

(45) 砂中構造部材の衝撃応答に関する実物実験と遠心模型実験との比較

A COMPARISON OF RESULTS BETWEEN PROTOTYPE TESTS AND CENTRIFUGE MODEL TESTS FOR RESPONSES OF STRUCTURAL MEMBERS IN SAND SUBJECTED TO IMPACT LOADING

安藤智啓*, 山口弘**, 星川辰雄**, 森下政浩**

Hiroshi YAMAGUCHI, Tomohiro ANDO, Tatsuo HOSHIKAWA and Masahiro MORISHITA

*工修 防衛庁第4研究所築城研究室 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研究所築城研究室 研究員 (〒229 神奈川県相模原市淵野辺 2-9-54)

キーワード：実物実験、遠心模型実験、相似則
(prototype test, centrifuge model test, scaling law)

1. はじめに

土木建築の分野では、物体の衝突、打撃あるいは爆発によって生じる衝撃荷重が作用した場合に、地盤との相互作用を考慮してその挙動を評価しなければならない実構造物が多く存在する。それら実構造物の衝撃挙動の評価は、実験的には、装置や経費等の制約から、実物の数分の一の模型を用いて実施される場合が多い。しかし、この場合にも、比較的大規模な実験施設や実験装置が必要となる。

一方、土質工学の分野では、地盤の圧密問題、斜面の安定問題等、さらに最近では、振動問題を調べるために、遠心力場を利用した模型実験（遠心模型実験）^{1),2),3)}が頻繁に実施されている。本手法は、遠心載荷装置と呼ばれる実験装置を使用することにより、小さな模型を用いた室内実験から、実物大の現象を再現できるため、近年各研究機関で多く利用されている。このとき、実験で使用される模型は、実物の数十分の一から百分の一程度のものである。従って、模型の作製及び計測等には、非常に高い実験精度が要求される反面、実験の実施自体（労力、時間及び費用面）は、非常に簡便で容易なものとなる。しかしながら、本手法の衝撃問題への適用性に関する事例^{4),5)}については、ほとんど例をみない。

本研究では、遠心模型実験の衝撃問題への適用性を検討するために、実物実験及び 20G 場における 1/20 縮尺の遠心模型実験を実施し、それらの実験

表-1 遠心力場における相似則

| 物理量 | 模型/実物 | 物理量 | 模型/実物 |
|-------|-------|-------|------------------|
| 密度 | 1 | ひずみ | 1 |
| 弾性係数 | 1 | 変位 | 1/N |
| ポアソン比 | 1 | 時間 | 1/N |
| 自重応力 | 1 | 速度 | 1 |
| 重力加速度 | N | 加速度 | N |
| 長さ | 1/N | 力 | 1/N ² |
| 応力 | 1 | エネルギー | 1/N ³ |

結果の比較を試みた。なお、遠心模型実験の結果については、理論的に実物と模型との間に成り立つ相似則^{6),7),8)}（表-1）を用いて実物換算している。従って、比較はこの実物換算値と実物実験結果との対比で行っている。特に、ここでは、砂中構造部材の表面に作用する圧力、構造部材のひずみ及び砂表面に形成されるクレータに着目して比較を行った。

2. 実験

2.1 実験の概要

図-1 は、実物実験の概要を示している。実物実験は、屋外の実験施設において、1,000mm の深さに供試体を埋設し、砂表面に火薬を設置し爆発させ行っている。

一方、遠心模型実験では、実物実験で使用した供試体の 1/20 縮尺の供試体を、試験土槽(内径 450mm、

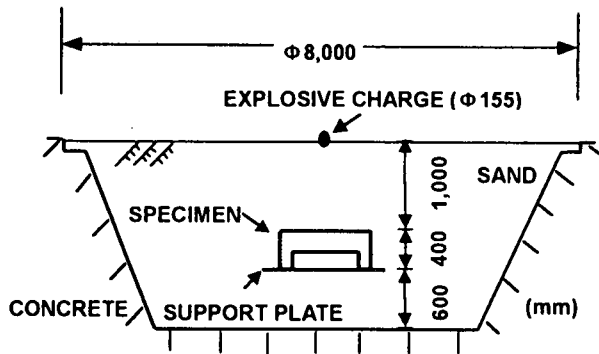


図-1 実物実験の概要

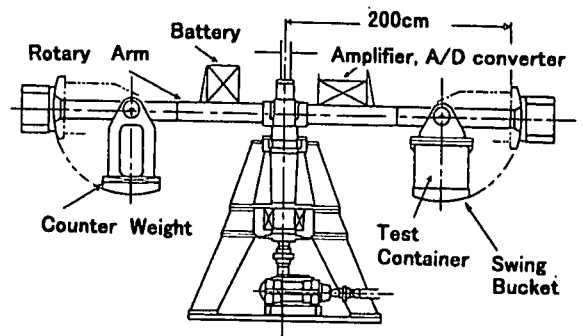


図-2 遠心載荷装置

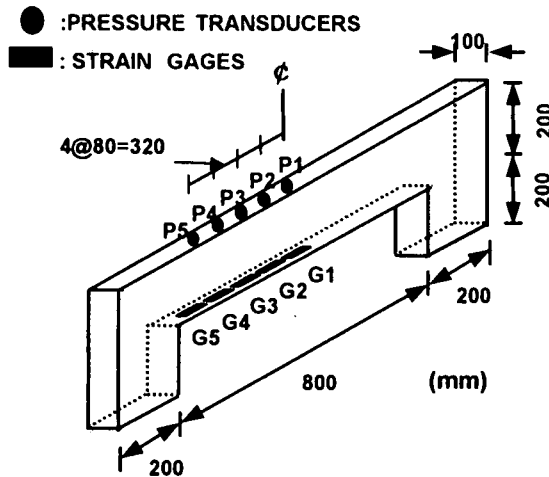


図-3 実物実験に使用した供試体

深さ 350mm) 内の砂表面から 50mm の深さ (これは、実物実験の埋設深さの 1/20 に相当する) に埋設する。実験は、本試験土槽を、遠心載荷装置のスウィング・バケット片側に設置し (図-2)、回転アームの遠心加速度が 20G に達した後、火薬を爆発させ実施している。

2.2 供試体

図-3 は、実物実験で使用した供試体を示している。本供試体は、門型の構造部材である。梁部の断面は 100×200mm であり、梁部のスパンは 800mm である。また、遠心模型実験で使用した供試体は、実物実験で使用したその 1/20 縮尺のものである。また、それぞれの供試体には、圧力及びひずみを計測するために、圧力計 (P1~P5) 及びひずみゲージ (G1~G5) を貼付している。実物実験で使用した土圧計の受圧面の直径は 60mm であり、模型実験のそれは約 3mm である。また、ひずみゲージの長さは、実物実験では 20mm、模型実験では 1mm

表-2 実験ケース

| 実験種類 | 縮尺 | G | 実験番号 | 繰返し番号 |
|--------|------|-------|------|-------|
| 実物実験 | 1/1 | 1(G) | 1 | 1 |
| | | | 2 | 2 |
| | | | 3 | 3 |
| 遠心模型実験 | 1/20 | 20(G) | 4 | 1 |
| | | | 5 | 2 |
| | | | 6 | 3 |

である。なお、ひずみゲージの貼付方向は、構造部材のスパン方向である。

2.3 材料物性

本実験で使用された供試体は、アルミニウム製 (A5052) のものである。その弾性係数及び引張強度は、それぞれ 72GPa 及び 200MPa であった。砂は、茨城県神流川産の川砂である。その粒径及び含水比は、それぞれ 0.001~2.0mm 及び約 8% であった。初期密度については、実物実験及び遠心模型実験の場合で、1.65g/cm³ 及び 1.75g/cm³ であり、若干後者の方が大きかった。

衝撃力を発生させるための火薬は、実物実験では質量 3.12kg のペントライトを、遠心模型実験では質量 0.36g のアジ化鉛とペンスリッドから成る混合薬を用いた。また、薬種が異なるため、実物実験に使用したペントライトの薬量は、アジ化鉛及びペンスリッド混合薬 0.36g の 20³ 倍のエネルギー量に相当するように、予め数値計算により求めた。なお、火薬の形状は、両者とも球形である。

2.4 実験ケース

表-2 は、本実験ケースを示している。実物実験 (縮尺 1/1, 地球の重力加速度 1G) 及び遠心模型実験 (縮尺 1/20, 遠心加速度 20G) は、砂の締固めに

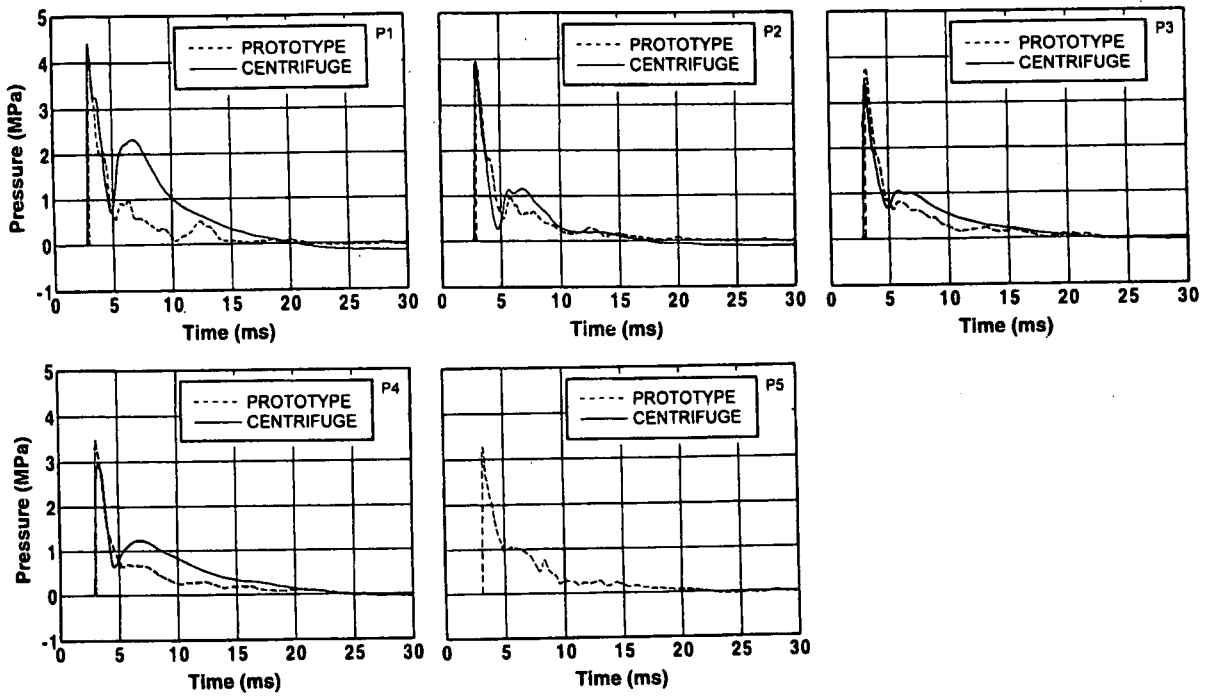


図-4 実物実験及び遠心模型実験の圧力波形

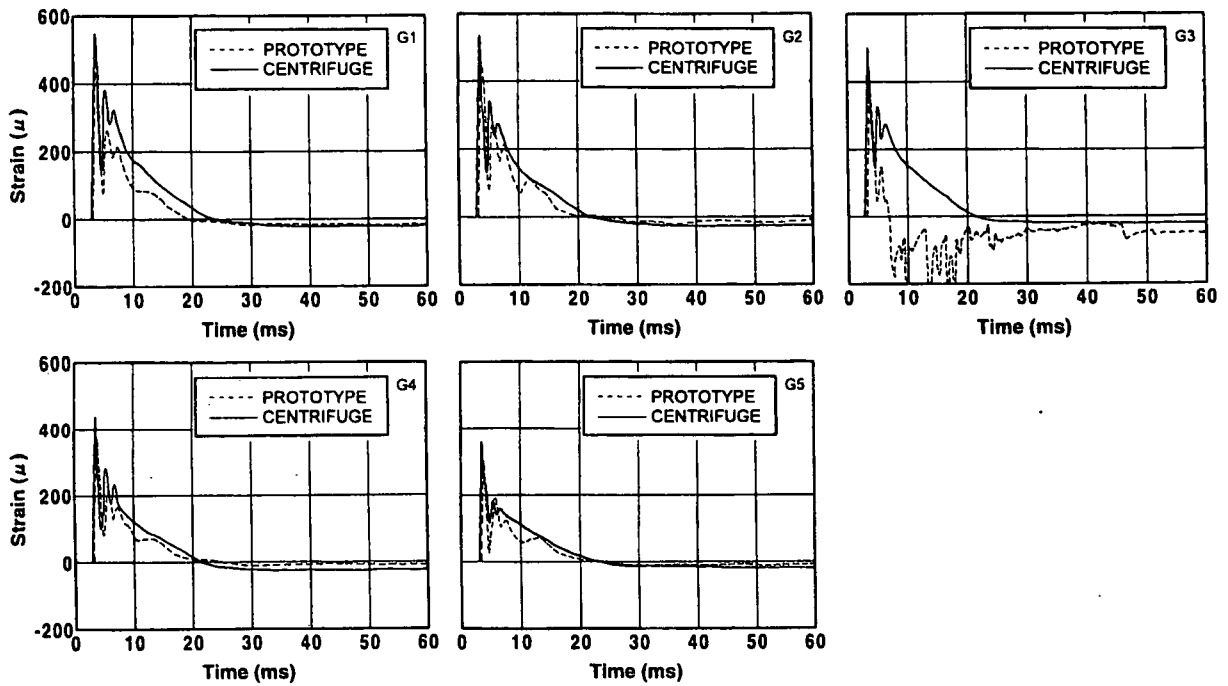


図-5 実物実験及び遠心模型実験のひずみ波形

よる構造物の応答特性への影響を調べるために、繰返し3回ずつ実験を実施した。なお、3回目の実験における供試体上部の砂の密度は、実物実験及び遠

心模型実験の場合で、それぞれ 1.77g/cm^2 及び 1.82g/cm^2 であった。

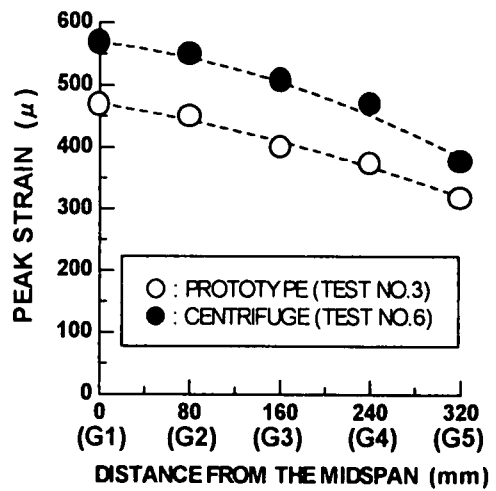
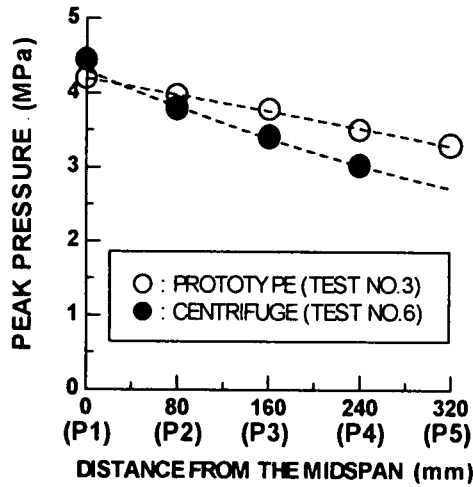
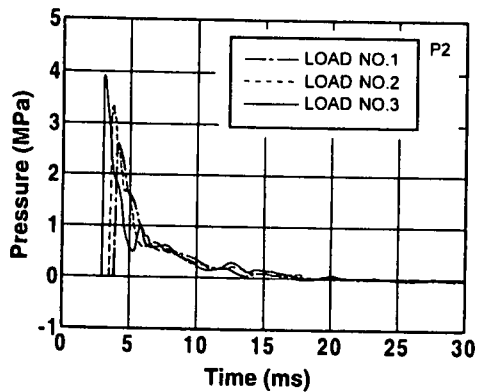
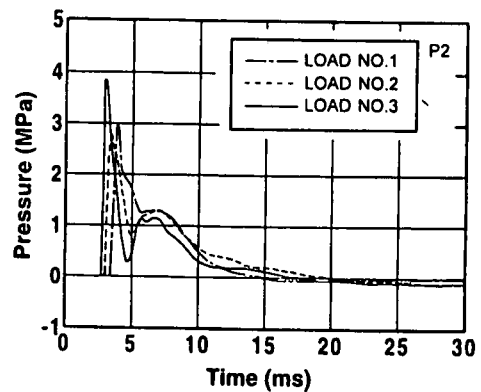


図-6 実物実験及び遠心模型実験の最大圧力分布 図-7 実物実験及び遠心模型実験の最大ひずみ分布



(a) 実物実験



(b) 遠心模型実験

図-8 繰返し荷重を受ける実物実験及び遠心模型実験の圧力波形 (P2)

3. 実験結果

3.1 実物実験と遠心模型実験との比較

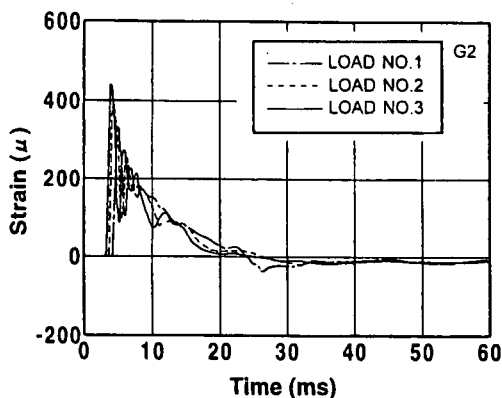
(1) 圧力波形について

図-4 は、実物実験 (実験番号 3) と遠心模型実験 (実験番号 6) の圧力波形を示している。また、遠心模型実験の時間は、相似則に基づき 20 倍に実物換算している。なお、遠心模型実験の P5 の応答は計測できなかった。各図より、圧力は爆発後約 3ms で急激に増加することが認められる。第 1 ピークを示した後は、圧力は約 1.5ms の間急激に減少している。さらに、約 5ms で再び増加し第 2 ピークを示した後、緩やかに零値まで減少している。いずれの図も、遠心模型実験の第 2 ピーク値が、実物実験のそれより若干大きく示されているものの、立ち上り時刻、第 1 ピーク値、その発生時刻及び継続時間 (波形の立ち上りから零値に至るまでの時

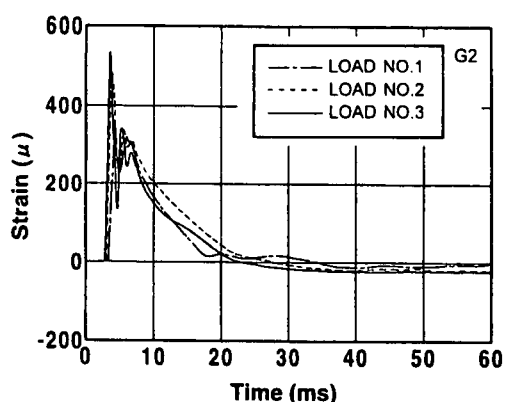
間) は、概ね両者で一致していることが認められる。

(2) ひずみ波形について

図-5 は、実物実験 (実験番号 3) と遠心模型実験 (実験番号 6) のひずみ波形を示している。ここでも、遠心模型実験の時間は実物換算している。なお、実物実験の G3 の応答は、良好に計測できなかった。各図より、ひずみ波形は、爆発後 3ms 程度で立ち上がることがわかる。これは概ね圧力波形の立ち上り時刻と同時刻である。その後、ひずみは約 3.5ms で第 1 ピークを示した後、1.5ms 間で急激に減少している。さらに、約 5ms で再度増加し、第 2 ピーク及び第 3 ピークを示した後、零値まで減少している。ここでも、いずれの図も、第 2 及び第 3 ピークの遠心模型実験の値が、実物実験のそれより多少大きく示されていることが認められる。しかし、



(a) 実物実験



(b) 遠心模型実験

図-9 繰返し荷重を受ける実物実験及び遠心模型実験のひずみ波形 (G2)

表-3 実物実験及び遠心模型実験のクレータ形状の比較

| 実験種類 | 実験番号 | 繰返し番号 | クレータ直径 (mm) | クレータ深さ(mm) |
|--------|------|-------|-------------|------------|
| 実物実験 | 1 | 1 | 1,500 | 430 |
| | 2 | 2 | 1,450 | 370 |
| | 3 | 3 | 1,430 | 320 |
| 遠心模型実験 | 4 | 1 | 1,540 | 400 |
| | 5 | 2 | 1,500 | 370 |
| | 6 | 3 | 1,480 | 350 |

圧力波形の場合と同様に、両者の波形形状は、立ち上りから減衰に至るまで概ね同様の傾向を示していることが認められる。

(3) 最大圧力分布と最大ひずみ分布について

図-6 及び図-7 は、実物実験及び遠心模型実験の P1~P5 における最大圧力分布及び G1~G5 における最大ひずみ分布を示している。図-6 から、各点の最大圧力値は、両者で概略一致していることがわかる。また、スパン中心からの距離が増加するに従い、最大圧力値は減少していることもわかる。さらに、両者の分布の傾きも、概ね等しいものと考えられる。一方、図-7 では、各点の両者の値に違いがみられる。しかし、その違いは、最大でも 15% 以下である。また、ここでも各点の値は、最大圧力値の場合と同様に、スパン中心から端部へ向かうに従い、両者とも小さくなっている。さらに、その分布の傾きも両者で良く一致している。

3.2 実物実験と遠心模型実験との比較

(1) 圧力波形について

図-8 は、P2 における繰返し荷重を受ける実物実験及び遠心模型実験の圧力波形を示したものである。

図より、実物実験及び遠心模型実験の結果とも、実験の繰返しとともに、立ち上り時刻は早く、最大圧力値は増加していることが認められる。これは、火薬の爆発により衝撃力を受けた供試体上部の砂が、徐々に締め固まった影響である。一方、全体的な波形形状に関しては、繰返し数にあまり関係なく、両者とも 3 つの波形は同様な形状を示している。以上のことから、繰返しによる供試体の応答特性への影響は、実物実験及び遠心模型実験の結果で、同様の傾向を示していると言える。

(2) ひずみ波形について

図-9 は、G2 における繰返し荷重を受ける実物実験及び遠心模型実験のひずみ波形を示したものである。図より、圧力波形の場合と同様に、両者とも繰返し数の増加とともに、立ち上り時刻は早く、最大ひずみ値は増加していることが認められる。しかし、波形形状は、両者とも繰返し数に関係なく、同様の形状を示している。従って、ここでも、繰返しによる供試体の応答特性への影響は、実物実験及び遠心模型実験の結果で、同様の傾向を示していることがわかる。

(3) クレータ形状について

表-3 は、繰返し荷重を受ける実物実験及び遠心模型実験のクレータの大きさを比較したものである。表中の遠心模型実験の結果については、相似則に基づき実物換算して示している。なおここでは、クレータ直径及び深さについては、爆発により飛散した砂の落下による堆積を含むみかけのクレータ寸法で整理している。

表よりまず、実物実験及び遠心模型実験両者の同繰返し番号の値が、概ね等しいことが認められる。また、繰返しの影響に着目すると、両者とも、クレータ直径及び深さが、実験の繰返しとともに減少していくことが認められる。また、その減少の割合は、クレータ直径及び深さとも、実物実験結果の方が多少大きく示されている。これは、実物実験の初期密度の方が、遠心模型実験のそれより小さかったため、砂の締固めの効果がより発揮されたことによるものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、遠心模型実験の衝撃問題への適用性を検討するために、実物実験及び 20G 場における 1/20 縮尺の遠心模型実験を実施し、それらの実験結果の比較を試みた。その結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 圧力波形、ひずみ波形、最大圧力分布及び最大ひずみ分布に関して、実物実験及び遠心模型実験の結果は、比較的良く一致した。
- (2) 繰返し荷重による砂の締固めによる砂中構造部材への応答特性の影響は、実物実験及び遠心模型実験で同様である。
- (3) 遠心模型実験は、実物大の砂中構造部材の

衝撃応答特性を推定するのに有効である。

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) 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.83-89, 1993.
- 4) Bruce L. Kutter, L. Moquette O'Leary, P.Y. Thompson and Rachel Lather : Gravity-Scaled tests on Blast-Induced Soil-Structure Interaction, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.114, No.4, pp.431-447, April, 1988.
- 5) 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発破実験, 構造工学論文集 Vol.41, pp.1213-1220, 1995.
- 6) Schmidt, R.M. and Holsapple, K.A. : Theory and Experiments on Centrifuge Cratering, Journal of Geophysical Research, Vol.85, No.2, Washington, D.C., pp.235-252, Jan., 1980.
- 7) John P. Nielsen : The Centrifugal Simulation of Blast Parameters, Air Forth Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, Report Number ESL-TR-83-12, Florida, Dec., 1983.
- 8) 安藤智啓, 山口弘, 鶴居正行, 星川辰雄, 藤本一男: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, 構造工学論文集 Vol.43, pp.1469-1480, 1997.