

遠心模型実験による砂中埋設構造物の衝撃応答に関する一考察

A STUDY ON THE IMPACT RESPONSE OF BURIED STRUCTURES
BY USING THE CENTRIFUGE TESTS

安藤智啓*, 山口 弘**, 鶴居正行***, 星川辰雄****, 藤本一男*****

Tomohiro ANDO, Hiroshi YAMAGUCHI, Masayuki UI, Tatsuo HOSHIKAWA and Kazuo FUJIMOTO

- * 工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺 2-9-54)
- ** 工博 防衛庁第4研究所 築城研究室長 (〒229 相模原市淵野辺 2-9-54)
- *** 工修 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺 2-9-54)
- **** 工博 防衛庁第4研究所 研究員 (〒229 相模原市淵野辺 2-9-54)
- ***** 工博 防衛庁第4研究所 所長 (〒229 相模原市淵野辺 2-9-54)

Full-scale tests are the best means to estimate the response of buried structures under impact loadings. However, such tests are actually impractical because they inevitably require prohibitive cost and time. Therefore, a small scale model test which can simulate physically the response of a prototype structure by using the centrifuge modeling is one of the effective techniques.

This paper is intended to investigate the application of the centrifugal simulation in order to estimate the impact response of buried prototype structure. First, the centrifuge tests of 1/100, 1/60 and 1/40 scale models were performed. And the responses which were transformed for prototype based on a scaling laws were compared, respectively. Secondly, a numerical simulation was performed by using the 3-dimensional finite element method. The numerical results were compared with the experimental results.

Key Words : centrifuge, scaling laws, impact response, numerical simulation

1. はじめに

近年、衝撃問題に関する研究は、各研究機関において活発に行われている。特に、土木の分野では、物体の衝突、打撃あるいは爆発等による衝撃力を受けた場合に、地盤との相互作用も含めて考慮しなければならない実構造物が多く存在する。これらの構造物の設計を行うためには、地盤中を伝播して構造物に作用する衝撃荷重及びそのときの構造物の衝撃応答特性の把握が必要不可欠である。本来ならば実物大の衝撃実験によりこれらを把握することが望ましいが、実験装置やコスト等の制約から困難である場合が多い。そこで、安価で簡便な模型実験により、実物大の現象が再現できれば、耐衝撃設計法を確立する上で、極めて得策な手法の一つとして考えられる。

しかしながら、一般に地盤の力学的特性は非線形であり、地盤の応力レベルに強く依存するため、地球の重力場における模型実験では、厳密には相似則は成立しない。従って、模型地盤中の応力を実物と同様にすることが可能な遠心載荷装置を用いた模型実験（以下、「遠心模型実験」という。）への期待が近年高まっている。これまでも本手法は、地盤の圧密問題、支持力問題や斜面の安定問

題等、主に土質工学の分野で実験的研究が進められ、その適用性に関する成果^{1),2)}が多数報告されてきた。動的問題に関しても、1980年代の遠心載荷装置用の振動台の開発により実験が実施されるようになってきた^{3),4)}。しかし、荷重の載荷時間の極めて短い衝撃問題への適用性に関する報告はあまり例を見ない^{5),6),7)}。

本研究では、まず遠心力場の衝撃問題に用いる相似則を理論的に誘導した後、遠心模型実験により、砂中に埋設した構造物の衝撃応答特性に着目して、実物大の現象を推定する場合に用いる本相似則の妥当性及び本実験法の適用性について検討した。検討は、同じ仮想の実物を異なる縮尺でモデル化し、各実験結果の実物換算値を比較することにより行った。次に、実爆現象を推定するための衝撃解析用有限要素法プログラム (JOH/DYNA3D) に、高圧・高速下の実験で得られた砂の圧力と体積ひずみの関係を導入し、実物大の数値シミュレーションを実施した。その数値シミュレーションの結果と遠心模型実験から推定した実構造物の応答特性とを比較し、本数値シミュレーションの有用性について検討するとともに、衝撃応答特性について考察を行った。

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
密 度 (α_w)	1	速 度 (α_x / α_t)	1
応 力 (α_T)	1	加 速 度 (α_x / α_t^2)	N
長 さ (α_x)	1/N	変 位 (α_u)	1/N
面 積 (α_x^2)	1/N ²	ひ ず み	1
体 積 (α_x^3)	1/N ³	力 ($\alpha_T \alpha_x^2$)	1/N ²
重力加速度 (α_g)	N	質 量 ($\alpha_w \alpha_x^3$)	1/N ³
時 間 (α_t)	1/N	工 料 ($\alpha_T \alpha_u^3$)	1/N ³

2. 遠心力場の相似則

ここでは、遠心力場の衝撃問題に用いる相似則^{4),5),8)}を理論的に誘導することを試みる。

まず、衝撃問題を取り扱うことから、相似則を求める支配方程式に、動的問題を解く場合の運動方程式を適用する。このとき、その運動方程式は次式のように与えられる⁹⁾。

$$\partial T / \partial x + w b = w \partial^2 u / \partial t^2 \quad (1)$$

ここに、 T は応力、 x は長さ、 w は密度、 b は重力加速度及び u は変位を表している。次に、模型の縮尺を α_x 、時間の縮尺を α_t とし、模型と実物の間に次式が成り立つとする。

$$\begin{aligned} x_m &= \alpha_x x_p \\ t_m &= \alpha_t t_p \end{aligned} \quad (2)$$

ここで添え字 m , p は、それぞれ模型 (model) と実物 (prototype) を表す suffix である。式 (2) 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、模型と実物に次のような関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} w_m(x_m, t_m) &= \alpha_w w_p(x_p, t_p) \\ T_m(x_m, t_m) &= \alpha_T T_p(x_p, t_p) \\ b_m(x_m, t_m) &= \alpha_b b_p(x_p, t_p) \\ u_m(x_m, t_m) &= \alpha_u u_p(x_p, t_p) \end{aligned} \quad (3)$$

また、速度、加速度及びエネルギーを v , a 及び e で表すと、式 (2) 及び (3) を用いて、次式の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} v_m(x_m, t_m) &= \alpha_v v_p(x_p, t_p) \\ &= \alpha_x / \alpha_t v_p(x_p, t_p) \\ a_m(x_m, t_m) &= \alpha_a a_p(x_p, t_p) \\ &= \alpha_x / \alpha_t^2 a_p(x_p, t_p) \\ e_m(x_m, t_m) &= \alpha_e e_p(x_p, t_p) \\ &= \alpha_T \alpha_u^3 e_p(x_p, t_p) \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、各係数 α_i は、スケールファクターと呼ばれるものである。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 (2) ~ (4) 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。すると式 (1) は、

$$\begin{aligned} (\alpha_x / \alpha_T) \partial T / \partial x + (1 / (\alpha_w \alpha_b)) w b \\ = (\alpha_t^2 / (\alpha_w \alpha_u)) w \partial^2 u / \partial t^2 \end{aligned} \quad (5)$$

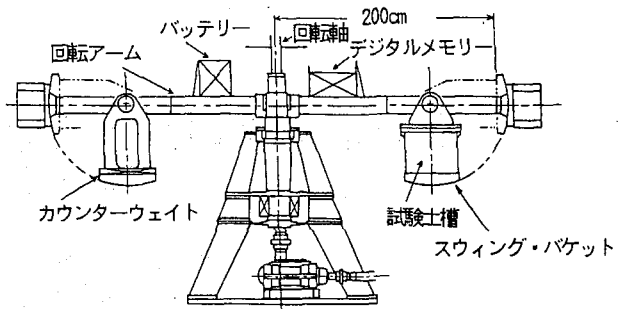


図-1 遠心载荷装置

表-2 実験ケース

実験ケース	遠心加速度	火 薬	構造物	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	60 G	1.667g, 直径1.20cm	中 型	6.67 cm
5	60 G	1.667g, 直径1.20cm	中 型	6.67 cm
6	40 G	5.625g, 直径1.80cm	大 型	10.0 cm
7	40 G	5.625g, 直径1.80cm	大 型	10.0 cm
8	40 G	5.625g, 直径1.80cm	大 型	10.0 cm

となる。式 (1) と同様の式が、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。

$$\begin{aligned} \alpha_x / \alpha_T &= 1 / (\alpha_w \alpha_b) \\ &= \alpha_t^2 / (\alpha_w \alpha_u) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで一般に、剛性や応力-ひずみ関係等を、実物と相似な材料を探し出すことや作り出すことは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味わざる得ない。従って、 $\alpha_w = 1$ 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、特に地盤の力学的特性が応力レベルに強く依存する材料であることから、応力の相似比 α_T を 1 とする必要がある。従って、式 (6) に、 $\alpha_w = \alpha_T = 1$ を代入することにより、

$$\alpha_x \alpha_b = 1 \quad (7)$$

が導かれる。式 (7) 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、 $\alpha_x = 1 / N$ 及び $\alpha_b = N$ とすることにより、 $\alpha_T = 1$ を成し得る。さらに式 (6) から、 $\alpha_u = 1 / N$, $\alpha_t = 1 / N$ が求められ、式 (4) からは、 $\alpha_v = 1$, $\alpha_a = N$, $\alpha_e = 1 / N^3$ が求められる。

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、質量及びエネルギーは $1 / N^3$ となる。応力、ひずみ及び速度は、模型と実物で等しくなる。

P1～P5：圧力計

G1～G7：ひずみゲージ

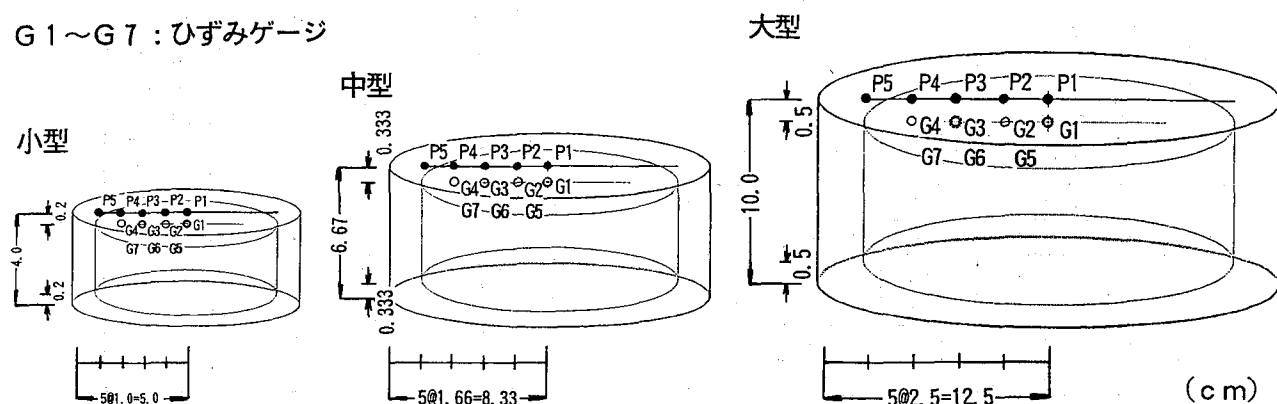


図-2 構造物の形状およびセンサー位置

3. 実験の概要

3.1 実験方法

本実験に用いた遠心载荷装置を図-1に示す。模型は、試験土槽（内径 47 cm、深さ 35 cm）内の所定の深さに構造物が埋設されること及び実験中に砂の密度変化が生じないように砂を密に充填することに留意して作製した。実験は、この試験土槽を回転アーム片側に設置し、電気モータにより所定の遠心加速度まで加速した後火薬の地表面爆破により衝撃力を作用させることにより行った。

3.2 実験ケース

本実験では、外径 10 m、内径 8 m、高さ 4 m、上下の板厚 20 cm の中空円筒形構造物を深さ 4 m に埋設し、この地表面で薬量 360 kg の火薬が爆発することを実物として想定した。実験ケースは、この実物に対する縮尺が 1/100、1/60 及び 1/40（遠心加速度は、100、60 及び 40 G を付加）の 3 通りに、それぞれ数回の実験データの収集を考慮した合計 8 ケースである。全実験ケースを表-2 に示す。

3.3 計測項目

本実験の計測項目は、爆破による砂の飛散部半径及び深さ、構造物上板表面の圧力及び裏面のひずみである。図-2 に、100、60 及び 40 G 場の遠心模型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す。圧力及びひずみは、図に示すように、中心から等間隔に配置した圧力計（P1～P5）及び中心から等間隔に貼付した半径方向及び円周方向のひずみゲージ（G1～G7）により測定した。なお、ひずみゲージの貼付方向の分類については、G2、G3 及び G4 は半径方向、G5、G6 及び G7 は円周方向（貼付位置は、G2、G3 及び G4 と同一箇所）である。また、G1 は中心である。

3.4 計測方法

本実験の計測方法システムは、センサー部、変換・記録部、接続部及び処理部によって構成されている。センサー部は、圧力計及びひずみゲージから成る。本圧力計

（固有振動数 90 kHz 及び応答周波数 23 kHz）は、ひずみゲージ型のものであり、その許容量は 9.8 MPa である。また大きさについては、相似則を満たす受圧面積の圧力計がなかったため、直径 6mm、厚さ 2mm の同一受圧面のものを用いた。ひずみゲージについては、相似性を考慮し、小型、中型及び大型の構造物に対しそれぞれグリッド長 2、3 及び 5 mm の 3 種類のものを使用した。

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～100 kHz）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。

接続部は、GP-IB 光変換器と光ケーブルから成り、変換・記録部と処理部とを接続するものである。また処理部は、パーソナルコンピュータ及びプリンタで構成される。

3.5 各種材料特性

実験に用いた火薬は、ペンスリッド（PETN）とアジ化鉛（ $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ）を重量比 5：1 で配合した球形で、それぞれ密度が 1.77 及び 2.50 g/cm³、単位体積当りの初期内部エネルギーが 1.01×10^4 及び 3.84×10^3 MPa·cm³/cm³、爆轟速度が 8.30×10^3 及び 3.58×10^3 m/sec である。

構造物に用いた材料は、アルミニウム合金製の A5052 であり、その引張強度は 250 MPa、0.2 % 耐力は 190 MPa、伸びは 12 %、弾性係数は 69.0 GPa である。

砂は、単位体積重量が 1.64 g/cm³、土粒子の比重が 2.64、均等係数が 1.56、曲率係数が 1.02、含水比が 0.2 %、間隙比が 0.61 及び相対密度 $D_r = 99.8$ % の豊浦標準砂を用いた。

4. 実験結果及び考察

4.1 飛散部形状について

表-3 は、各実験ケースの飛散部半径及び深さに関する結果を一覧にして示したものである。飛散部形状は、すべての実験ケースで爆破地点を中心に軸対称のおわん型

表-3 飛散部形状に関する実験結果一覧

実験ケース	遠心加速度 G	飛散部半径		飛散部深さ	
		m (cm)	p (cm)	m (cm)	p (cm)
1	100	3.90	390	1.35	135
2	100	3.60	360	1.25	125
3	100	3.70	370	1.25	125
4	60	6.40	384	1.80	108
5	60	5.75	345	1.90	114
6	40	9.50	380	2.80	112
7	40	8.50	340	2.60	104
8	40	8.70	348	2.60	104

を示していた。半径は、この飛散部中心から、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定義した。飛散部形状の計測は、レーザ式変位センサーを用いて行った。表中の m は模型実験で得られた値で、 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たのものである。ここではこの実物換算値により比較を行った。

まず、各遠心力場の飛散部半径の平均的値は、100, 60, 40 G 場の結果の順で多少大きく示されている。また深さについても同様な傾向がみられる。しかしながら、その差の割合は前者の場合で 4 % 程度、後者の場合で 15 % 程度であり、各遠心力場の実験結果は概ね一致しているものと思われる。このことから、飛散部形状に関しては、概ね本相似則が成立していることが認められる。

4.2 圧力について

(1) 最大圧力と遠心加速度

図-3 は、P1 ～ P5 における砂を伝播して構造物に作用する最大圧力と遠心加速度の関係を示したものである。なお、図中の圧力は、同じ遠心力場で行った実験結果の平均値で表している。図より、40 G 場における P1 及び P2 の実験結果が、他に比して最大応答値が若干小さく示されている。しかし、60 G 場と 100 G 場における P1 及び P2 の結果及び各遠心力場における P3 ～ P5 の結果については、概ね同程度の応答値を示している。このことから、最大圧力についても、概ね本相似則が成立していることが認められる。

(2) 圧力波形

図-3 の各遠心力場の P1 の結果のうち、それぞれ平均値に近い実験ケース 1, 4 及び 6 に注目して、各遠心力場の圧力波形について比較した。図-4 は、100, 60, 40 G 場の遠心模型実験で得られた応答波形の時間を、それぞれ 100, 60, 40 倍に実物換算して示したものである。また波形は、火薬の爆破から 60 msec までの時間で示している。図に示すように、P1 ～ P3 では、载荷時間が数 msec でピーク値の大きな第 1 波と载荷時間が数十 msec でピーク値の小さい第 2 波が示されている。これは、第 1 波では、急激な荷重が短時間に作用したため、構造物の応答は慣性抵抗が卓越し、第 2 波では、時間の経過に伴って構造物の全体的な変形が示されたことによるもの

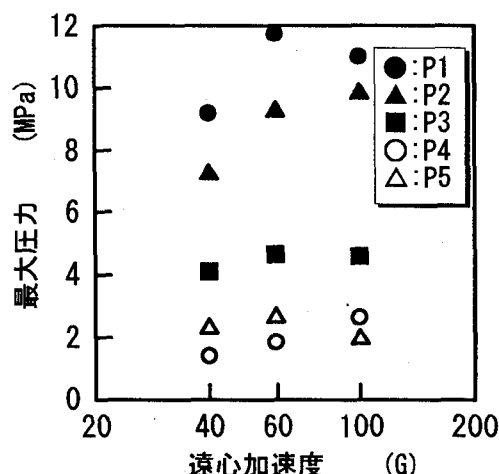


図-3 最大圧力と遠心加速度の関係

と考えられる。ここでも、P1 ～ P5 の圧力波形は、波形の立ち上がりから減衰に至るまで各遠心力場で概ね一致している。

(3) 圧力分布

図-5 は、実験ケース 1, 4 及び 6 から得られた各遠心力場の圧力分布を示したものである。図の中心からの距離及び時間は、本相似則に基づき実物換算して示している。またここでは、各遠心力場の P1 の立ち上がり時刻を 0 msec として 45 msec までの時間で整理している。図より、圧力の立ち上がりの応答が各遠心力場の結果で若干異なっているため、最大圧力を示す時刻に多少の違いが認められる。これは、時間の相似則が模型は実物の 1 / N となるにもかかわらず、同一の圧力計（応答周波数 23 kHz）を各遠心力場の実験で使用しているため、立ち上がり部において、実験結果の応答にその影響が及んだものと考えられる。しかしながら、時間の経過とともに構造物に作用する圧力が、中心部から端部へ移行していく様子や圧力の減衰の程度については良く一致していることが認められる。また、いずれの実験結果も約 45 msec で構造物に作用する圧力が零となっていることがわかる。すなわち、圧力分布からも、立ち上がりの応答を除くと各遠心力場の応答は減衰に至るまで良く一致している。

4.3 ひずみについて

(1) 最大ひずみと遠心加速度

図-6 は、構造物の上板裏面の半径方向に貼付した G1 ～ G4 における最大ひずみと遠心加速度の関係を示したものである。ここでも各ひずみは、同じ遠心力場で行った実験の平均値で示している。図より、100 G 場における実験結果が、他に比して大きく示されているものの、各遠心力場における最大ひずみは概ね同程度の応答を示している。このことから、最大ひずみに関する相似則もほぼ成立しているものと考えられる。なお、100 G 場の結果が若干大きく示される傾向は、前節の飛散部形状の傾向と符号した結果となっている。しかしながら、前節の圧力の検討では、60 G 場の結果が若干大きく示されその傾向が異なっており、統一性が見られない。これは、単

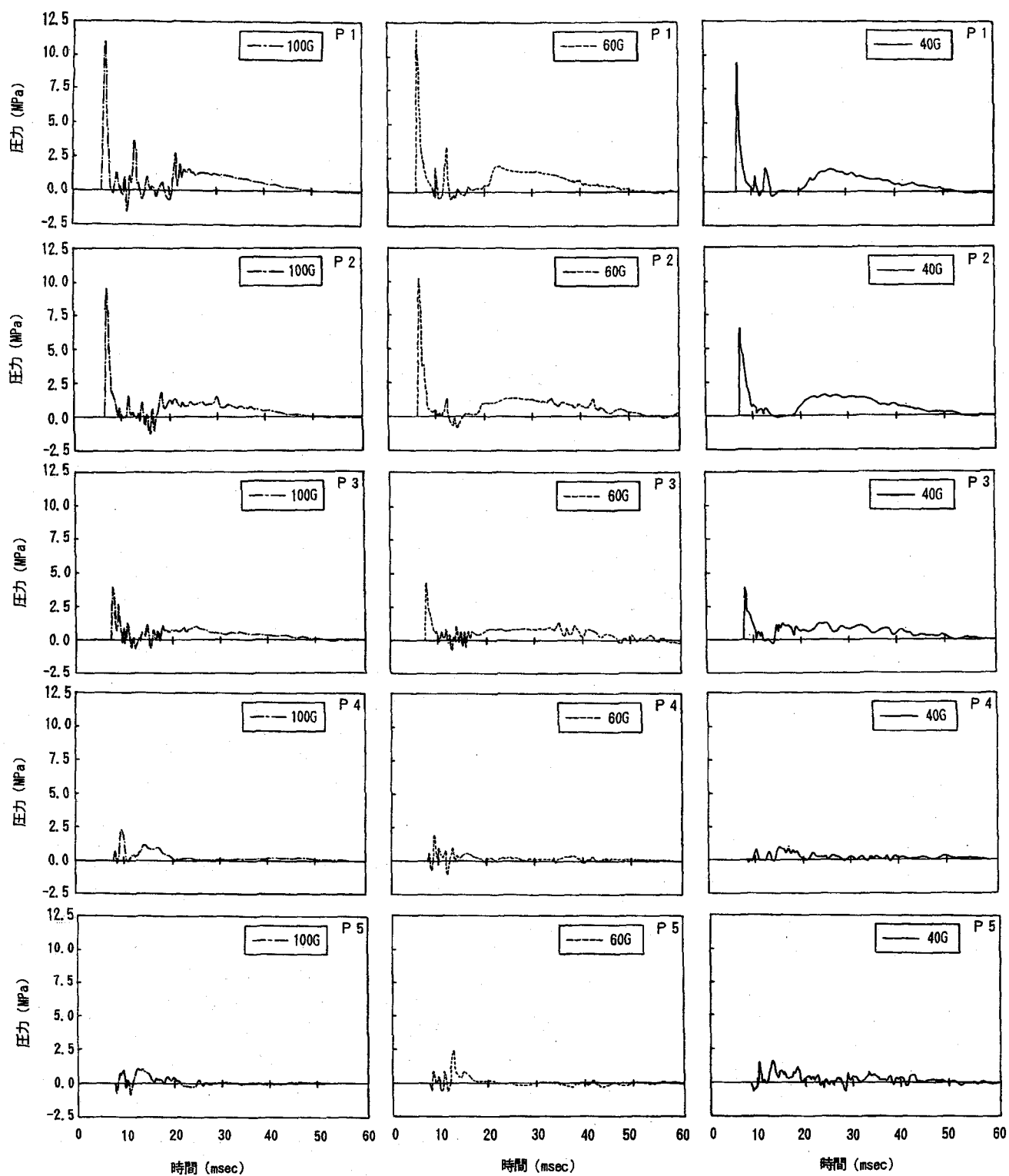


图-4 压力波形

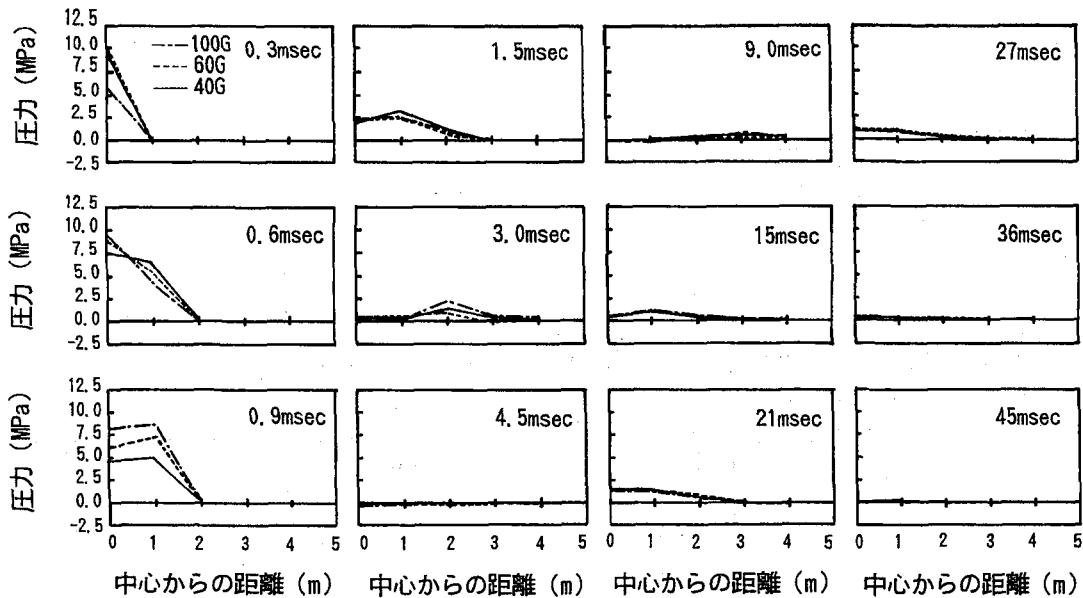


図-5 圧力分布

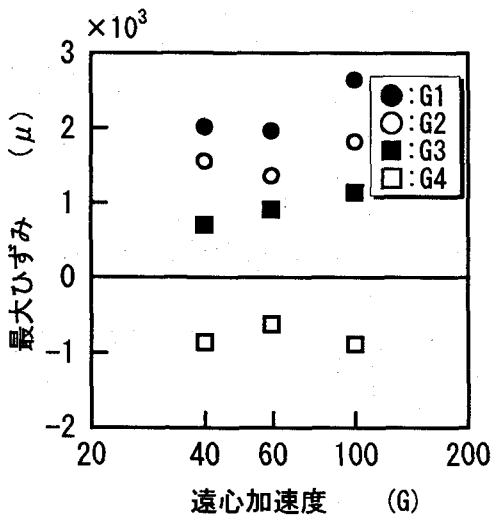


図-6 最大ひずみと遠心加速度の関係

なる実験誤差とも考えられるが、この点に関する検討を実施するためには、今後実験データの蓄積が必要である。

(2) ひずみ波形

圧力の場合と同様に、実験ケース 1, 4 及び 6 に注目して、各遠心力場のひずみ波形について比較した。図-7 は、各遠心力場の実験結果で得られた応答波形の時間を実物換算して示したものである。また波形は、爆破開始から 100 msec までの時間で示している。まず、G1 ~ G7 の各遠心力場の波形が、立ち上がり時点で正の値（引張）及び負の値（圧縮）を示しているが、これらの値は、外部トリガーとして使用する爆破信号を、ひずみゲージあるいはリード線が拾うことにより生じたノイズによるものであることを前もって確認している。これら初期時間に発生するノイズ部を除けば、G1 ~ G7 の各遠心力場の最大応答値、最大応答値発生時刻及び継続時間は、ほぼ一致していると思われる。

(3) ひずみ分布

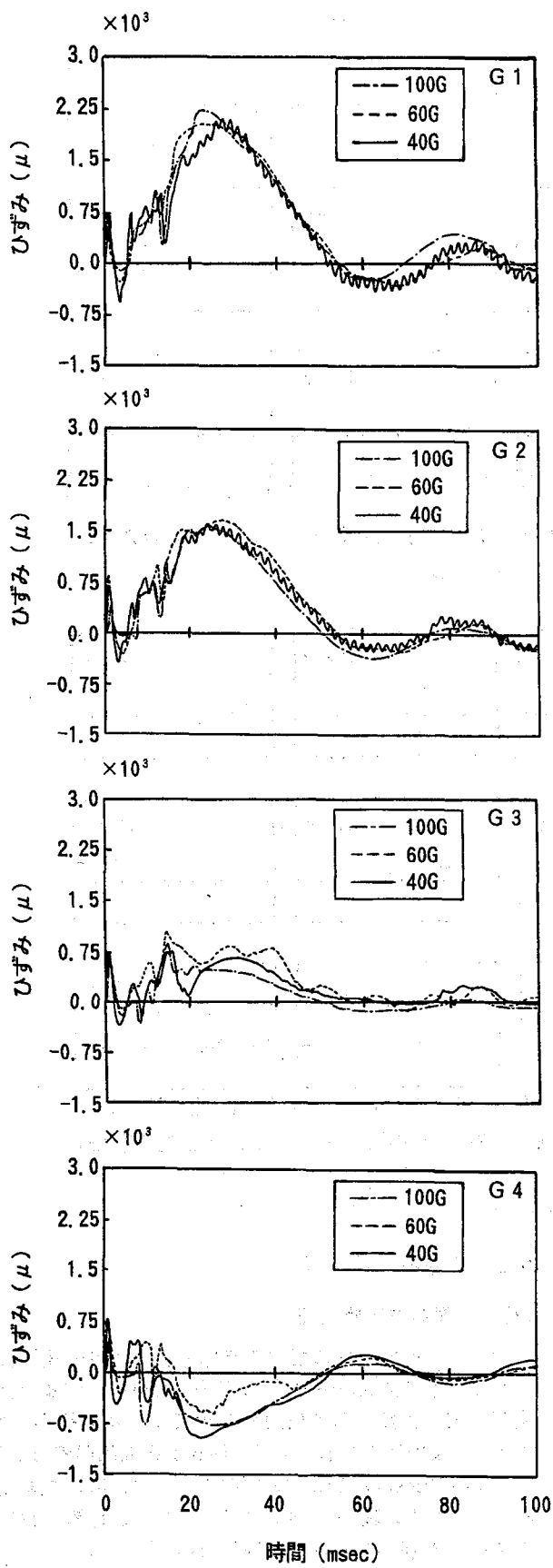
図-8 は、実験ケース 1, 4 及び 6 から得られた各遠心力場の半径方向及び円周方向のひずみ分布を実物換算して示したものである。図の中心からの距離及び時間は、本相似則に基づき実物換算して示している。またここでは、各遠心力場の G1 の立ち上がり時刻を 0 msec として 75 msec までの時間で整理している。図より、立ち上がりから約 20 msec で各遠心力場の結果とも G1 ~ G7 で最大ひずみを示している。20 msec 以降は、ひずみは徐々に減衰し、55 msec で異符号の応答を示していることがわかる。75 msec では、再び引張と圧縮の応答が逆転している。これらひずみ分布からも、各遠心力場で立ち上がりから減衰に至るまで同様な波形を示していることが認められる。

以上、飛散部形状、圧力及びひずみの結果から、本相似則の妥当性が認められ、本実験手法が実物大の構造物の衝撃応答を推定する場合に十分適用可能であることが認められた。なお、境界条件の影響については、試験土槽の大きさを変化させた同一遠心力場の実験を実施していないため、その影響度は明らかではない。しかしながら、各遠心力場の実物換算値は概ね一致していることから、本実験の範囲内では境界条件の影響は少ないものと考えられる。

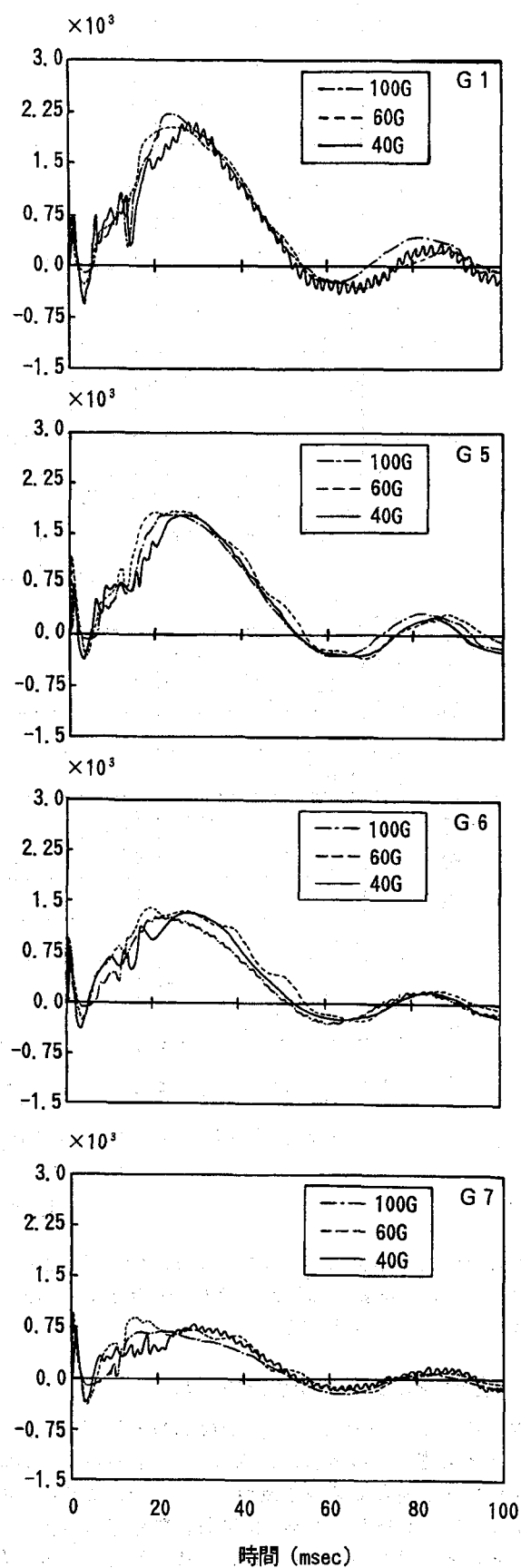
5. 数値シミュレーションの概要

本数値シミュレーションは、衝撃解析用有限要素法プログラム（JOH / DYNA3D¹⁰⁾）を用いて実施した。

本研究では、プログラム中の砂の材料モデルに、既存の高圧・高速下の実験で得られた砂の圧力と体積ひずみの関係を導入することにより、実物現象の数値シミュレーションを試みた。その数値シミュレーション結果を、遠心模型実験結果から推定した実物換算値と比較することによって、本数値シミュレーションモデルや材料物性モデ



(a) 半径方向 (G1 ~ G4)



(b) 円周方向 (G1, G5 ~ G7)

図-7 ひずみ波形

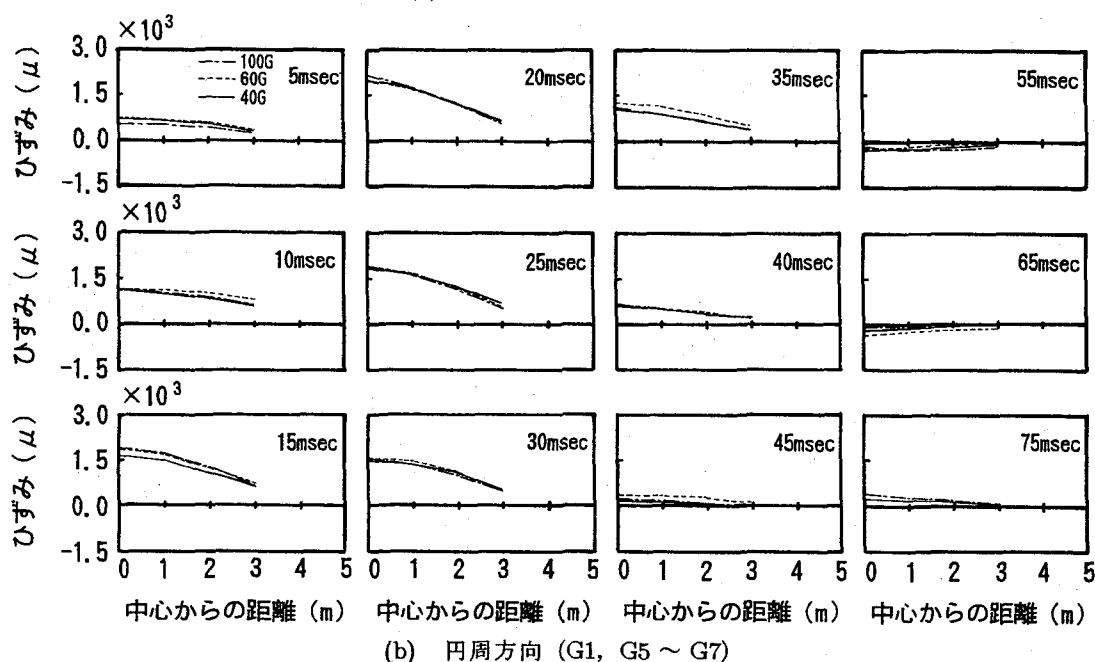
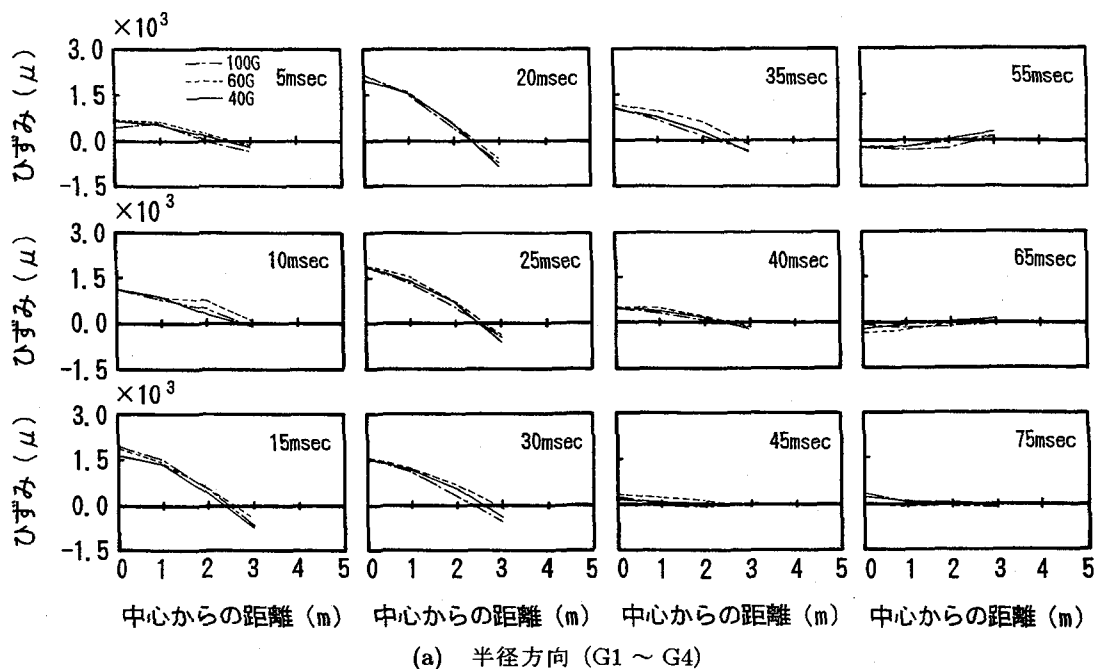


図-8 ひずみ分布

ルの妥当性及び本数値シミュレーションの有用性を検討した。さらに、実験では計測できなかった土中の応力分布特性について考察を試みた。

5.1 数値シミュレーションモデル

本数値シミュレーションは、40 G の遠心模型実験に用いた試験土槽を、本相似則に基づき 40 倍の長さに実物換算した有限要素モデルを使用して行った。モデル化の範囲は、試験土槽内の火薬、構造物、豊浦標準砂及びポリウレタンまでとした。解析は、土槽の軸対称性を考慮して、図-9 に示すように、四半分モデルのみを対象として行った。全節点数及び全要素数は、3757 及び 2652 である。また、深さ方向には自重力を考慮し、火薬は、この自重力が平衡状態に達した後爆破させることとした。

5.2 各種材料物性値

(1) 火薬の材料物性値

火薬は、火薬内を伝播する反応速度（爆轟速度）及び火薬の反応完結点の圧力（CJ 圧力）を爆破時間及び反応濃度を表す係数として使用する火薬モデルを採用した。また、要素内に生じる圧力は、係数が比較的明瞭な JWL（Jones・Wiekins・Lee）の状態方程式¹¹⁾を用いて算出することにした。表-4 にペンスリッドとアジ化鉛の材料物性値を、式 (8) に JWL の状態方程式を示す。

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{w Q}{V} \quad (8)$$

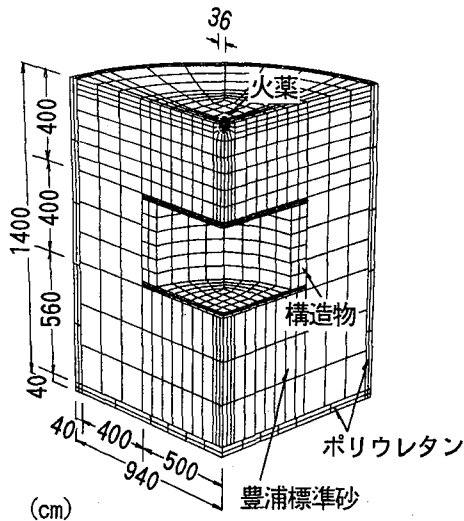


図-9 解析モデル

ここで、 P は圧力、 A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 w は定数、 V は体積比（火薬の爆轟後の体積／初期体積）及び Q は爆発エネルギーを示す。これらの諸定数は、文献¹²⁾に基づいて表-5 に示すとおり与えた。

(2) 豊浦標準砂の材料物性値

豊浦標準砂は、圧力と体積ひずみの関係を任意に与えることが可能な土質モデル¹⁰⁾によりモデル化した。本モデルでは、要素内の圧力は、載荷時（圧縮時）の場合にはこの圧力と体積ひずみの関係に従い、除荷時（引張時）の場合には、除荷時の体積弾性係数に従い計算される。この除荷時の体積弾性係数の値については、実験データが得られていないため、実験結果と照合させることにより係数を同定した。表-6 に豊浦標準砂の材料物性値を示す。また、高圧・高速下の圧力 (P) と体積ひずみ (ϵ_v) の関係は、既存の実験結果¹³⁾を基に、次式で与えた。

$$P = 10 \epsilon_v + 58000 \epsilon_v^2 \quad (9)$$

また、降伏の判定は、偏差応力の第2不変量 J_2 が次式を満たした時降伏が生じたと判定される¹³⁾。

$$J_2 = 2.2P + 0.3P^2 \quad (10)$$

(3) 構造物およびポリウレタンの材料物性値

構造物及びポリウレタンの材料物性値は弾性体を採用することとし、材料パラメータは実験で用いたアルミニウム合金 (A5052) 及びポリウレタンの材料物性データに基づき、それぞれ表-7 及び表-8 のとおり与えた。

6. 数値シミュレーション結果と実験結果との比較

6.1 圧力波形について

図-10 は、P1 ～ P5 における数値シミュレーション結果と実験結果の圧力波形を示している。実験結果は、遠心模型実験で得られた波形を表-1 の相似則に基づき、時間を40倍に実物換算した波形を、火薬の爆破開始か

表-4 火薬の材料物性値

	密度 (g/cm ³)	C-J 圧力 (MPa)	爆轟速度 (m/sec)
PETN	1.77	3.35×10^4	8.30×10^3
Pb(N ₃) ₂	2.50	7.27×10^3	3.58×10^3

表-5 JWL の状態方程式中の諸定数

	初期爆発エネルギー Q_0 (MPa cm ³ /cm ³)	A (MPa)	B (MPa)	R_1	R_2	W
PETN	1.01×10^4	6.20×10^5	1.70×10^4	4.40	1.20	0.25
Pb(N ₃) ₂	3.84×10^3	6.53×10^5	6.51×10^3	6.40	1.50	0.20

表-6 豊浦標準砂の材料物性値

	湿潤密度 (g/cm ³)	せん断弾性係数 (MPa)	除荷時の体積弾性係数 (MPa)
豊浦標準砂	1.64	1.43×10	1.75×10^4

表-7 構造物の材料物性値

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
A5052	2.70	7.2×10^4	0.3

表-8 ポリウレタンの材料物性値

	密度 (g/cm ³)	弾性係数 (MPa)	ポアソン比
ポリウレタン	1.45×10^{-2}	0.7	0.1

ら60 msec までの時間で示している。図より、P1 ～ P3 においては、波形は急激に立ち上がり最大応答値を示した後、いったん急激に圧力が減少し（第1波）、その後、圧力が上昇し、第2ピーク値を示したあと緩やかに減少する（第2波）のに対し、P4、P5 は明瞭な第1波の存在が認められない。解析結果はこのような実験結果による波形を、全般的によくシミュレートしていると思われる。また、P1 ～ P5 とともに、圧力の継続時間もよくシミュレートしていることが認められる。

6.2 ひずみ波形について

図-11 は、G1 ～ G7 における数値シミュレーション結果と実験結果のひずみ波形を示している。ここでも実験結果は、実物換算した波形で示している。波形は、火薬の爆破開始から100 msec までの時間で示している。

図より、周期に関してはG1 ～ G7 において、解析結果は実験結果より若干長いものの、全般的な波形形状、

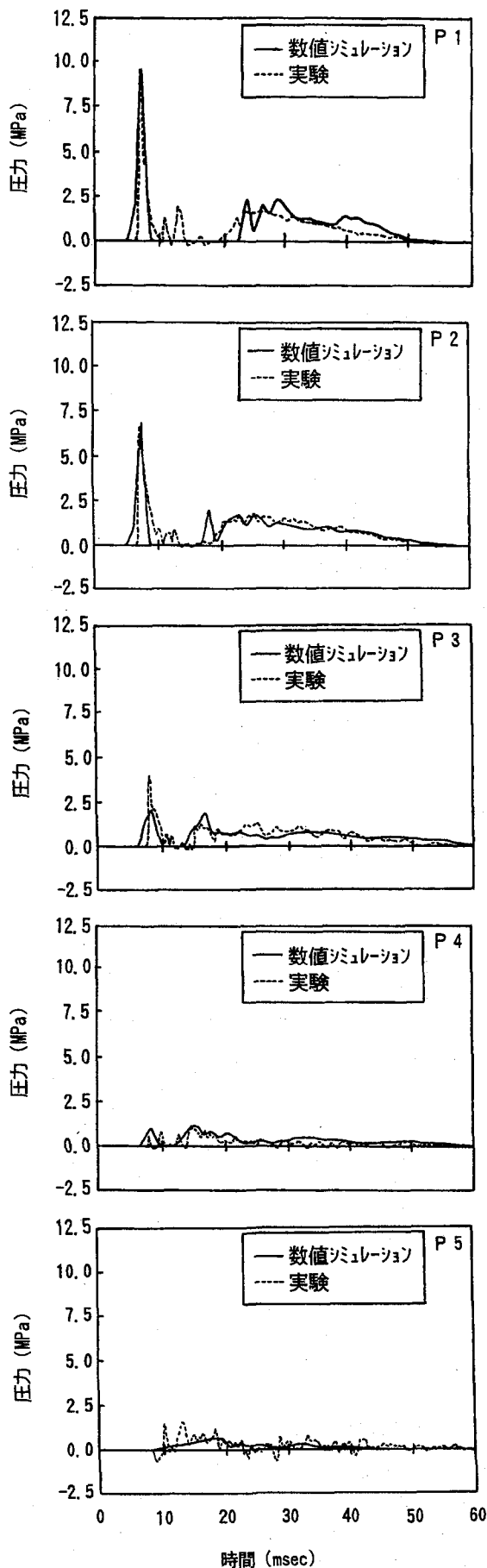


図-10 圧力波形の比較

特に最大応答発生時刻及び最大ひずみに達した以降の減衰傾向を良くシミュレートしていると考えられ、本解析法の妥当性が認められた。

なお、実験においてはノイズの影響により正確にデータを計測できなかった爆発直後の波形の立ち上がりについてみると、G3及びG4の数値シミュレーション結果では、ひずみが圧縮値を示していることがわかる。このことから、構造物の中心部近傍が局所的な曲げ変形を生じていることがわかる。

6.3 応力波の伝播性状について

図-12は、数値シミュレーションによる砂中応力分布の時間履歴を示したものである。図中の左上が爆破点を示している。ここでは、地表面から構造物上面4 mまでの深さ及び爆破点から構造物半径5 mまでの幅の砂部を取り上げて図化した。現象は、火薬の爆破から9 msecまでの時間で示している。また図には、砂の飛散状況も同時に示している。

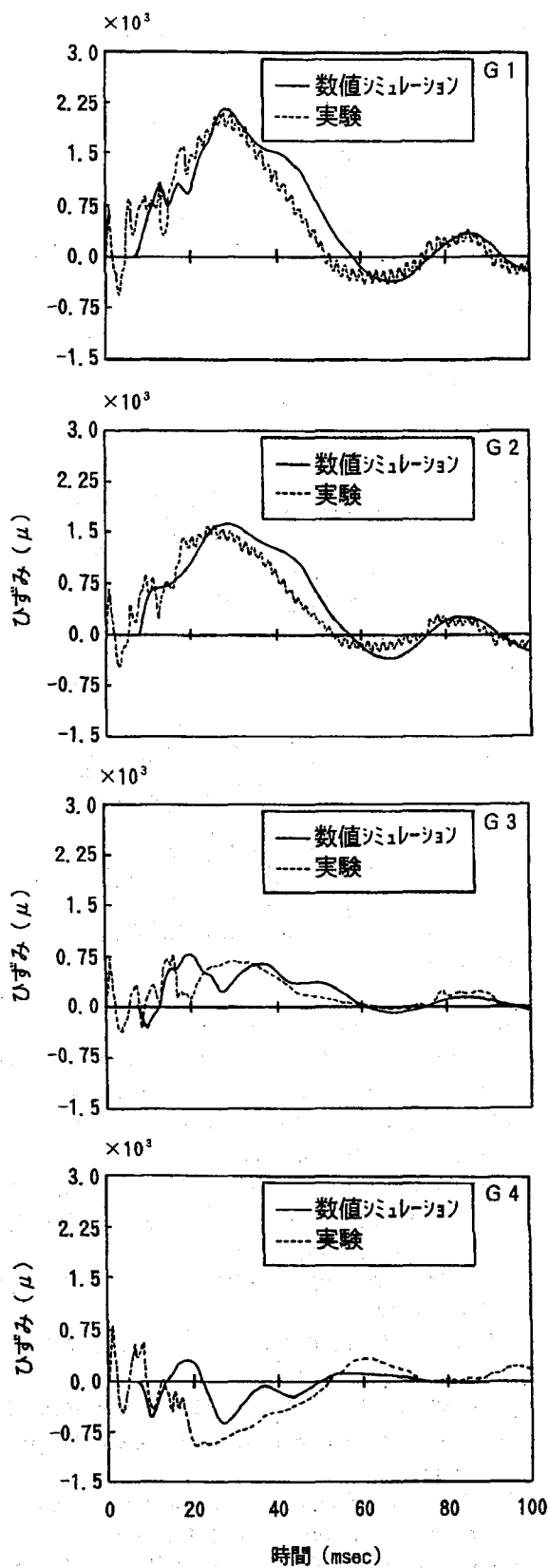
まず爆破後1 msecでは、爆破近傍部の砂の応力が200 MPa以上に達しているのがわかる。2 msecでは最大応力が80 MPaと1 msecの約半分まで減衰しており、減衰の影響が大きいことが認められる。その後時間の経過とともに、応力が砂中を伝播して構造物に到達し、同時に砂の飛散が拡大していく様子が示されている。6 msec程度において応力が構造物に到達し、そのときの最大応力は8 MPa程度まで達していることが認められる。その後、時間の経過とともに応力が減衰し、さらに構造物中心から端部に応力の分布が移行している様子がわかる。すなわち、実験では得られなかった砂中応力分布の時間履歴を、数値シミュレーションにより調べることができた。

7. 結論

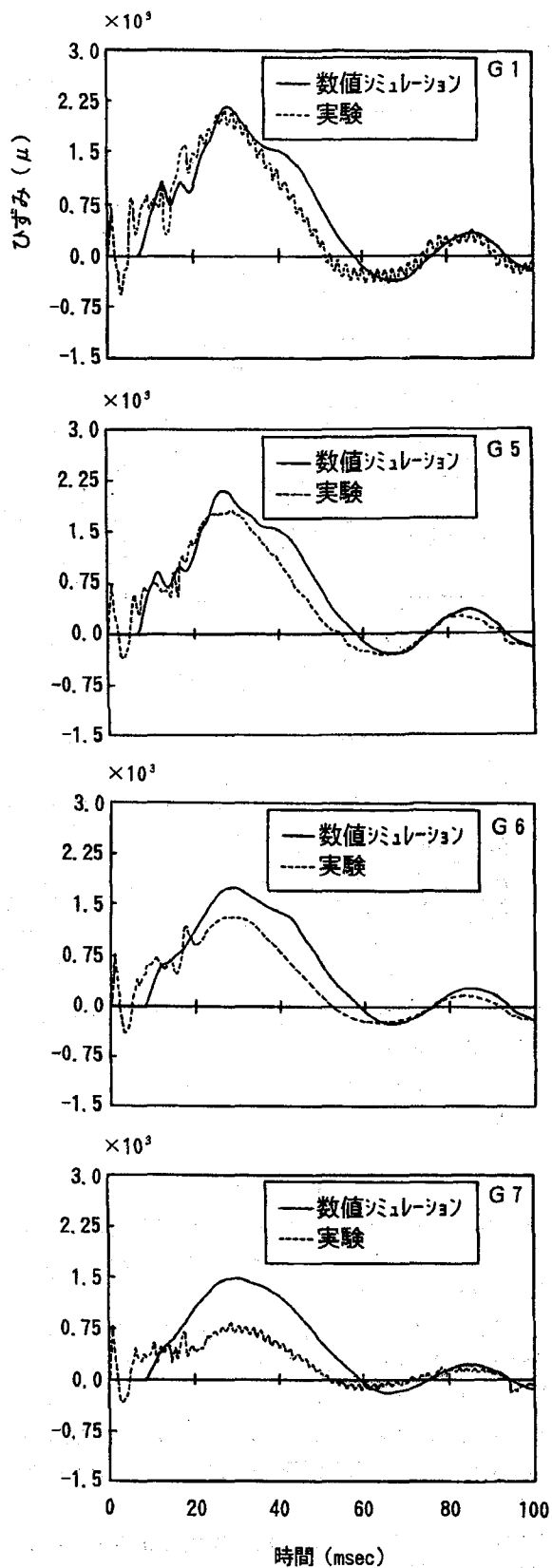
本研究では、遠心模型実験により砂中に埋設した構造物の衝撃応答特性に着目して、実物大の現象を推定する場合に用いる本相似則の妥当性及び遠心模型実験の適用性について検討した。また、砂の高压・高速下の圧力と体積ひずみの関係を考慮した実構造物の数値シミュレーション結果と遠心模型実験から推定した実構造物のそれを比較し、本数値シミュレーションの有用性について検討を行うとともに、衝撃応答特性について考察した。本研究により得られた結果をまとめると以下ようになる。

(1) 豊浦標準砂を用いて、40, 60, 100 Gの3ケースの遠心模型実験より得られた飛散部の形状、圧力及びひずみを実物換算して比較した結果、概ね一致することが認められた。このことから、実物大の構造物の衝撃応答は、本実験法より推定が可能であると考えられるとともに、本実験の範囲内では、本相似則の妥当性及び本実験法の適用性が認められた。

(2) 砂の高压・高速下の圧力と体積ひずみの関係を考慮した実構造物の数値シミュレーションは、豊浦標準砂の材料定数を同定することにより、十分有用性があることが明らかとなった。さらに、土中応力分布特性およびその時間履歴を明らかにすることができた。



(a) 半径方向 (G1 ~ G4)



(b) 円周方向 (G1, G5 ~ G7)

図-11 ひずみ波形の比較

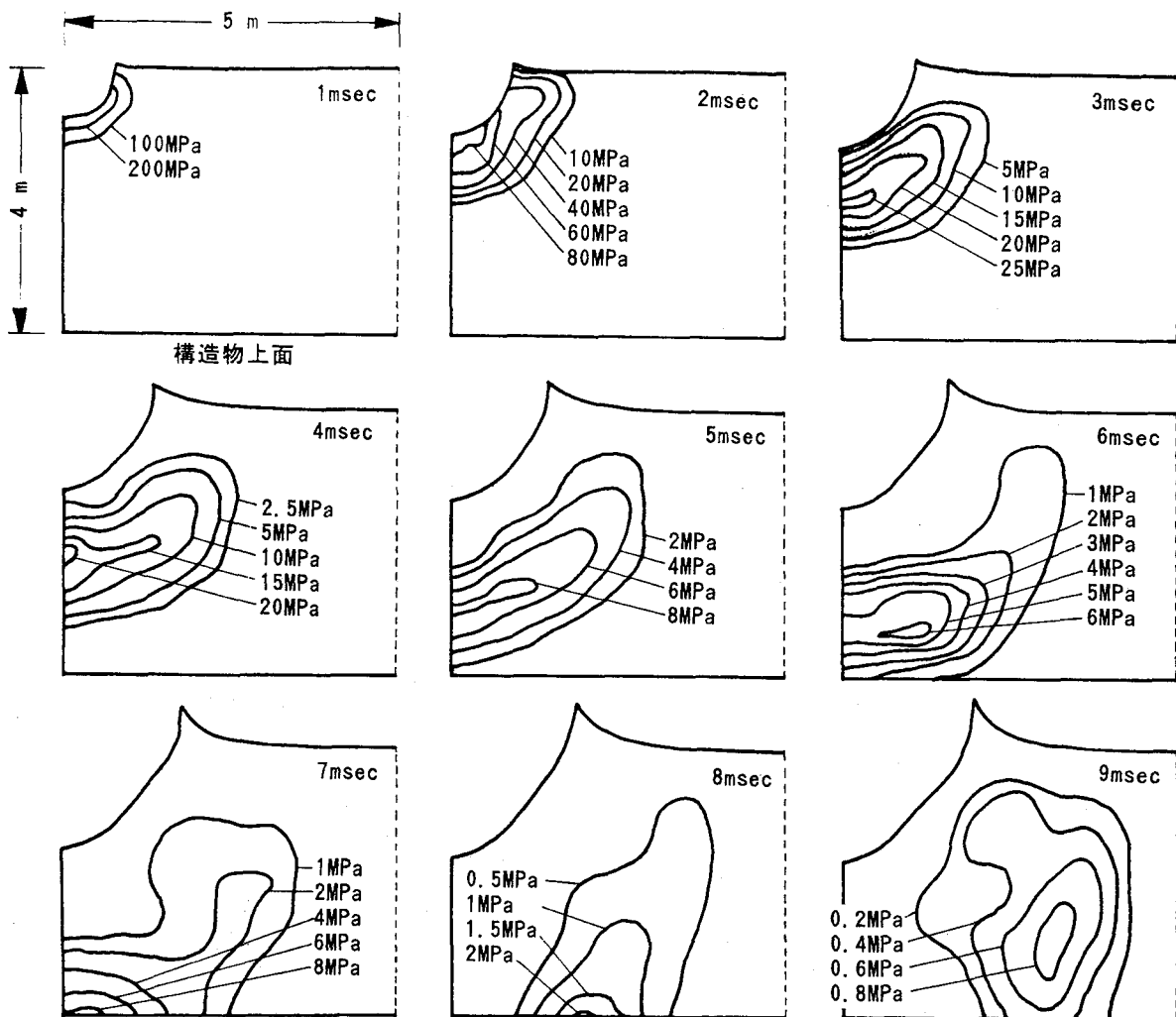


図-12 砂中応力分布の時間履歴

今後は、砂のかわりに粘性土を用いた遠心模型実験の実施及び実物実験の実施により、さらに本実験法の適用性に関する研究を進めていく予定である。

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) 風間基樹, 稲富隆昌:遠心載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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 安藤智啓, 藤本一男, 山口弘, 鶴居正行, 伊藤孝: 遠心載荷装置を用いた爆破実験, 構造工学論文集 Vol.41A, pp.1213-1220, 1995.
- 8) 江守一郎, Schuring: 模型実験の理論と応用, 技報堂出版, 1977.
- 9) D.R.ブランド: 固体力学シリーズ6 非線形動的弾性学, 培風館, 1973.
- 10) Hallquist, J. O. : LS-DYNA3D User's Manual, Lawrence Livermore Software Technology Corporation, 1990.
- 11) Jee, E. L., M. Finger and W. Collins : Lawrence Livermore Laboratory UCID-16189, Jan., 1973.
- 12) Dobtatz, B. M. : LLNL Explosives Handbook, Mar., 1981.
- 13) 藤本一男: 高速荷重を受ける土と構造物の動的相互作用に関する基礎的研究, 大阪大学博士論文, 1985.

(1996年9月6日受付)