等分布荷重を受ける梁と、塑性状態では中央に塑性関節を持つ梁と、それぞれ同一のたわみ曲線をなすと仮定して、梁中央のたわみ量のみで系を表せるようにした。これらの仮定から、等価1自由度振動モデルのばね定数 K_e 、塑性抵抗 R_e 、質量 m_e は次のようになる。¹⁾³⁾

$$K_e = \frac{6144EI}{125L^3} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{4M_U}{L} = \frac{bh^2}{L} \sigma_Y \quad (2)$$

$$m_e = \begin{cases} \frac{3968}{7875} m & \text{弾性状態} \\ \frac{1}{3} m & \text{塑性状態} \end{cases} \quad (3)$$

E : ヤング率 I : 断面2次モーメント L : 梁の長さ

m : 梁の質量 b : 梁の幅 h : 梁の厚さ

M_U : 塑性関節の曲げモーメント σ_Y : 降伏応力

3. 爆風波を受ける梁構造物の曲げ変形の測定

3.1 実験装置

昭和64年1月6日受理

*横浜国立大学工学部物質工学科
〒240 横浜市保土ヶ谷区常盤台 156
TEL 045-335-1451(内2887)

**日本油脂株式会社 美唄工場
〒079-01 北海道美唄市光珠内 549
TEL 0126-67-2211

Fig.1に示す装置は、梁を支える架台と爆源、および、梁のたわみ測定用のピンプローブ、爆風波測定用の圧力計から構成されている。

モデル構造物に用いた梁の材質はSS41一般用鋼材で、そのサイズをTable 1に示す。梁の形状は長さと同士の比を等しくし、塑性変形を始める静的荷重の大きさが一定となるようにしてある。

3.2 測定方法

ピンプローブは梁の鉛直方向の変位の時間変化を測定するため、梁の中央下方に高さの段差を付けて設置した。その間隔は予想されるたわみ量の大きさに応じて、0.5mmから5.0mmとした。爆発後、梁に生じた塑性たわみ曲線を記録し、梁中央部付近のたわみの永久変

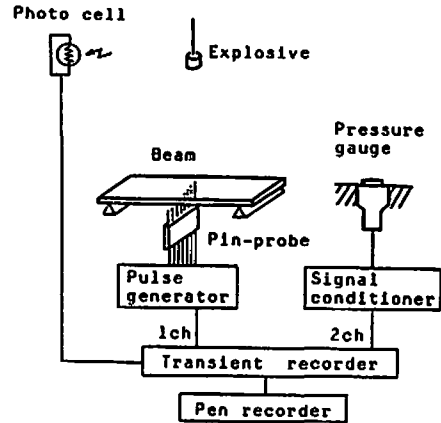


Fig. 1 Measuring equipment for response of beam model.

Table 1 Beam models and explosives.

Model	S	M	L	LL
Length (mm)	175	350	492	700
Width (mm)	50	100	150	200
Thickness (mm)	1.6	3.2	4.5	6.4
Explosive	Tetryl 10~40 g	Blasting gelatine		
		10~270 g	40~270 g	80~270 g
Scaled distance (m/kg ^{1/3})	0.93	0.93	0.93	0.93
	2.32	2.34	2.34	1.39

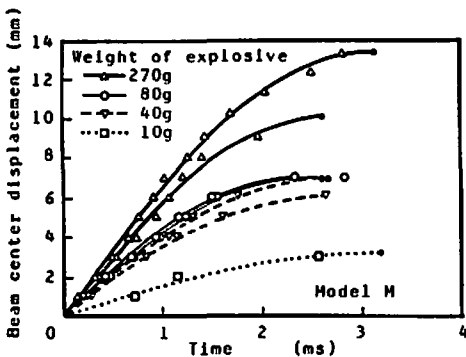


Fig. 2 Time history of displacement. (Scaled distance = 1.86 m/kg^{1/3})

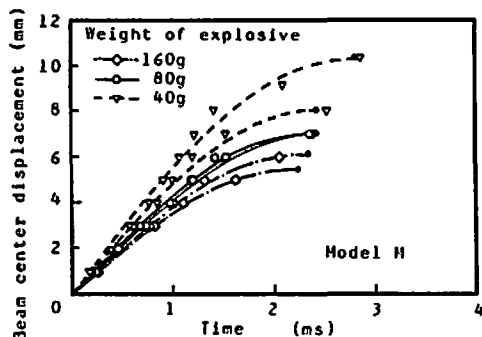


Fig. 3 Time history of displacement. (Impulse = constant)

形量を求めた。

4. 結果及び考察

4.1 爆源の換算

Fig. 2と3はモデル構造物をModel Mのままとし、薬量を10から270gまで変化させたときのたわみ時間曲線である。Fig. 2では、爆源から梁までの換算距離

を一定としてピーク圧力が等しくなるようにした。Fig. 3では、換算距離と換算インパルス⁽⁴⁾に基づいて、インパルスが等しくなるように距離を定めた。いずれの図においても、たわみの永久変形量は1mm未満で、梁の変形は弾性領域内にあった。さて、運動を妨げようとする抵抗力が変位に比例

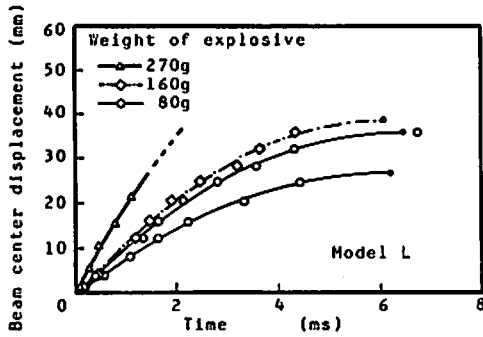


Fig. 4 Time history of displacement.
(Scaled distance = 0.93 m / kg^{1/3})

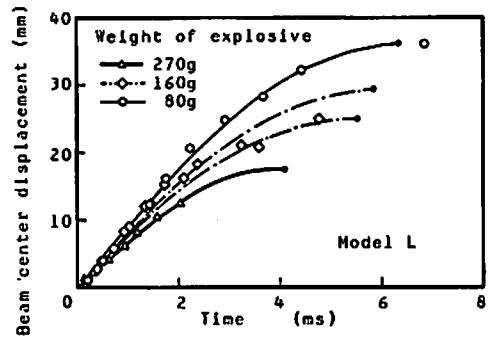


Fig. 5 Time history of displacement.
(Impulse = constant)

するならば、その変位の時間変化は正弦曲線をたどる。そこで、プロットを正弦曲線の最小自乗法で回帰し、図中にはたわみ量が最大になるまでを記した。プロットと曲線は良く一致している。この一致は他のスケールでも見られたことから、等価モデルはスケールが変化しても梁の曲げ変形を適切に表せると判断できよう。

次に、モデル構造物を Model L とし、ピーク圧力あるいはインパルスを一一定とする同様な実験を行った。ただし、爆源から梁までの距離を先の図よりも近くした。そのため、Fig. 4, 5 でのたわみの永久変形量は 48.9mm に達する例があった。

運動を妨げる抵抗力が変位にかかわらず一定であれば、その変位の時間変化は 2 次式で表されることから、プロットを 2 次式の最小自乗法で整理した。ただし、抵抗力を一定と見なせる塑性領域となるのはある値以上のたわみの領域であるから、その領域のデータについて回帰した。曲線はたわみ量が最大値になるまでを示してある。この図においても曲線とプロットは良く一致している。

ところで、薬量と瞬間最大たわみ量の関係を見ると、ピーク圧力を一定とした Fig. 2 と 4 では薬量が増すとたわみ量は大きくなり、インパルスを一一定とした Fig. 3 と 5 では薬量が増すと逆にたわみ量は小さくなる。すなわち、この実験のモデルは、永久変形の有無にかかわらず、瞬間最大たわみ量がピーク圧力あるいはインパルスのいずれか単独ではなく、両方の効果に依存する中間領域⁽⁵⁾⁽⁶⁾にある。

4.2 モデル構造物のスケールに対する換算

静的な荷重を受ける場合、等価 1 自由度振動モデルのばね定数 K_r と質量 m_r は (1)(3) 式で与えられるので、弾性領域でのたわみの時間変化を表す正弦曲線の角振動数 ω は次式のように書ける。

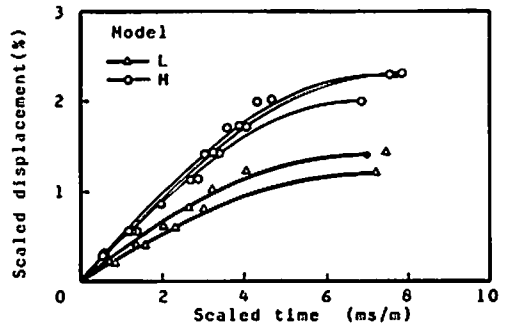


Fig. 6 Time history of displacement.
(Explosive = 80 g, 80 cm)

$$\omega = \sqrt{\frac{K_r}{m_r}} = \sqrt{\frac{6144EI}{125m_r L^3}} \quad (5)$$

また、塑性抵抗 R_r と質量 m_r は (2)(4) 式で与えられるので、塑性領域でのたわみの時間変化を表す 2 次式の 2 次項の係数 A_0 は次式となる。

$$A_0 = -\frac{R_r}{2m_r} = -\frac{bh^2}{2m_r L} \sigma_y \quad (6)$$

これらの式中の各パラメーターは相似な形状の梁に対して次の関係がある。

$$b \propto S_f, \quad h \propto S_f, \quad L \propto S_f, \quad m_r \propto S_f^3, \quad I \propto S_f^4 \quad (7)$$

S_f : スケール比

したがって、(5)(6) 式中の ω と A_0 に対しては、

$$\omega \propto \frac{1}{S_f}, \quad A_0 \propto \frac{1}{S_f} \quad (8)$$

の関係がある。また、たわみ量はたわみ曲線の形状が相似にあれば、その大きさが S_f に比例する。

以上から、スケールの異なるモデル間での比較には、時間とたわみ量に対して S_f で除す換算を行えば良い。

ここでは、各モデル構造物のスケールの代表値として梁の長さを選び、時間とたわみ量をこの値で除す

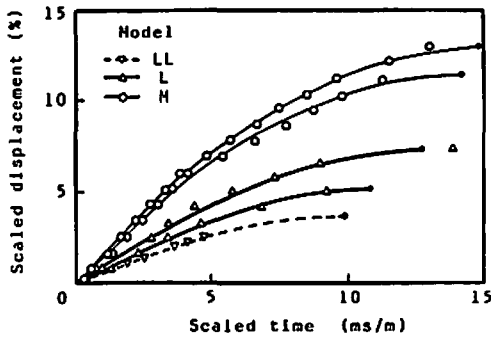


Fig. 7 Time history of displacement.
(Explosive=80 g, 40cm)

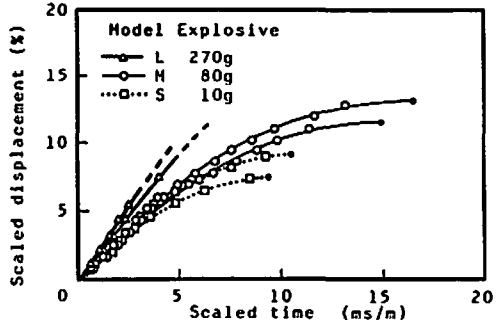


Fig. 8 Time history of displacement.
(Scaled distance=0.93 m/kg^{1/3})

ることとした。もし、時刻0で与えられる初速度が等しく、定数パラメーターに変動がなければ、このスケール換算により、たわみ時間曲線は一致する。

スケールの効果を調べるために、爆源の薬量を80gで一定とし梁までの距離を80cmまたは40cmにして、各モデル構造物でのたわみ時間曲線を測定した。Fig.6と7は上記のスケール換算を施した結果である。

Fig.6は爆源から梁までの距離は80cmの場合で梁には塑性たわみがほとんど生じない。原点からたわみ量が最大となるまでの時間はModel MもLも8ms/m弱ではほぼ等しい。この時間はモデル構造物に永久変形が生じないのであれば、Model SとLLの場合や爆源が異なる場合でもほぼ同一の値を示した。すなわち、換算時間で比較すれば振動周期の逆数にあたる角速度 ω が一定になる。

Fig.7は爆源から梁までの距離が40cmの場合で梁には多少の永久変形が生ずる。たわみの永久変形量の換算値はMが7.3%と5.6%、Lが1.5%と0.7%、LLが0.2%で、スケールが大きくなるにつれて減少した。永久変形を生ずるにはその大きさの分だけ時間を要するため、永久変形の大きなものほど瞬間最大たわみを与える時刻は遅くなる。

時間とたわみ量に対して先に述べた換算を行ったが、いずれの図でも曲線は一致しなかった。図を見ると、モデルごとに時間たわみ曲線中の初期の傾きの初速度が異なることに気付く。

爆風波がモデル構造物に及ぼす荷重の持続時間はモデル構造物の運動に要する時間に比べて、非常に短いため、爆風波の圧力エネルギーは運動エネルギーに変換され、その後にはびずみエネルギーへ移行する。モデル構造物に加わる力積は爆源からの圧力波が均等ならば、モデル構造物の受風面積に比例する。また、モデル構造物の質量はその体積に比例するから、スケール

ファクター S_j に対して

$$mV \propto S_j^2 \quad m \propto S_j^3 \quad (9)$$

m : 梁の質量 V : 梁中央の変位速度

の関係がある。つまり、爆風波がモデル構造物に与える初速度とスケールファクターの関係は次式となる。

$$V \propto 1/S_j \quad (10)$$

ところで、実験は点爆源であるために爆源の直下とモデルの端の部分では爆源までの距離が異なり、作用する圧力は同等ではない。その差は大きなスケールのモデルほど大きく、与えられる運動量は(9)式の値よりも少なくなる。その結果、スケールが大きくなると、初速度は(10)式が示す以上に低下する。Fig.6と7の初速度の変化はこの2つの理由による。

そこで、モデルと爆源のスケールを共に変化させる実験を行った。Fig.8は換算距離を0.93 m/kg^{1/3}で一定としたまま、梁と爆源のスケールをともに変化させたときの結果である。図の軸はFig.6,7と同様の換算をしてある。

この図でも、たわみ時間曲線は一致をしなかった。Model Lは初速度が他よりも速く、Model MとSとでは、初速度はほぼ等しいのであるが後半での減速が異なる。これらの原因は、Model Lの場合は爆源の薬量が多く、初速度がインパルスの効果を受け始めること、Model Mではひずみ速度がModel Sよりも遅く、降伏応力が静的な値に近づくこと、である。

4.3 等価1自由度振動モデルのパラメーター

Fig.2や3で爆風波荷重の時の角速度 ω が実験的に求まっているので、(5)式を用いて、その角速度の値に等しくなるためのヤング率を逆算した。また、Fig.4や5の2次曲線の2次の項の係数に等しくなるような降伏応力を(6)式から逆算した。算出した各モデルのヤング率と降伏応力をTable2に示す。

ヤング率はモデル構造物のスケールが変化しても、

Table 2 Young's modulus and yield stress.

Model	S	M	L	LL
Young's modulus (kg/mm ²)	4.5×10 ⁴	4.2×10 ⁴	3.9×10 ⁴	5.0×10 ⁴
Yield stress (kg/mm ²)	45	32	29	—

ほぼ同じ値を示す。しかし、その値は静的荷重の値 $2.1 \times 10^4 \text{ kg/mm}^2$ の約2倍である。この値の中には動的荷重の作用から起こる値の変化の他に、仮定したたわみ曲線と実際の曲線の差異の補正分が含まれていると思われる。

一方、降伏応力はModel Sが静的荷重の 29 kg/mm^2 の約1.5倍の値を示すが、M、Lと大きくなると静的荷重の値に近い。これは梁中央の表面でのひずみ速度がSでは3.0(1/Sec)程度であるが、Mでは1.6(1/Sec)、Lでは0.9(1/Sec)と遅くなり、静的荷重の挙動に近づいたためである。

5. 結 言

爆薬を利用した作業などの際の爆風波を受ける構造物に梁構造物を取り上げ、爆風波が加えられた梁の曲げ変形を測定する実験を、薬量とモデルのスケールを変えて行った。

この実験のモデルのたわみ量は、弾性領域でも塑性領域でもピーク圧力もしくはインパルス単独に支配されるのではなく、爆源の換算は両方に依存するとして扱ふ必要があった。

また、等価1自由度振動モデルの適用を試みた。等価モデルは、弾性状態、塑性状態、ともに変位の時間変化の実験結果とほぼ一致し、スケールの変化に

も対応を見せ、等価モデルは有用であると確認できた。ただし、等価モデルのパラメーターは静的荷重の際の値とは異なる例があった。弾性変形領域に対しては、いずれのモデルもヤング率は静的荷重の値の約2倍に見積った値に相当した。塑性変形領域に対しては、小さなモデルでひずみ速度が速い場合は降伏応力を静的荷重の値の約1.5倍と見積る必要があったが、スケールが大きくなると、静的荷重の値に近づいた。

最後に、本研究の一部は火薬工業技術奨励会の研究助成により行いました。ここに記して感謝いたします。

文 献

- 1) 板垣晴彦, 小川輝繁, 工業火薬, 49 360 (1988)
- 2) 梅村 魁, 工業火薬, 26 318 (1965)
- 3) W. E. Baker, P. A. Cox, P. S. Westine, J. J. Kulesz, R. A. Strehlow, Explosion hazards and evaluation, P. 365 (1983), Elsevier scientific publishing
- 4) G. F. Kinny, K. J. Graham, Explosive shocks in air (second edition), P. 174 (1985), Springer-Verlag
- 5) R. A. Strehlow, W. E. Baker, Prog. Energy Combust. Sci., 2 27 (1976)
- 6) 殿谷敬文, 高圧ガス, 17 351 (1980)

**Deformation of a Metallic Beam by the Action of Blast Wave.
(2) Scaling of model and explosive.**

**by Haruhiko ITAGAKI*, Terushige OGAWA*
Masashi NAKANO**, Kouji OCHI****

The deformation of the simple beam by the action of blast wave was measured for some different beams and some different weight of explosive in order to study the scaling effect.

The beam deflection depended on both peak pressure and impulse of blast wave. So, it was found that scaling for weight of explosive depended on these factors within this experiment.

The one-degree-of freedom equivalent system that described previous paper seems good for the different scale models too.

Young's modulus of all model for the equivalent system was about twice the number for static load. In case of small model, yield stress for equivalent system was 50% larger than the number for static load. But in case of larger model, it was about the same as the number for static load, since the strain rate got slow as the scale of model got large.

(*Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Yokohama National University, 156 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama-city, Kanagawa 240

**Nippon Oil and Fats Co., Ltd., 549 Kousyunai, Bibai-city, Hokkaido, 079-01)
