

遠心載荷装置を用いた爆破実験

BLAST TEST IN A CENTRIFUGE

安藤智啓*、藤本一男**、山口弘***、鶴居正行*、伊藤孝****

Tomohiro ANDOU, Kazuo FUJIMOTO, Hiroshi YAMAGUCHI, Masayuki UI, Takashi ITOU

- * 工修 防衛庁第4研究所研究員 (〒229 神奈川県相模原市淵野辺2-9-54)
- ** 工博 防衛庁第4研究所第1部長 (〒229 神奈川県相模原市淵野辺2-9-54)
- *** 工博 防衛庁装備局開発計画課部員 (〒107 東京都港区赤坂9-7-45)
- **** 防衛庁第4研究所研究員 (〒229 神奈川県相模原市淵野辺2-9-54)

Effective and economical design of some buried structures requires knowledge of the dynamic soil pressure on the structures and the structural behavior. Full-scale blast tests are the best for estimating the behavior of the structures. However, this method has some disadvantages in terms of cost, time and safety. A small-scale blast test, which can simulate a large explosion with a small explosive using a centrifuge, is useful in the structural analysis under blast loadings. In this study, the dynamic responses of structures, buried in sand and subjected to blast loadings are investigated by centrifuge modeling. And the applicability of the scaling laws to experimental results is discussed.

Key Words: centrifuge, scaling laws, blast loadings, dynamic response

1. はじめに

近年、土木工学の分野においても衝撃問題が広く取り上げられるようになり、多くの実験が行われている。しかしながら、衝撃分野において爆破に関する研究は比較的少ないようである。土木工事等における爆破から、既存の構造物の安全性を確保するためには、爆破によって構造物に作用する動的荷重を解明し、動的荷重が作用する場合の構造物の応答特性を把握する必要がある。本来ならば、実物大の爆破実験により評価を行うことが望ましい。しかし、耐衝撃性能評価に大きく影響する土の特性は、現場の地形、地質、降雨等に左右されるためその評価が困難であると考えられる。また、実物大の爆破実験は、大規模な土木作業が必要であり、多大な人員、期間、費用を要する問題がある。従って、地盤条件や試験条件を種々変えた実験が可能である、安価で簡便な模型実験により、実際に起こった現象を再現することができれば得策であると考えられる。

しかしながら、一般に地盤の変形挙動や破壊特性は拘束圧力に依存するため、地球の重力加速度場（以後、1G場と呼ぶ）における模型実験では、厳密には相似則は成立せず、実物大の挙動を定量的に推定することは困難であると考えられている。そこで最近では、1G場の数倍から百倍程度の遠心加速度を付加し、実物と同じ応力状態

を模型地盤中に再現することで、上記の問題点が解消できる遠心載荷装置を用いた実験手法への期待が高まってきている。実際我が国では、遠心載荷模型実験は、地盤の圧密問題、支持力問題や斜面の安定問題等おもに土質工学の分野で実験的な研究が進められており、その適用性に関する研究成果^{1)・2)}が多数報告されている。しかしながら、動的問題³⁾への同手法の適用性に関してはほとんど明らかにされていないのが現状である。諸外国においては、動的な場合の模型と実物との間に成り立つ相似則、及び土質地盤の爆発現象に関する同手法の適用事例^{4)・5)}の報告は比較的多くみられる。しかし、それらの報告も、火薬の爆発により地表面に形成されるクレータの大きさに関する検討にとどまっており、地盤と構造物の相互作用まで含めた適用性に関する報告は少ないようである。

本研究では、遠心載荷装置を用いた爆破実験（以後、遠心式爆破実験と呼ぶ）法の原理について概説した後、本実験法により、砂表面に形成されたクレータ形状及び砂中に埋設した構造物の動的応答特性に関して実験的に検討し、実物大の爆破現象におけるそれらの推定を試みた。同時に、実物大の現象を推定する場合に用いた本相似則の妥当性及び本実験法の適用性について検討を行った。

2. 遠心式爆破実験法の原理⁶⁾

2. 1 遠心式爆破実験

遠心式爆破実験とは、遠心加速度を付加できる装置（遠心載荷装置）の中に幾何学的に縮小された模型を設置し、遠心加速度が作用している状態（遠心力場）で爆破を行う実験である。その実験結果から、相似則を用いて実物大での結果を推定するものである。

2. 2 相似則^{4), 7), 8)}

模型実験を行う場合、模型と実物が幾何学的に相似であることのほか、各種物理量（時間、速度、力、エネルギー等）が相似でなければならない。一般的には、対象とする現象を支配する物理法則を選定して求める方法や、次元解析による方法から導かれるものである。本実験では、火薬の爆発による動的問題を取り扱うため、相似則を求める支配方程式は、衝撃波の基礎式を適用することにした。また相似則の誘導は連続体を対象として行った。

まず、動的問題を解く場合の運動方程式より、次式の関係が成り立つ。

$$\text{div} T + w b = w a \quad (1)$$

また、いかなる連続体も力学の法則を満足しなければならないことから、今、静止状態にある媒質中を速度 U で移動している衝撃波あるいは爆轟波に関して、以下のような質量保存の法則、運動量保存の法則及びエネルギー保存の法則が成り立つ。

$$w_0 U = w U - w v \quad (2)$$

$$T + w_0 U v = 0 \quad (3)$$

$$w_0 U (e + 1/2 v^2 - Q) + T v = 0 \quad (4)$$

さらに、構造物の板部材の挙動も対象としていることから、次式の平板の振動方程式を支配方程式に適用する。

$$D \nabla^2 \nabla^2 x + w' a = q \quad (5)$$

ここに、式(1)から(5)中の T は応力テンソル、 w_0 及び w は初期の媒質密度及び衝撃波面通過後の媒質密度、 w' は単位面積当たりの質量、 b は物体力ベクトル、 a は加速度ベクトル、 v は粒子速度、 e は単位体積当たりのエネルギー、 Q は単位体積当たりの爆発エネルギー、 D は板剛性、 x は変位、そして q は単位面積当たりの荷重をそれぞれ表している。

ここで、模型の縮尺を α_x 、時間の縮尺を α_t とし、模型と実物との間に次式の関係が成り立つとする。

$$X_p = \alpha_x X_m, \quad t_p = \alpha_t t_m \quad (6)$$

p 、 m は、それぞれ実物(prototype)と模型(model)を表すsuffixである。式(6)によって、相似な位置及び時間を保つならば、支配方程式に現れる変数と係数について、模型と実験に次のような関係が成り立つ。

$$X_p(X_p, t_p) = \alpha_x X_m(X_m, t_m)$$

$$w_p(X_p, t_p) = \alpha_w w_m(X_m, t_m)$$

$$w_{0p}(X_p, t_p) = \alpha_{w0} w_{0m}(X_m, t_m)$$

$$T_p(X_p, t_p) = \alpha_T T_m(X_m, t_m)$$

表-1 遠心加速度NGにおける相似則

物理量	模型/実物	物理量	模型/実物
長さ(α_x)	$1/N$	質量($\alpha_w \alpha_x^3$)	$1/N^3$
面積(α_x^2)	$1/N^2$	力($\alpha_T \alpha_x^2$)	$1/N^2$
体積(α_x^3)	$1/N^3$	球片 ($\alpha_e \alpha_x^3$) ($\alpha_0 \alpha_x^3$)	$1/N^3$
時間(α_t)	$1/N$	応力(α_T)	1
速度(α_x / α_t)	1	ひずみ	1
物体力(α_b)	N	密度(α_w, α_{w0})	1
加速度(α_x / α_t^2)	N		

$$\begin{aligned} b_p(X_p, t_p) &= \alpha_b b_m(X_m, t_m) \\ e_p(X_p, t_p) &= \alpha_e e_m(X_m, t_m) \\ Q_p(X_p, t_p) &= \alpha_Q Q_m(X_m, t_m) \end{aligned} \quad (7)$$

$$E_p(X_p, t_p) = \alpha_E E_m(X_m, t_m)$$

$$w'_p(X_p, t_p) = \alpha_w w'_m(X_m, t_m)$$

$$q_p(X_p, t_p) = \alpha_q q_m(X_m, t_m)$$

$$U_p(X_p, t_p) = \alpha_x / \alpha_t U_m(X_m, t_m)$$

$$v_p(X_p, t_p) = \alpha_x / \alpha_t v_m(X_m, t_m)$$

$$a_p(X_p, t_p) = \alpha_x / \alpha_t^2 a_m(X_m, t_m)$$

ここで、 E は、板剛性中に含まれる弾性係数である。また、各係数 α_i は、スケールファクターである。相似則は、支配方程式が、模型と実物の両者に対して成立するための条件として求められるので、式(6)、(7)を支配方程式に代入し、係数を等しくなるように決定すればよい。例えば式(1)に関しては、

$$\begin{aligned} (\alpha_T / \alpha_x) \text{div} T + (\alpha_w \alpha_b) w b \\ = (\alpha_w \alpha_x / \alpha_t^2) w a \end{aligned} \quad (1')$$

となる。式(1)と同等の式が、模型地盤中に成立するためには、次式が成立しなければならない。

$$\alpha_T / \alpha_x = \alpha_w \alpha_b = \alpha_w \alpha_x / \alpha_t^2 \quad (8)$$

同様にして、式(8)と同じ関係が導かれるものについては省略するものとして、次式の関係が導かれる。

$$\begin{aligned} \alpha_w \alpha_e &= \alpha_w \alpha_Q = \alpha_T \\ \alpha_E &= \alpha_w \alpha_x^2 / \alpha_t^2 = \alpha_Q \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、一般に、剛性や応力-ひずみ関係等が実物と相似な材料を探し出すことや作り出すことが非常に困難であることから、材料は実物と模型で同一のものを使わざるを得ない。従って、 $\alpha_E = \alpha_w = \alpha_{w0} = \alpha_w = 1$ という制約が付く。さらに、地盤と構造物の動的な相互作用問題を考える場合に特に地盤の特性が応力レベルに強く依存する材料であることから、破壊に至る挙動まで考慮して模型実験を行うためには、応力の相似比を1とする必要がある。つまり、 $\alpha_T = 1$ とする必要がある。従って、

$$\alpha_x \alpha_b = 1 \quad (10)$$

となる。式(10)は、模型実験において、遠心加速度を付加することにより可能である。すなわち、 $\alpha_x = N$ 、 $\alpha_b = 1/N$ とすることにより、 $\alpha_T = 1$ を成し得る。さらに、式(8)から $\alpha_t = N$ が求まり、式(9)からは、 $\alpha_e = \alpha_Q = 1$ 及び $\alpha_q = 1$ が求まる。

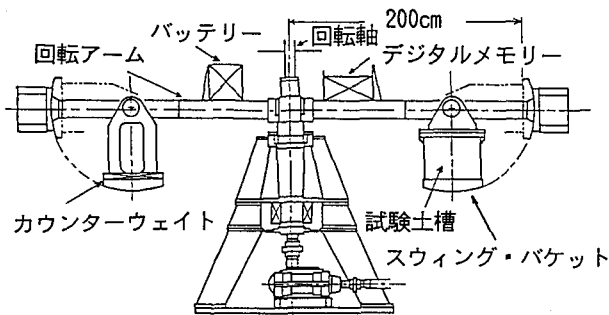


図-1 遠心载荷装置

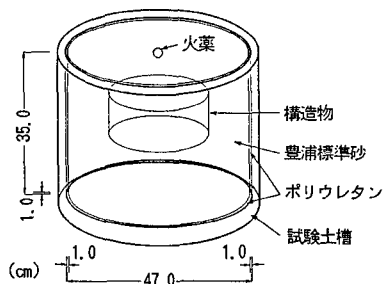


図-2 試験土槽

以上を整理すると、表-1に示す相似則が導かれる。つまり、縮尺 $1/N$ で、 N 倍の遠心加速度を付加して行った模型実験では、実物実験における現象の $1/N$ に時間が短縮される。また、エネルギーは $1/N^3$ となり、少量の火薬で実物大の爆破現象を模擬することができる。応力、ひずみ及び速度に関しては、実物と模型で等しくなる。

3. 実験方法

3. 1 概説

遠心式爆破実験システムは、大きく3つの部分から構成されている。1つ目は、実験を実施している本体部であり、コンクリート製のピット内に遠心载荷装置の本体が収納されている。2つ目は、計測室であり、本体の運転制御装置及びデータ処理のためのコンピュータ解析装置から成っている。3つ目は、構造物模型の組み立て、試験土槽の作製及び土質定数の確認を行うための実験準備室である。これらの部分は、それぞれ独立したスペースに設置され、爆破実験での安全性の確保を図っている。

3. 2 遠心载荷装置

本実験に用いた遠心载荷装置を図-1に示す。本装置は、回転アームの有効長(回転軸からスウィング・バケットまでの長さ)2.0m、最大搭載重量(スウィング・バケット上に設置する試験土槽の最大質量)150kg、最大遠心加速度100Gの能力を有するものである。実験では、電気モータにより回転アームを回転させ、加速・減速時の角加速度は計測室内にあるサイリスタ制御盤により 0.12rad/s^2 に制御して行った。その後、遠心加速度によりほぼ水平になるまで振り上がり、所定の遠心加速度に達するまで回転速度を上げていく。遠心加速度が所定の値

表-2 火薬の材料特性

	密度 (g/cm^3)	爆発エネルギー (MPa)	爆発速度 (m/s)
PETN	1.77	3.84×10^{-2}	8.30×10^3
$\text{Pb}(\text{N}_3)_2$	2.50	1.01×10^{-1}	3.58×10^3

表-3 構造物の材料特性

	引張強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	伸び (%)	弾性係数 (MPa)
A5052	238	2.06×10^2	14	7.2×10^4

表-4 豊浦標準砂の材料特性

	土粒子の密度 (g/cm^3)	湿潤密度 (g/cm^3)	含水比 (%)	飽和度 (%)	間隙比
豊浦標準砂	2.64	1.64	5.0	18.1	0.77

に達した時点で、回転アームは定速回転に移行し、その状態で爆破実験を行う。爆破は、計測室内よりスリップ・リングを介した電気信号によって実施する。試験土槽は、深さ35cm、内径47cmのアルミ合金製の円筒形容器であり、容器内壁には、1cmのポリウレタンを張りつけ、壁面での応力波の反射の影響を低減させた。試験土槽には、豊浦標準砂を側面天端まで充填した。充填の際の締め固め方法は、深さ5cm毎に60回の打撃(円周4箇所 $\times$ 15回)により実施した。なお、作製された砂地盤の湿潤密度は、全試験を通じてほとんど差はなく、同一条件で試験を行うことができた。

また、試験土槽内には、所定の深さに地下構造物を埋設し、実験は遠心加速度を付加することで構造物に作用する土圧を実物と同じ応力レベルにして行っている。このとき火薬は、砂に半分埋まった状態で爆破させている。図-2に本実験に用いた試験土槽を示す。

3. 3 各種材料特性

(1) 火薬の材料特性

火工品は、ペンスリット(PETN)とアジ化鉛($\text{Pb}(\text{N}_3)_2$)の重量比5:1で配合した火薬を使用した。形状は、爆破により生じる爆発荷重の伝播が均一となるように球状に設計した。表-2に火薬の材料特性を示す。

(2) 構造物の材料特性

本実験で用いた構造物模型は、アルミニウム合金(A5052)製のものである。材料特性を表-3に示す。

(3) 豊浦標準砂の材料特性

本実験に用いた土質体は、比較的に材料定数が明瞭で

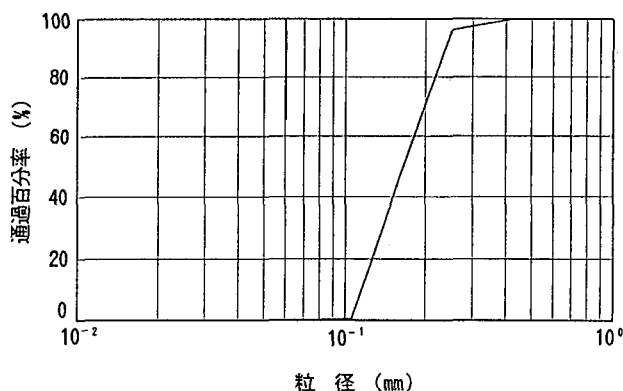


図-3 粒径加積曲線

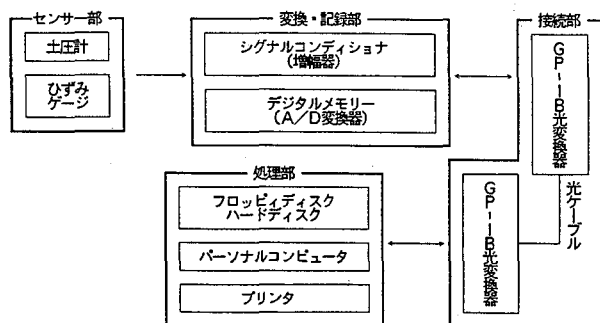


図-4 計測方法のフローチャート

ある気乾燥させた状態の豊浦標準砂である。主な物性値を表-4に、粒径加積曲線を図-3に示す。

3.4 計測方法

本実験の計測方法のフローチャートを図-4に示す。一連の計測フローは、その機能によって大きく4段階に区分でき、それぞれセンサー部、変換・記録部、接続部及び処理部である。

センサー部は、構造物模型に取り付けた土圧計、ひずみゲージのセンサーである。各センサーは、爆破によって砂を介して構造物に伝達される応力（以後、爆土圧と呼ぶ）と構造物に生じたひずみを測定する。土圧計は、点圧力の測定を行うため小型の圧力センサー（共和製PS-50KAM）で、直径6mm、厚さ2mmの円形板であり、受圧面の裏側にひずみゲージが接着されているひずみゲージ型の圧力センサーである。本土圧計の許容力は4.9MPaで、爆破による衝撃的な荷重にも対応できるものを使用した。ひずみゲージは、グリッド長2mm、抵抗120Ωでひずみゲージの表面を特殊な樹脂で覆い耐水構造としたもので、構造物内に水浸しても対応できるものを使用した。

変換・記録部は、各センサーからの出力をシグナル・コンディショナ（応答周波数範囲がDC～100kHz）で増幅し、この電気信号をA/D変換した後、デジタルメモリーに格納することができる。この変換・記録部は、アンプとデジタルメモリーが一体となって、本体の回転アーム

上に固定されている。アームの回転中は付属のバッテリーを電源として、アームとともに回転し、爆破による各信号は、一旦記録部に蓄積される。

接続部は、GP-IB 光変換器と光ケーブルから成っており、変換・記録部と後述する処理部とを接続するものである。デジタルメモリーの出入力部とパーソナルコンピュータとの出入力部にGP-IB 光変換器を取り付け、その間を光ケーブルで接続した構造である。GP-IB 光変換器は実験前に取り付け、アンプの設定等を行った後に取り外し、実験終了後装置が停止してから、再び取り付けデータ処理を行う。

処理部は、パーソナルコンピュータ及びプリンターで構成される。ここでは、光ケーブルを介してピット内に設置されているアンプの設定、及びデジタルメモリーから送られてきた信号を処理し、プリンターに出力するとともに、データをディスクに保存することができる。

3.5 実験ケース

本実験ケースを表-5に示す。遠心載荷装置を用いた模型実験で模擬する実際の爆破現象は、火薬量がTNT換算で550kg、構造物の埋設深さが4mのものとした。構造物は、火薬の爆破によって伝達される荷重、及び構造物の応答特性を明らかにする目的のため、比較的検討を行いやすい中空円筒形のものを想定した。構造物の実物大の寸法は、半径5m、高さ4m、上下の板厚20cmを仮定した。

本実験で用いた火薬及び構造物の縮尺は、火薬玉の製作上の縮尺限界と本装置に搭載可能な模型寸法の制約を考慮して、実験可能な範囲である1/100、1/60、1/40の3種類とした。実験ケース1～3、5～7、8～11は、火薬と構造物の形状寸法及び構造物の埋設深さをそれぞれ縮尺1/100、1/60、1/40で、遠心加速度100、60、40Gを試験土槽内に付加して行った実験である。これは、表-1に示した相似則が成り立つか否かを調べるために行ったものである。ケース4は、1G場で行った実験が、同縮尺(1/100)で100G場のケース1～3の結果とどのように挙動が異なるのか比較するために行った実験である。

図-5は、100、60、40Gの遠心式爆破実験に用いた構造物（小型、中型、大型）の形状寸法及びセンサー位置を示している。センサーは、中心及び構造物の内径の1/4の箇所の上板表側に土圧計（P1、P2）を、上板裏側の半径方向にひずみゲージ（G1、G2）を貼付している。

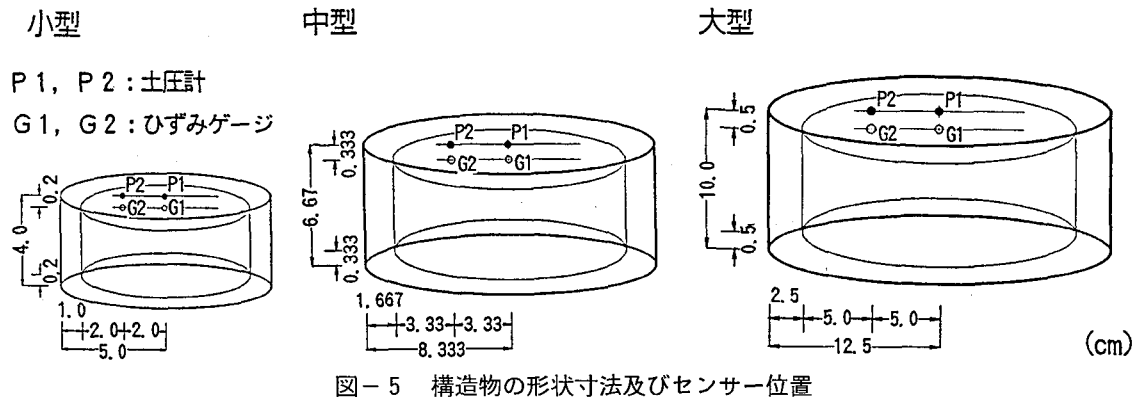
4. 実験結果

4.1 クレータ形状について

本節では、火薬の爆破によって砂表面に生成されたクレータ形状に注目して、クレータ半径、深さ、容積に関する相似則の検討を行った。また、爆破位置近傍の砂の挙動は、遠心加速度による拘束圧や爆破による締め固まり等、位置や時間による伝播速度の変化が生じているも

表－5 実験ケース

実験ケース	遠心加速度	火 薬	構造物	埋設深さ
1	100 G	0.360g (直径0.72cm)	小 型	4.0 cm
2	100 G	0.360g (直径0.72cm)	小 型	4.0 cm
3	100 G	0.360g (直径0.72cm)	小 型	4.0 cm
4	1 G	0.360g (直径0.72cm)	小 型	4.0 cm
5	60 G	1.667g (直径1.20cm)	中 型	6.7 cm
6	60 G	1.667g (直径1.20cm)	中 型	6.7 cm
7	60 G	1.667g (直径1.20cm)	中 型	6.7 cm
8	40 G	5.625g (直径1.80cm)	大 型	10.0 cm
9	40 G	5.625g (直径1.80cm)	大 型	10.0 cm
1 0	40 G	5.625g (直径1.80cm)	大 型	10.0 cm
1 1	40 G	5.625g (直径1.80cm)	大 型	10.0 cm



図－5 構造物の形状寸法及びセンサー位置

表－6 クレータ形状及び応力波の伝播速度に関する実験結果一覧

実験ケース	G	クレータ半径		クレータ深さ		クレータ容積		埋設深さ (cm)	伝播時間 (msec)	速度 1 (m/s)	速度 2 (m/s)
		m (cm)	p (cm)	m (cm)	p (cm)	m (cm ³)	p (m ³)				
1	100	3.60	360.0	0.93	93.0	22.94	22.94	4.0	0.064	625.0	479.7
2	100	3.55	355.0	1.05	105.0	17.85	17.85	4.0	0.058	689.7	508.6
3	100	3.60	360.0	1.00	100.0	17.87	17.87	4.0	0.056	714.3	535.7
4	1	6.25		2.45		142.2		4.0	0.067	597.0	231.3
5	60	6.40	384.0	1.60	96.0	83.8	18.10	6.7	0.099	673.4	511.8
6	60	6.40	384.0	1.55	93.0	108.7	23.48	6.7	0.106	629.0	482.7
7	60	6.25	375.0	1.75	105.0	105.0	22.68	6.7	0.102	653.6	482.1
8	40	9.90	396.0	2.25	90.0	443.7	28.52	10.0	0.150	666.7	493.3
9	40	9.10	364.0	2.60	104.0	359.4	23.00	10.0	0.144	694.4	513.9
1 0	40	10.5	420.0	2.60	104.0	498.4	31.90	10.0	0.160	625.0	462.5
1 1	40	10.2	408.0	2.50	100.0	437.8	28.02	10.0	0.154	649.4	488.3

のと考えられる。本実験では、爆破時刻と構造物中央に貼付した圧力センサーの立ち上がりとの時間差を用いて、この間一定速度で伝播するものと仮定し、波動伝播速度を求め、各種実験ケースについて検討を行った。

表－6 は、実験ケース1～11のクレータ半径、深さ、容積及び砂中を伝播する衝撃波速度を一覧にして示したものである。半径については、クレータ中心から、深さが爆破前の砂表面と再び等しくなる地点までの距離とし、堆積部分は考慮しないものと定義する。実験後のクレータ形状は、すべての実験ケースで、爆破地点を中心に軸

対称なおわん型の形状を示していた。実際には、その形状は、爆破によって飛散した砂の埋め戻しによる影響から、最大時のクレータの大きさではないものと考えられるが、ここでは実験終了後のクレータ形状について整理を行い、検討を試みることにした。クレータ形状の計測は、実験終了後にレーザ式変位センサー（KEYENCE LB-01）を用いて、クレータ直径方向にセンサーを水平移動させ、逐一各点の深さを測定することにより行った。表中のm は、模型実験における寸法を、p は100、60、40 Gで行った実験結果を100、60、40倍に、表－1で示し

た相似則に基づき実物換算した値で示している。ここで実物換算とは、1G場の実物実験で得られるであろう推定値を求めることを言う。また、表中に示す速度1は、砂表面から構造物までの埋設深さを伝播距離として算出したもので、速度2は、爆破による砂の飛散を考慮して、埋設深さからクレータの深さを差し引いた距離と仮定して算出したものである。

まず、実験ケース1～3と4の比較を行い、同縮尺(1/100)で100G場と1G場における実験結果の挙動の相違について検討してみる。表-6から、クレータ半径、深さ、容積については、ケース1～3では、ほぼ同程度の形状を示していることがわかる。しかしながら、ケース4の1G場の場合は、他のケースとは異なり、大きなクレータが形成されている。これは、遠心加速度を付加することにより、試験土槽内の初期応力分布が、1G場とは明らかに異なることを意味している。つまり、強い応力依存性を示す土質体を用いて、実物大と同様の1G場で模型実験を行う場合は、爆破現象のような大ひずみ領域まで含む破壊問題では、直接実物大の応答を推定することは困難であると考えられる。伝播速度については、クレータ深さを考慮しない場合は、ケース1～3の結果よりも多少小さいが、ほぼ同程度の値を示している。クレータの深さを考慮した場合は、約1/2程度である。速度については、100G場と1G場で砂中の初期応力分布が異なること及びクレータの飛散の程度が異なること等の影響から、本実験データの範囲からは評価が難しい。

次に、実験ケース1～3、5～7、8～11の結果に関して比較を行い、表-1に示した相似則の適用性について検討を行った。クレータ形状については、各遠心力場の実験結果を実物換算することで比較検討する。半径についてみると、遠心加速度が小さいほどクレータ半径が増加している傾向にあることがわかる。最大を示すケース11の値に対する最小を示すケース2の割合は、約85%である。これは、砂粒子の寸法がすでに相似則を満足していない等の理由が考えられるが明らかではない。深さについては、遠心力場に依存せず、同程度の値を示していることがわかる。容積については、クレータの半径による相違が大きく影響し、遠心加速度が小さいほど実物推定値は大きな値を示している。図-6は、クレータ容積の各遠心力場で比較した場合の平均値に近い実験ケース3、7、12に注目したクレータ形状の比較図である。図からも深さは、ほぼ同様の大きさであることがわかる。半径も上述したように、小さな遠心力場ほど幅が広く示されている。しかし、クレータ外縁部に注目してみると、クレータ半径とは反対に、大きな遠心力場ほど飛散により堆積した砂量は高く、また堆積範囲も広く示されている。伝播速度については、いずれの実験ケースもクレータ深さを考慮しない場合で650m/s程度、考慮した場合で500m/s程度と概ね同様の値を示している。このことから、本実験の範囲内(100, 60, 40G場で行った遠心

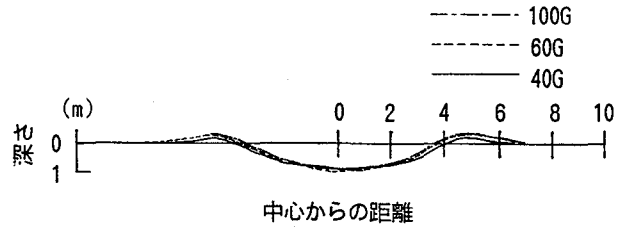


図-6 クレータ形状の比較

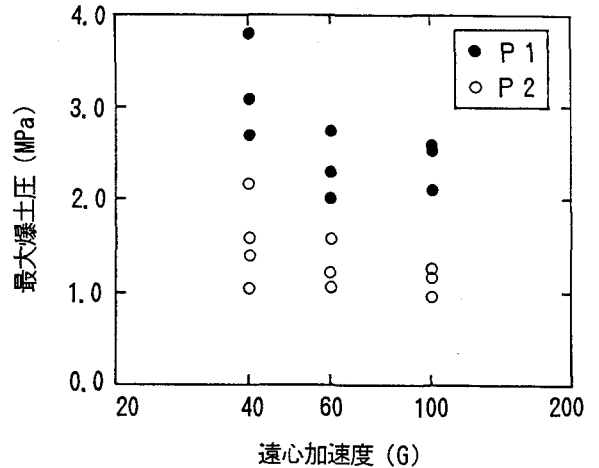


図-7 遠心加速度と最大爆土圧の関係

模型実験)からは、N 倍の遠心力場で1/N 倍に縮尺した距離の平均速度は、ほぼ一定であるものと考えられる。

4. 2 爆土圧について

本節では、火薬の爆破によって構造物に作用する爆土圧について本相似則の適用性に関する検討を行った。図-7は、実験ケース1～3、5～7、8～11のP1、P2における遠心加速度と最大爆土圧の関係を示したものである。ここで最大爆土圧は、第1波目の最大値に注目している。その理由は、反射波の影響等によって生じるとされる第2ピーク値よりも、媒質中を初めて通過してくる第1波目によって生じる第1ピーク値の方が重要であると考えられるからである。一方、最大値の信頼性については、計測時のサンプリングタイムが1 μ secであり、土中を伝播してくる爆土圧は十分精確に計測できていると考えている。まず、P1についてみると、同じ遠心力場で行った各実験結果にばらつきがみられる。全体としては、40Gにおける実験結果は、他に比して最大応答値が若干大きく示されている。なお、40GのP1の最大値は1ケース測定できなかったため、図には3点のみ示されている。P2についてみると、ここでも同じ条件の各実験結果でばらつきが生じている。また、小さな遠心力場で行った実験結果ほど、最大爆土圧は増大傾向にあるようである。このことは、4. 1で述べた爆破によるクレータの容積が、実物大に近い実験ほど大きく示されていたことに符合する。この原因としては、すでに相似

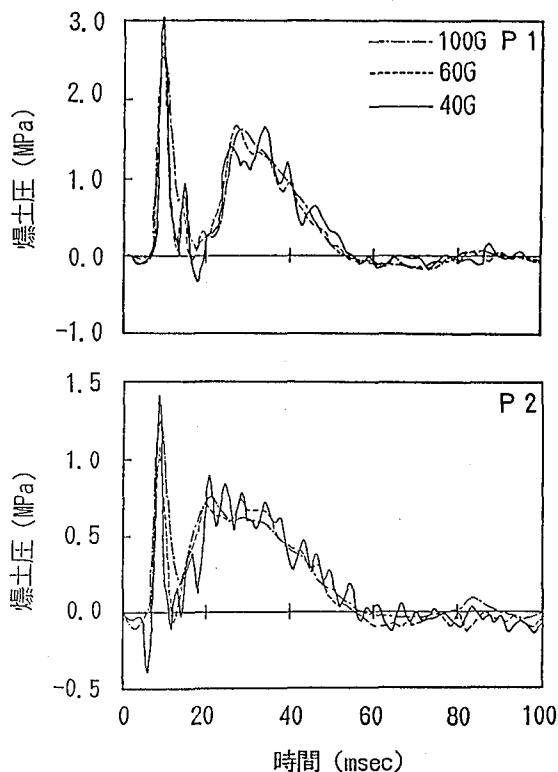


図-8 爆土圧波形の比較

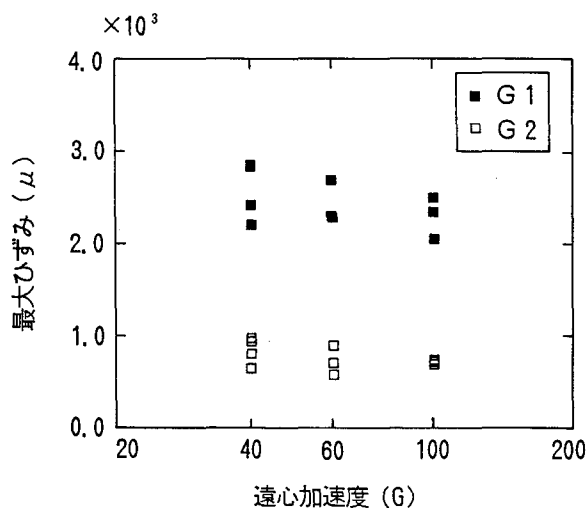


図-9 遠心加速度と最大ひずみの関係

則を満足していない砂の粒径の影響や実験で構造物に貼付した圧力センサーの相似性を考慮していない影響等考えられるが、現段階では明らかではない。

次に、図-7の同じ遠心力場で行った各実験のP1の結果のうち、それぞれ平均値に近い実験ケースに注目して、各遠心力場の爆土圧波形に関する比較検討を試みた。図-8は、P1及びP2における爆土圧の継続時間を示している。ここで示している波形は、表-1で示した相似則に基づいて、応答時間を実験で付加した遠心加速度倍することによって実物換算したものである。つまり、100、60、40Gの遠心実験で得られた応答波形は、時間をそれぞれ100、60、40倍にしている。図に示すように爆土圧波形は、P1、P2とも初期時間に急激に立ち上がり、最大応答値を示した後、一旦急激に荷重が除荷され、その後再び荷重が載荷状態に移行し、第2ピーク値に達したあと緩やかに除荷されている。これは、第1波目の主波動が、構造物によって反射されたことによる影響であるものと考えられる。第2波目のピーク値は、P1では第1波目のその1/2程度、P2では3/5程度の応答を示している。2波目の継続時間については、1波目のその4～5倍程度長く示されている。P1、P2のいずれの実験結果も全体的な分布形状は、波形の立ち上がりから減衰に至るまで概略一致しているものと思われる。

4.3 ひずみについて

本節では、衝撃的な荷重が作用した場合の構造物の挙動に関する相似則の適用性を確認するため、構造物の上

板裏面のひずみに注目して検討を行った。図-9は、実験ケース1～3、5～7、8～11のG1、G2における遠心加速度と最大ひずみの関係を示したものである。まずG1についてみると、爆土圧の場合と同様に、同じ遠心力場で行った各実験結果にばらつきがあり、小さい遠心力場ほど大きな応答を示す傾向にあることがわかる。G2については、ばらつきの程度は、G1と比べて小さく、各実験ケースではほぼ同程度の応答値を示している。ここでも、ひずみゲージは、各実験ケースで同様のものを使用しており、上記のような傾向が若干現れる原因の一つとして、センサーの縮尺の影響が考えられる。

次に、図-9の同遠心力場で行った各実験のG1の結果のうち、それぞれ平均値に近い実験ケースに注目して、各遠心力場のひずみ波形に関する比較検討を試みた。図-10は、G1及びG2におけるひずみの継続時間を実物換算して示している。まず、G1及びG2の実験結果のうち、40及び60Gの波形が、立ち上がり時点で比較的大きな負の値（圧縮）を示していることがわかる。また、40Gの場合、約5msecで正（引張）にも大きな値を示している。これら初期に生じる負の値及び正の値は、G1とG2を比較してほぼ同じ程度の値を示している。これは、爆破信号を送る際に、ひずみゲージあるいはリード線に同等の電氣的ノイズを生じたことが原因であることを本実験後の調査で確認している。このことから、より精確な実験データの収録を行うために、計測方法を見直す必要があることが明らかになった。なお、ノイズがひずみ波形に現れ、爆土圧波形に現れなかった理由は、ひずみゲージは2本の裸のリード線でブリッジボックスに接続されているのに対して、土圧計はセンサー内部にブリッジが形成されているためと考えられる。次に、時間的分布に注目してみると、G1においては、初期のノイズ部を除くと、最大応答値発生時刻は、各遠心力場でほぼ等しいと思われる。第1波目の継続時間については、100Gの場合で多少長く示され、その後の振動周期にずれがみられ

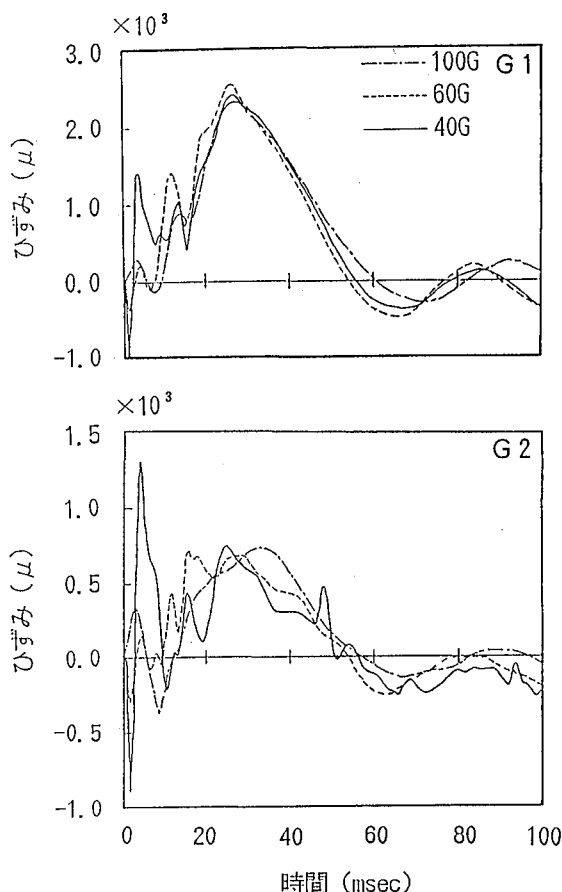


図-10 ひずみ波形の比較

る。G2では、各実験ケースで最大応答値の発生時刻がばらついており、分布も複雑な形状を示しているが、継続時間については、各Gでほぼ等しく示されている。以上のことから、ひずみの分布に関しても、細かい点の検討は、さらに実験的に明らかにしていく必要があるが、本実験範囲においては、表-1で示した相似則はほぼ成り立っているものと考えられる。

5. 結論

本研究では、実物大の砂中に埋設された構造物の応答特性を推定するために、遠心载荷装置を用いた模型実験を行った。模型実験は、豊浦標準砂を用いて、1/100、1/60、1/40の縮尺でそれぞれ100、60、40Gの遠心加速度を付加することにより行い、クレータ形状、構造物に作用する爆土圧として構造物のひずみについて、本相似則に基づき実物換算することで比較検討を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 1G場と100G場の模型実験におけるクレータ形状の比較から、初期の応力分布の相違により、砂の破壊の程度に大きな違いがあることがわかった。
- 2) 100、60、40G場の実験については、クレータ深さは、各遠心力場でほぼ同程度の応答を示していたが、半径は、実物の実験に近いほど大きく示されていた。

従って、容積も40、60、100G場で行った実験の順で大きく示されていた。

- 3) 爆破により、構造物に達する伝播速度は、各遠心加速度場ではほぼ等しい。
- 4) 構造物に作用する爆土圧は、同遠心力場の実験で各々最大応答値にばらつきがみられるが、全体的に実物に近い実験ほど大きな値を示している傾向にある。また、爆土圧波形については、立ち上がりから減衰に至るまで比較的分布形状は一致していた。
- 5) ひずみも、同遠心力場の実験で、最大応答値にばらつきがみられ、爆土圧の場合と同様に実物に近い実験ほど大きな値を示している傾向にある。ひずみ波形については、波形初期にノイズがみられ評価が困難であるが、G1については、最大応答値の発生時刻など分布形状は概略一致していた。

以上のことから、実物大の爆破現象の応答は、ある程度推定可能であり、本相似則の妥当性及び本実験法の有用性を、本実験の範囲内では示すことができた。今後は、構造物に作用する爆土圧及びひずみの分布、衝撃荷重の減衰の程度、センサーの縮尺の影響等、実物大の応答特性を推定するための本相似則及び本実験手法の適用性についてさらに詳しく研究を進めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 高田直俊、藤井斉昭：「講座」遠心模型実験5. 適用事例-圧密問題・安定問題-、土と基礎、Vol. 36, No. 4, pp. 79-84, 1988.
- 2) 望月秋利、日下部治：「講座」遠心模型実験6. 適用事例-安定問題：斜面と盛土-、土と基礎、Vol. 36, No. 5, pp. 71-76, 1988.
- 3) 日下部治、谷口栄一：「講座」遠心模型実験9. 適用事例-動的問題-、土と基礎、Vol. 36, No. 8, pp. 83-89, 1987.
- 4) Schmidt, R.M. and Holsapple, K.A.: Theory and Experiments on Centrifuge Cratering, Journal of Geophysical Research, Vol. 85, No. 2, pp. 234-252, Jan., 1980.
- 5) Kim, Y.S., Poa, H.P. and Ling, S.C.: Gravity Effects in Small-Scale Structural Modeling: analytical and Experimental Approach, Report No. ESL-TR-88-56, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall AFB, 1989.
- 6) 高田直俊、日下部治：「講座」遠心模型実験3. 原理、土と基礎、Vol. 35, No. 12, pp. 89-94, 1987.
- 7) 風間基樹、稲富隆昌：遠心载荷模型実験手法の振動実験への適用について、土木学会論文集No. 477/I-25, pp. 83-92, 1993.
- 8) 江守一郎、Schuring: 模型実験の理論と応用、技報堂出版、1977.

(1994年9月14日受付)