

(29) 遠心力場における相似則の検証実験

EXPERIMENTAL STUDY OF SCALING LAWS IN A CENTRIFUGAL ACCELERATION FIELD

安藤 智啓*, 藤本 一男**, 鶴居 正行*, 伊藤 孝***, 山口 弘****

Tomohiro ANDO, Kazuo FUJIMOTO, Masayuki UI, Takashi ITO and Hiroshi YAMAGUCHI

* 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研究所研究企画官(〒229 神奈川県相模原市淵野辺2-9-54)

*** 防衛庁企画部管理課技官(〒154 東京都世田谷区池尻1-2-24)

**** 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)

キーワード: 遠心載荷装置, 相似則, 模型, 実物

(centrifuge, scaling laws, model, prototype)

1. はじめに

実構造物の衝撃応答特性の評価は, 実験装置やコスト等の制約から, 一般に縮小モデルを用いた模型実験によって行われる場合が多い. このような模型実験から, 実構造物の応答を推定するには, 模型と実物との間に理論的に成り立つ相似則の妥当性について検討を行うことが必要である.

著者らは, 土と構造物の相互作用を含む動的問題に着目し, 実構造物の動的応答を推定するための, 遠心載荷装置を用いた模型実験(以後, 「遠心模型実験」という.)に関する実験的研究を試みた. 本研究は, 理論的に導かれる遠心力場における相似則の妥当性について実験的に検討したものである.

2. 遠心力場の相似則

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, 地球の重力場における模型実験では, 厳密には相似則は成立せず, 実物大の現象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. 遠心模型実験は, 重力加速度の数倍から数百倍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, 上記問題が解消できるため, 近年その期待が高まってきている. これまでも本手法は, 地盤の圧密問題¹⁾, 支持力問題や斜面の安定問題²⁾等, 土質工学の分野で多く採用されてきた. 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. ここでは, 動的問題への同手法の適用性について実験的検討を行うために, 遠心力場における動的問題に用いる相似則^{4), 5), 6)}の誘導を連続体を対象に試みた.

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衝撃波の基礎式を適用する. いま, 次元波動方程式を考えると, 次式のように与えられる.

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

ここに, T は応力, x は長さ, w は密度, b は物体力及び 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.

$$x_m = \alpha_x x_p, \quad t_m = \alpha_t t_p \quad (2)$$

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.

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_v / α_t)	1
応力 (α_r)	1	加速度 (α_a / α_t^2)	N
長さ (α_x)	1/N	変位 (α_v)	1/N
面積 (α_a)	1/N ²	ひずみ	1
体積 (α_v)	1/N ³	力 ($\alpha_r \alpha_a$)	1/N ²
物体力 (α_o)	N	質量 ($\alpha_w \alpha_x^3$)	1/N ³
時間 (α_t)	1/N	材料 ($\alpha_o \alpha_x^3$)	1/N ³

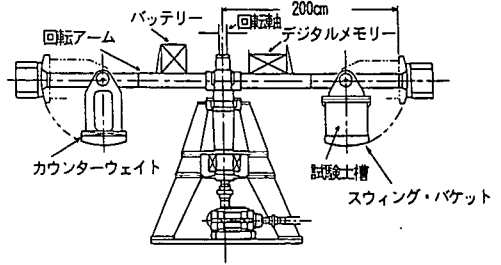


図-1 遠心載荷装置

$$\begin{aligned}
 W_m(x_m, t_m) &= \alpha_w W_p(x_p, t_p) \\
 T_m(x_m, t_m) &= \alpha_r T_p(x_p, t_p) \\
 b_m(x_m, t_m) &= \alpha_b b_p(x_p, t_p) \\
 u_m(x_m, t_m) &= \alpha_u u_p(x_p, t_p)
 \end{aligned} \tag{3}$$

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

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

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、

$$(\alpha_x / \alpha_r) \partial T / \partial x + (1 / (\alpha_w \alpha_b)) w b = (\alpha_t^2 / (\alpha_w \alpha_u)) w \partial^2 u / \partial t^2 \tag{1}$$

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、次式は成立しなければならない。

$$\alpha_x / \alpha_r = 1 / (\alpha_w \alpha_b) = \alpha_t^2 / (\alpha_w \alpha_u) \tag{5}$$

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使わざるを得ない。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、 $\alpha_r = 1$ とする必要がある。従って、

$$\alpha_x \alpha_b = 1 \tag{6}$$

となる。式(6)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、 $\alpha_r = 1$ を成し得る。さらに式(5)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/N³となる。応力、ひずみ及び速度については、模型と実物で等しくなる。

3. 実験概要

3.1 実験方法

本実験に用いた遠心載荷装置を図-1に示す。模型は、試験土槽(内径47cm、深さ35cm)内の所定の深さに構造物が埋設されるように、周囲を豊浦標準砂で充填し作製した。このとき砂の充填は、遠心力による密度変化が生じない

ようにできるだけ密にした。実験は、この試験土槽を回転アーム側に設置し、電気モータにより、 0.12rad/s^2 で所定の遠心加速度まで加速させた後、衝撃力を発生させ行った。試験土槽は、回転アームの回転速度増加にともない、徐々に水平になるまで振り上がるようになっている。そのため、試験土槽に作用する遠心力の作用方向は、実験中常に土槽の深さ方向と一致している。構造物に作用する初期土圧は、この遠心力によって実物の応力状態と等しくしている。なお、衝撃力は火薬の地表爆破により発生させた。

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	0.380g, 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	4.970g, 直径1.75cm	大型	10.0 cm
7	40 G	4.970g, 直径1.75cm	大型	10.0 cm
8	40 G	4.970g, 直径1.75cm	大型	10.0 cm

遠心模型実験で模擬する実現象は、ペンスリッドとアジ化鉛から成る360kgの火薬及び半径5m、高さ4m、上下の板厚20cmのアルミニウム合金製の中空円筒形構造物を想定した。また、構造物の埋設深さは4mを想定した。実験ケースは、火薬と構

P1~P5 : 圧力計

G1~G7 : ひずみゲージ

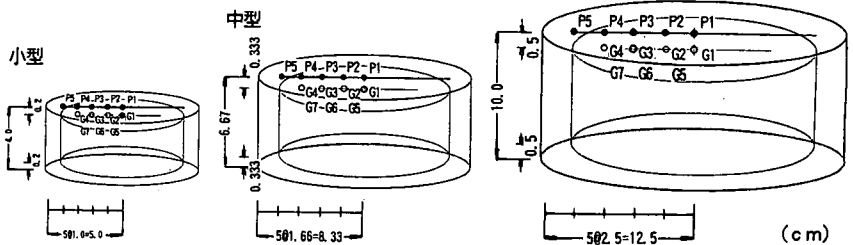


図-2 構造物の形状寸法及びセンサー位置

造物の寸法及び構造物の埋設深さを、想定した実物の1/100, 1/60及び1/40（遠心加速度は100, 60及び40Gを付加）の3通りとし（但し、1/40モデルで使用した火薬については、製造の安全上、アジ化鉛の使用量を制限したため、厳密には相似則を満足していない）、当初それぞれ3回の実験データを得ることを試みた。しかしながら、今回の実験では、火薬の不発が生じたことにより、2回のデータしか得られなかった場合もある。本実験ケースを表-2に示す。

図-2は、100, 60及び40G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している。センサーは、図に示すように中心から等間隔で上板表側に圧力計（P1~P5）を、上板裏側の半径方向及び円周方向にひずみゲージ（G1~G4及びG1, G5~G7）を貼付した。

3. 2 各種材料特性

火薬は、ペンスリッド（PETN）とアジ化鉛（ $\text{Pb}(\text{N}_3)_2$ ）の重量比5:1で配合した球状のものを使用した。それぞれ密度が 1.77 及び 2.50g/cm^3 、単位体積当りの初期内部エネルギーが 1.01×10^4 及び $3.84 \times 10^3\text{MPa}$ 、爆轟速度が 8.30×10^3 及び $3.58 \times 10^3\text{m/sec}$ である。

構造物に用いた材料は、アルミニウム合金（A5052）であり、各縮尺で若干材料特性が異なるものの、その平均的な値は、引張強度が250MPa、0.2%耐力が190MPa、伸びが12%、縦弾性係数が69.0GPaである。

豊浦標準砂は、単位体積重量が 1.64g/cm^3 、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%である。

3. 3 計測方法

本実験の計測方法のフローチャートを図-3に示す。センサー部は、構造物に取り付けた圧力計及びひずみゲージから成る。本圧力計（共和製PS-70KAM）は、直径6mm、厚さ2mmのひずみゲージ型のもので、その許容量は9.8MPaである。ひずみゲージ（共和製）は、抵抗120Ωで、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ゲリッド長2.3及び5mmの3種類のものを使用した。

表-3 飛散部形状及び応力波の伝播速度一覧

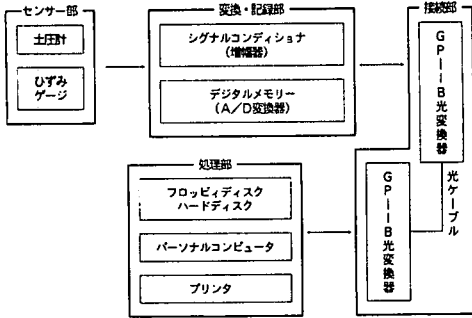


図-3 計測方法のフローチャート

実験ケース	G	飛散部半径		飛散部深さ		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)				
1	100	3.90	390	1.35	135	4.00	0.0560	714	473
2	100	3.60	360	1.25	125	4.00	0.0568	704	484
3	100	3.70	370	1.25	125	4.00	0.0624	641	441
4	60	6.40	384	1.80	108	6.67	0.0993	671	490
5	60	5.75	345	1.90	114	6.67	0.1067	602	447
6	40	9.50	380	2.80	112	10.0	0.1700	588	424
7	40	8.50	340	2.60	104	10.0	0.1840	610	451
8	40	8.70	348	2.60	104	10.0	0.1640	610	451

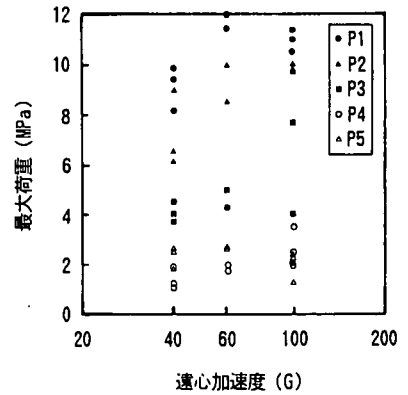


図-4 遠心加速度と最大荷重の関係

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。

接続部は、GP-IB光変換器と光ケーブルから成り、変換・記録部と後述する処理部とを接続するものである。GP-IB光変換器は、実験前に取付け、アンプの設定等を行った後に取り外し、実験終了後に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、プリンタに出力するとともにデータをディスクに保存する。

4. 実験結果

4.1 飛散部形状及び応力波の伝播速度について

表-3は、各実験ケースの飛散部半径、深さ及び砂中を伝播する応力波速度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なおわん型を示していた。半径については、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し、堆積部分は考慮しないものと定義した。飛散部形状の計測は、レーザ式変位センサー（KEYENCE LB-01）を用いて、飛散部直径方向にセンサーを水平移動させることにより行った。表中のmは模型実験で得られた値で、pは100, 60, 40G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である。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いい、ここではこの実物換算した値により比較を行った。また、表中に示す速度1は、砂表面から構造物の埋設深さを伝播距離として算出したもの、速度2は、砂の飛散を考慮して、埋設深さから飛散部深さを差し引いた距離を伝播距離として算出したものである。

まず、飛散部形状についてみると、同じ遠心力場で行った実験結果に多少ばらつきがみられる。各遠心力場のそれぞれの平均は、半径の場合360～370cm程度であり、深さの場合110～130cm程度である。100G場の深さが60及び40G場のそれと比較して若干大きく示されているが、飛散部半径及び深さは、各遠心力場でほぼ同程度の値を示しているものと思われる。次に、伝播速度についてみると、ここでも同条件の実験でばらつきが生じている。各遠心力場の速度1の平均は、遠心力場が大きいほど大きな値を示す傾向にあるが、速度2のそれは、若干40G場の場合

が他に比して小さいものの、450～470m/sec程度と概ね同様の値を示している。このことから、本実験の範囲内からは、N 倍の遠心力場で1/N に縮尺した模型実験の応力波速度は、ほぼ一定であると思われる。

4. 2 荷重について

図-4は、P1～P5における遠心加速度と砂を伝播して構造物に作用する最大荷重の関係を示したものである。ここでもP1～P5において、同じ遠心力場で行った実験結果に多少ばらつきがみられる。また全体として、40G 場における実験結果は、他に比して最大応答値が若干小さく示されている。この理由は、製造安全上、アジ化鉛の使用量が相似則を満足させるために必要な量より少なかったためと考えられる。このことは、前節の飛散部形状及び応力波の伝播速度の結果とも符合している。

次に、図-4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、各遠心力場の荷重波形について比較した。図-5は、100、60、40G場の遠心模型実験で得られた応答波形の時間軸を、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60msecまでの時間で示している。図に示すように、P1～P3の荷重は、初期時間に急激に最大応答値に達したあと、一旦急激に除荷され、その後再び載荷状態に移行し、2波目のピーク値を示した後緩やかに除荷されている。1波目がピーク値の大きな荷重が数msecと短く作用しているのに対し、構造物からの反射の影響等によって生じるとと思われる2波目は、ピーク値の小さい荷重が数十msecと長く作用している。全体として、P1～P5の各遠心力場の荷重波形は、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

図-6は、構造物の上板裏面の半径方向に貼付したG1～G4における遠心加速度と最大ひずみの関係を示したものである。荷重の場合と比べて、同じ遠心力場で行った実験結果のばらつきは小さいようである。また図には、100G場における実験結果が、他に比して大きく示されている。この理由は、小型構造物に使用したアルミニウム合金の0.2%耐力が、中型及び大型のそれより1割程度小さいことによるものと考えられる。

次に、荷重の場合と同様の実験ケース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軸を実物換算して示したのものである。また波形は、爆破開始から100msec 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。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ていたことを確認している。また、60G 場の結果で、約10msec前後に大きな正負の値がG1～G7にほぼ同等レベルで生じているが、これも何らかのノイズを拾ったものと推測される。なお、ノイズがひずみ波形に現れ、荷重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、圧力計はセンサー内部にブリッジが形成され、かつリード線も一括ケーブルで被覆しているためと考えられる。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

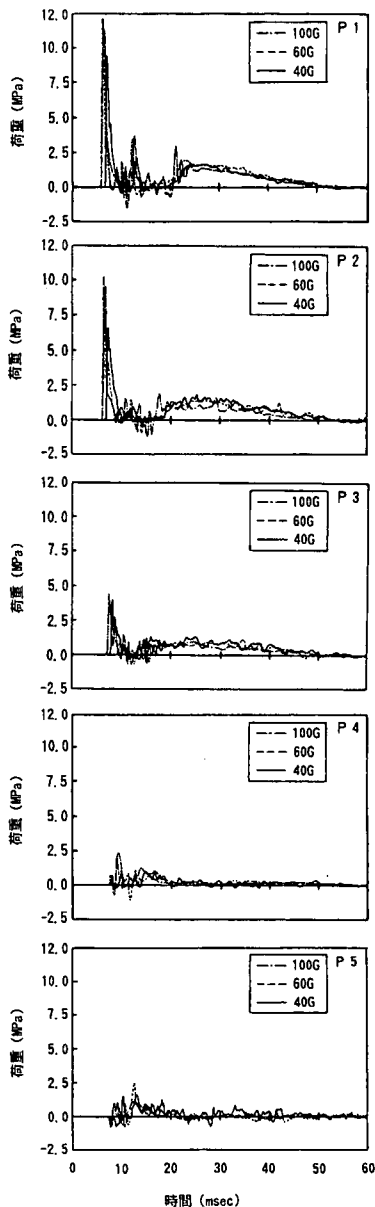


図-5 荷重波形の比較

しているものと思われる。

5. まとめ

本研究では、実物大の構造物の動的応答を推定するために、遠心模型実験に着目して実験的検討を行った。実験は、豊浦標準砂を用いて、1/100, 1/60, 1/40 の縮尺で、100, 60, 40Gの遠心加速度を模型に付加することにより行い、飛散部形状、構造物に作用する荷重及び構造物のひずみについて、本相似則に基づき実物換算したかたちで比較検討した。その結果、各遠心力場の動的応答は、概略一致していることが明らかとなった。このことから、実物大の構造物の動的応答はある程度推定可能であり、本相似則も本実験の範囲内では妥当であることを示すことができた。

参考文献

- 1) 高田直俊、藤井齊昭：「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、Vo 1. 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) Maynard A. Plamondon :Froude-scaled Tests of Explosively Loaded Buried Structures Using a Soil Simulant, Proceedings of the sixth International Symposium, pp. 229-235, May, 1993.

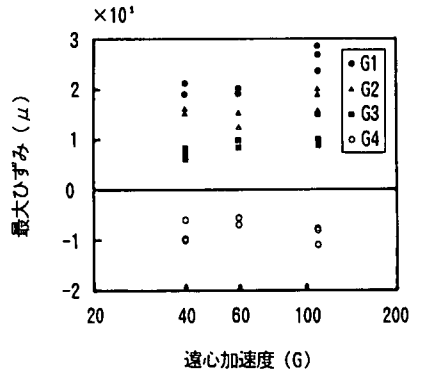


図-6 遠心式加速度と最大ひずみの関係

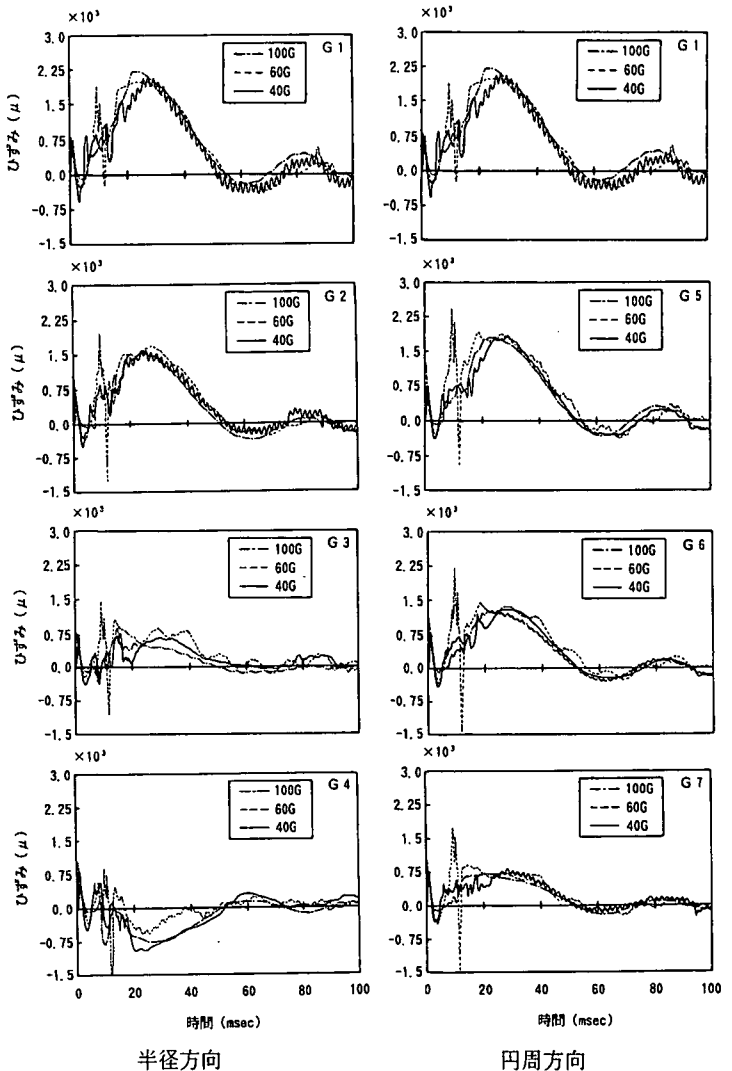


図-7 ひずみ波形の比較