

# 流動する液状化地盤中の杭の挙動に関する 遠心载荷実験

○樋口俊一<sup>1</sup>, 三浦房紀<sup>2</sup>, 濱田政則<sup>3</sup>, 菅野高弘<sup>4</sup>

<sup>1</sup>工修 大林組技術研究所 土木耐震構造研究室 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

<sup>2</sup>工博 山口大学大学院理工学研究科 環境共生工学専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>3</sup>工博 早稲田大学理工学部 土木工学科 (〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1)

<sup>4</sup>工博 国土交通省港湾技術研究所 構造部構造震動研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

The purpose of this study is to investigate the behavior of a pile installed into a liquefiable sandy ground. To evaluate the magnitude of external force, which acts to a pile from soil during lateral spreading of the ground, a series of shaking table tests were performed under 30g centrifugal gravity field. The effects of the relative density of the soil and the magnitude of input acceleration on the external force were studied. It was found that the soil acted as solid and/or as liquid depending on the relative density and the input motion.

*Key words: Pile, Centrifuge, Shaking table test, Liquefaction, Lateral spreading*

## 1. はじめに

杭基礎の破壊に至るまでの挙動を解明し、合理的耐震設計を実現するには、杭の破壊に至るまでの物性を明らかにすると共に、地盤から杭に作用する外力を明らかにすることが必要である。特に杭基礎が液状化地盤内にある場合には地盤の物性が時々刻々変化するために、杭基礎に作用する外力は非常に複雑となる。これまで液状化地盤中の杭の挙動に関する研究は多く行われているが、統一的に外力の評価を試みた例は少ない。

このような観点から、本研究は液状化地盤から杭に作用する外力を評価するために、遠心载荷実験により液状化発生から側方流動に至る一連の過程における杭の挙動を調べたものである。

## 2. 遠心模型実験の概要

遠心模型実験は、地盤工学的には模型地盤に遠心重力を作用させることにより、地盤材料の力学挙動の拘束圧依存性を満足させる実験手法である。即ち、模型地盤に遠心重

力を作用させることで、模型地盤内部の土要素に作用する自重による上載応力を実地盤のそれと等価なレベルに設定することが可能となる。

### (1) 遠心模型実験装置

本研究で用いた遠心载荷装置の最大回転半径は 7m であり、最大搭載容量は 700ton $\cdot$ g (6,860kN) である。この回転装置には動的と静的の2つのバケットが装備されている。動的試験において模型を搭載することが可能な遠心振動台の載荷空間は長さ 2.2m、幅 1.07m、高さ 2.0m であり、この種の装置としては世界的にも最大規模である。

計測装置は、回転装置内に設置されたオンボードコンピュータ制御のアンプ及び A/D 変換装置とデータ転送部及び地上にある収録部で構成される。回転装置内で信号を増幅してデジタル化、無線 LAN でデータ転送するため、ノイズの混入が少ない。計測総数は最大 64ch である。

### (2) 相似則

表-1 に遠心重力場 ( $N_g$  場) で成立する地盤及び地中構造物の相似則を示す。この相似則は、静的な問題から振動間

題まで共通して成立する。

本実験では遠心重力  $30g$  ( $294m/s^2$ ) 場において砂地盤を加振し、地盤を液状化させ側方流動現象を発生させた。

表-1 遠心重力場 ( $N_g$ 場) で成立する相似則

項目	記号	相似率
長さ	$l$	$1/N$
密度	$\rho$	1
ひずみ	$\varepsilon$	1
加速度	$a$	$N$
速度	$v$	1
変位	$d$	$1/N$
応力	$\sigma$	1
圧力	$p$	1
剛性	$D$	1
透水係数	$k$	$N$
時間	$t$	$1/N$
振動数	$f$	$N$
梁の曲げ剛性	$b$	$1/N^4$

### (3) 実験ケース

表-2 に実験ケースを示す。実験パラメータとして地盤の液状化の程度に影響を及ぼすと考えられる地盤の密度と入力加振波の最大振幅・波形形状を設定した。また、一般的な地盤において、杭の挙動に大きな影響を及ぼすと考えられる非液状化層の有無についても検討する。

表-2 実験ケース

ケース	1	2	3	4	5
地盤構成*	A	A	A	A	B
相対密度 $D_r$ (%)	40	40	80	40	40
入力波形**	1	1	1	2	2
最大入力加速度 (gal)	400	150	400	400	400

\* 地盤構成 A: 液状化層のみ, 地盤構成 B: 液状化層+非液状化層

\*\* 入力波形 1: サイン波振幅漸増 (25 波), 入力波形 2: サイン同一振幅 (10 波)

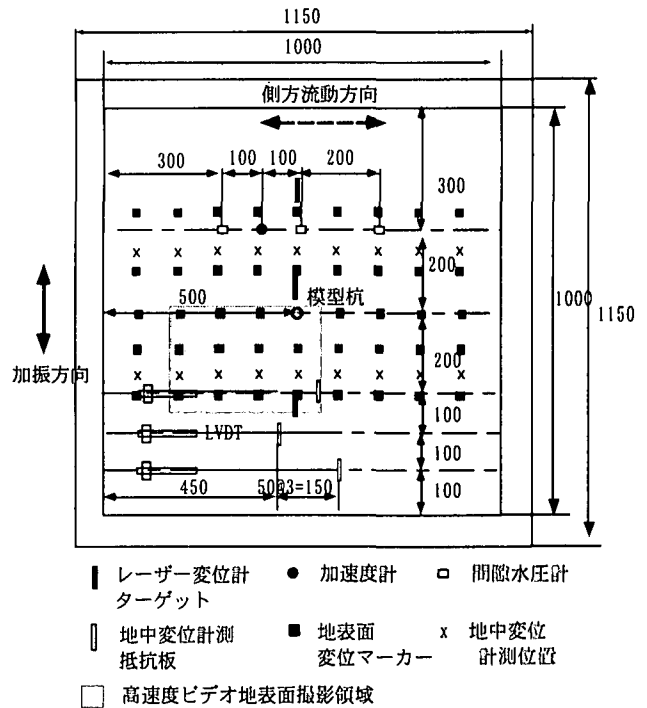
### (4) 模型地盤

図-1 に模型地盤・計測項目および計測点を示す。本実験では地表面が傾斜した飽和地盤模型を加振して液状化現象を誘起し、側方流動を発生させた。地盤の液状化により杭に作用する側方流動力に着目することから、模型地盤の地表面傾斜方向と加振方向は直角方向とした。地盤は長さ、

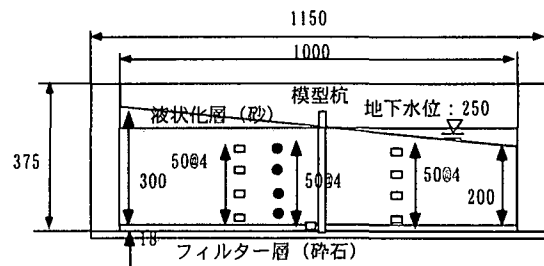
幅ともに 1000mm, 砂層の厚さはスロープ上部で 300mm, 下部で 200mm である。地表面傾斜の勾配は 10% で、地下水位は 250mm である。間隙流体には水を使用した。遠心実験では相似則により、 $30g$  場での透水係数が実地盤の 30 倍となることから間隙流体の粘性係数を調整する必要があるが、本実験で用いた砂 (8 号珪砂) は平均粒径が小さいため遠心場でも透水係数が砂の範疇に入り、液状化現象の再現には支障がない。

相対密度 40% 程度の緩い砂地盤は、珪砂を空中落下法により撒きだして作製した。相対密度 80% の密な地盤は、棒状パイプレーターで締め固めて作製した。地表面傾斜は砂撒出し後、余分な砂を掃除機で吸引して整形した。

地盤内部および地表面には液状化時の地盤の応答性状と応答変位を把握するため、加速度センサーと間隙水圧計、変位計を設置した。



(a) 平面図



(b) 側面図

図-1 模型地盤と計測点

この実験では、側方流動の時刻歴データを詳細に把握することを旨とし、変位計測については幾つかの方法を試みた。地表面変位はレーザー変位計を用いた計測に加え、画像解析による時刻歴変位計測を実施した。遠心実験では時間に関する縮尺が  $1/N$  となることから、通常のビデオカメラによる画像 (秒 30 コマ) では変位の時刻歴が粗すぎるため、高速度ビデオカメラ (秒 500 コマ) を用いて地表面に設置したターゲットの映像を撮影した。

液状化時の地中の変位分布については実際に計測された例が少ないが、本実験では図-2のように耐圧型 LVDT を用いた地中変位の時刻歴の計測を実施した。

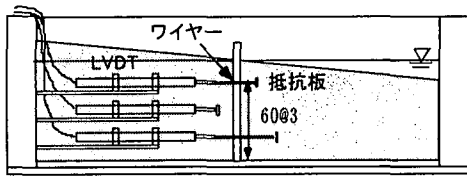


図-2 地中変位計の設置状況

### (5) 模型杭

図-3 に模型杭を示す。模型杭はステンレス製中空パイプで、外径 20mm、肉厚 0.5mm である。この仕様は杭が液状化地盤中で力を受けても、弾性変形範囲内で挙動することを念頭に決定した。また、境界条件を明確にするため杭先端部にフランジを溶接し、土槽底板にボルトで固定した。

杭には側方流動方向に対し、上下流面のひずみを計測した。杭に作用する力の分布が把握できるように、6断面にゲージを配置した。また、杭の表面に大きな凹凸が出来ないように、これらのひずみゲージは杭の内面に取り付けた。

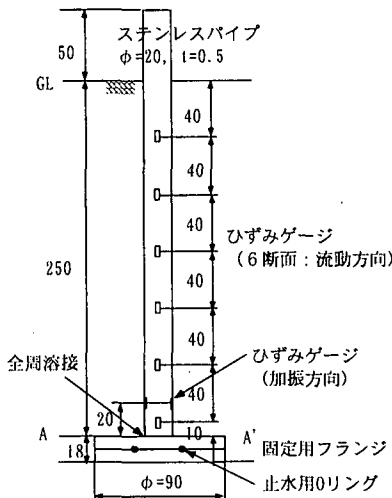


図-3 模型杭とひずみ計測点

### (6) 加振波形

加振波形は間隙水圧の上昇過程において、地盤の変位と杭に作用する力の関係が把握できるように、図-4 に示した振幅を漸増させるサイン波を用いた。遠心重力作用下での加振の最大振幅はケース 1 では  $12g$  ( $120m/s^2$ ) で、これは  $1g$  場での  $400gal$  ( $4m/s^2$ ) に相当する。

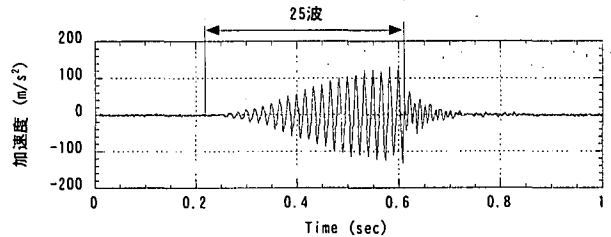


図-4 代表的な加振波形

## 2. 実験結果

### (1) ケース 1

図-5 に過剰間隙水圧比、曲げモーメント、地盤地表面変位の時刻歴を示す。これより約 0.4 秒くらいから間隙水圧が上昇し始め、0.57 秒ころに完全液状化していることが分かる。曲げモーメントはほぼ完全液状化する時間に最大値となっている。地表面の変位は間隙水圧が上昇し始める頃から増大し、完全液状化した頃からその増加割合は小さくなっていることが分かる。

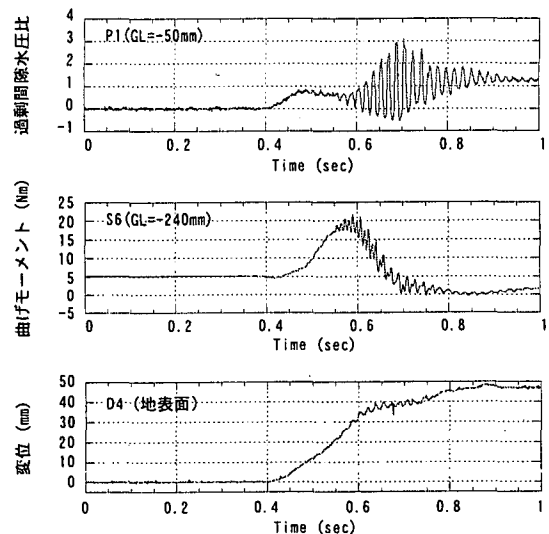


図-5 過剰間隙水圧比、杭の曲げモーメント、地表面変位の時刻歴

図-6 に杭の曲げモーメントと地表面変位の関係を示す。これより地表面変位約 30mm で曲げモーメントは最大値となり、その後地盤変位は増大しても曲げモーメントは低下

し、最終的にはほぼ0になっている。これは完全液状化によって地盤の拘束がなくなった、すなわち地盤バネがほぼ0になったことを意味する。

図-7は液状化発生時(0.42秒)、最大曲げモーメント発生直前(0.50秒)、およびその後(0.58秒)における過剰間隙水圧比の深度分布の時刻による変化を示したものである。これよりばらつきはあるものの、地表面に近いほど過剰間隙水圧比は大きい。すなわちこれは地表面に近い所から液状化していることを示唆するものである。

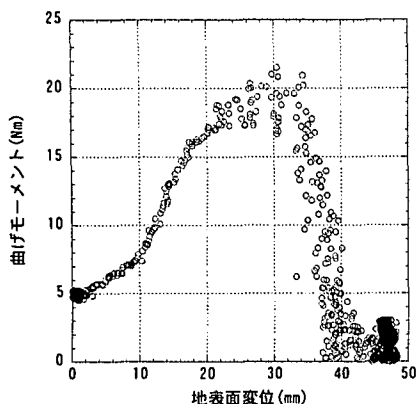


図-6 杭の曲げモーメントと地表面地盤変位の関係

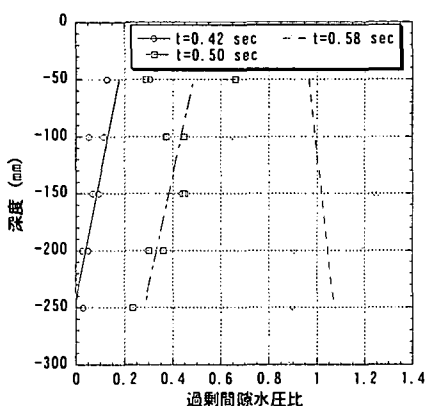


図-7 代表的な時刻における過剰間隙水圧比の分布

図-8は図-7と同じ時刻および0.64秒における地盤変位の地中分布を示したものである。これより地盤変位は地表面に近づくとき急激に大きくなるのがわかる。

図-9は代表的な時刻における杭の曲げモーメントの深度分布である。また図-10は曲げモーメントを3次関数で近似し、それを2回微分して算定した外力の深さ方向の分布である。これより外力は地表面で大きく、深くなると小さくなる分布をしているのがわかる。液状化地盤から杭に作用する外力分布として同様の実験結果が振動台実験<sup>1)</sup>や遠心模型実験<sup>2)</sup>でも報告されている。

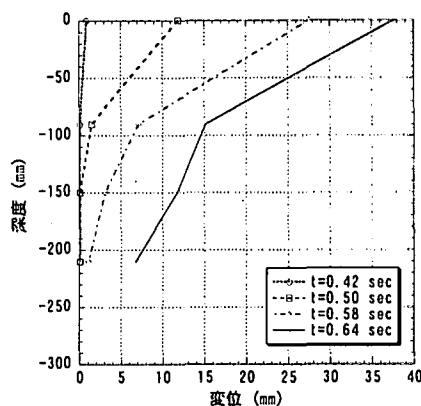


図-8 代表的な時刻における地盤変位の分布

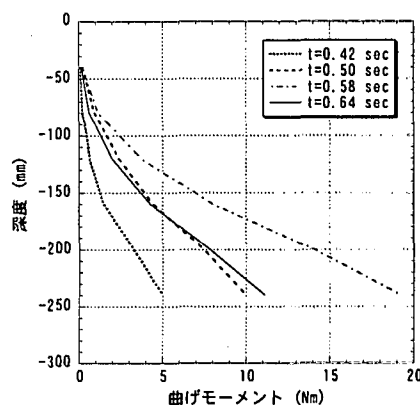


図-9 代表的な時刻における杭の曲げモーメントの分布

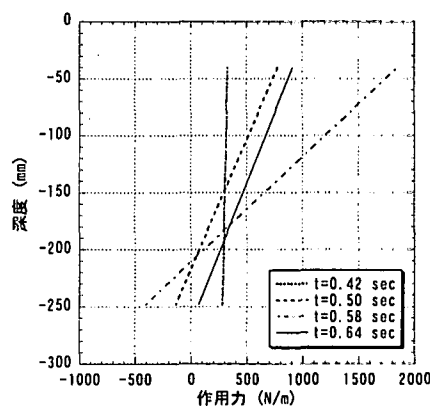


図-10 代表的な時刻における外力の深さ方向の分布

## (2) ケース3

図-11に過剰間隙水圧比、杭の曲げモーメント、地表面変位の時刻歴を示す。このケース3は相対密度が80%で、ケース1の40%に比べかなり密な地盤である。この図より、過剰間隙水圧比は1を越えてもケース1のように大きく変動しないこと、杭の曲げモーメントは最大値に到達後もほとんどその大きさを保持していること、地表面変位はケース1の約半分であることなどが特徴として挙げられる。

図-12は杭の曲げモーメントと地表面変位の関係を示し

たものである。ケース1と比較すると、地表面変位が10mm程度ではケース3の方が曲げモーメントが大きい、変位が20mm程度では両者ともほぼ同じ大きさの曲げモーメントとなっている。

図-13 は代表的な時刻における過剰間隙水圧比の深度分布の変化を示したものである。このケースもケース1と同様に地表面に近い方が大きな値となっている。

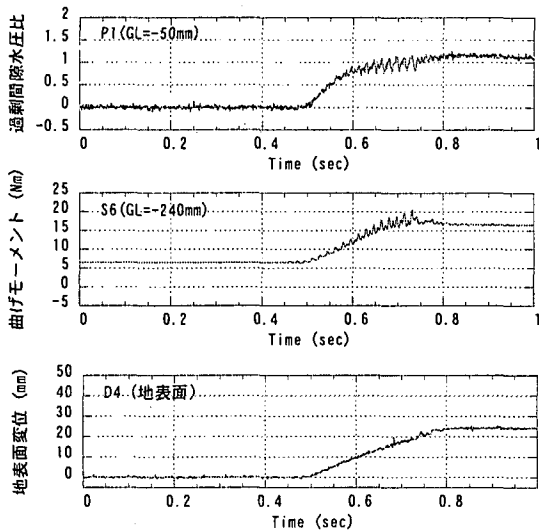


図-11 過剰間隙水圧比、杭の曲げモーメント、地表面変位の時刻歴

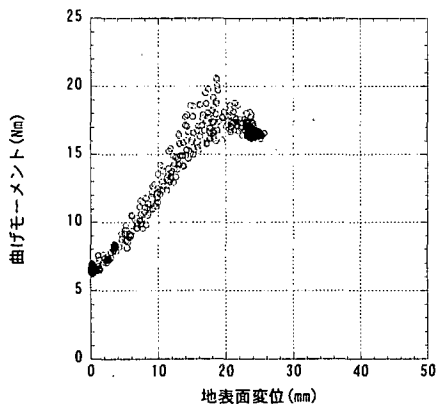


図-12 杭の曲げモーメントと地表面変位の関係 (ケース3)

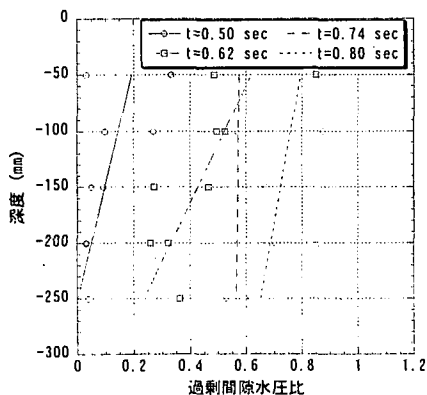


図-13 過剰間隙水圧比の深度分布 (ケース3)

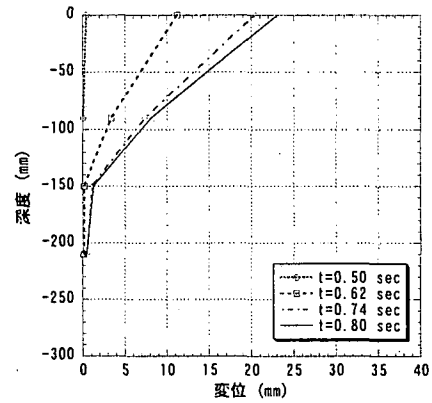


図-14 地盤変位の深度分布 (ケース3)

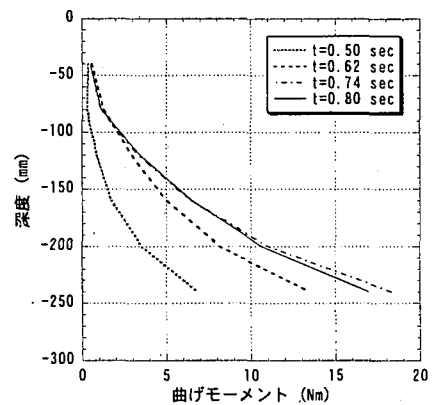


図-15 杭の曲げモーメントの深度分布 (ケース3)

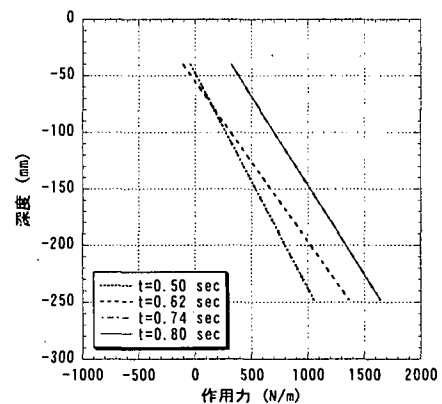


図-16 作用外力の深度分布 (ケース3)

図-14 は代表的な時刻における地盤変位の深度分布である。ケース1と比べて、深い場所(160mm以深)では変位がほとんど発生していない。

図-15 は代表的な時刻における杭の曲げモーメントの深度分布である。ケース1と比べて、深い場所(160mm以深)の曲率が逆になっている。

図-16 はケース1と同様に曲げモーメントを3次関数で近似し、2回微分して算定した外力分布である。ケース1とは逆に地表面に近い方が外力は小さくなっている。これ

らの差異は以下のように解釈すると理解しやすい。ケース1では液状化地盤を流体と見なせば、地表面に近いほど流動速度が大きいため杭に作用する流体力は地表面近くほど大きい。一方ケース3は地盤密度が高いため液状化が顕著ではなく地盤が剛性を保ち、かつ地盤深部ほど地盤バネが大きいため変位が小さくても杭に大きな力が作用する。

### (3) ケース2

このケースの地盤の相対密度はケース1と同じ40%であるが入力加速度の振幅が150gal (1.5m/s<sup>2</sup>)相当の場合である。このケースでは地表面付近のみ過剰間隙水圧比が1に近づいており、全層液状化には至っていない。

図-17は杭の曲げモーメントの深度分布、図-18は作用外力の深度分布を示したものである。図-18より明らかなように、作用外力の深さ方向分布の大小関係が加振初期と後半とは逆転している。すなわち加振初期では地中の深い所で作用力が多いケース3、換言すれば地盤バネによる外力、加振後半では地表付近の作用力が多いケース1、換言すれば流体による外力に近い分布になっている。

以上の結果は杭の曲げモーメントの深度分布を3次関数により近似して、それを2回微分して求めたものである。当然その結果は直線分布となるが、その他の方法でも外力の算定を行い、また他の試験ケースも含めて今後慎重に検討を行う予定である。

### 3. まとめ

本研究は、遠心載荷装置を用いて、液状化により側方流動する地盤中の杭の応答、および地盤から杭に作用する外力について検討したものである。具体的には砂地盤の相対密度、入力加速度の振幅をパラメータに、これらが杭に作用する外力にどのような影響を及ぼすかを調べた。その結果以下ことが分かった。

- ①相対密度が低い場合、杭に作用する外力は地表面付近の方が深部より大きい。地盤の流動速度は地表面付近ほど大きいことが実験で明らかにされたことから、杭に働く力は流体力的な力によるものと考えたと理解しやすい。
- ②相対密度が高い場合、①とは逆に地盤深部の方が外力は大きくなった。この場合には地盤全層が激しく液状化せず地盤剛性が保たれたと考えられ、地盤深部ほど地盤バネが大きいため、地盤変位が大きくなるとも杭に作用する外力は大きくなったと理解できる。

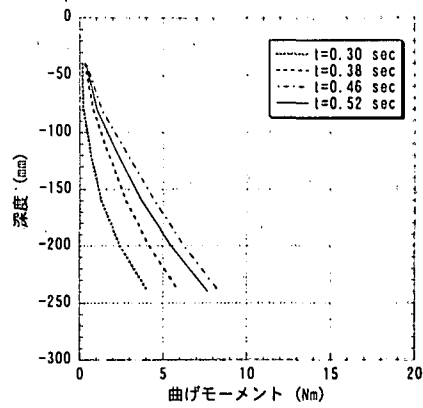


図-17 杭の曲げモーメントの深度分布 (ケース2)

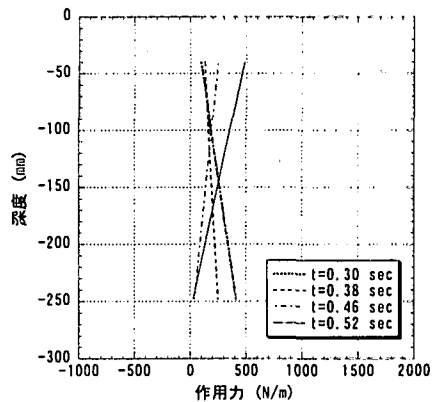


図-18 作用外力の深度分布 (ケース2)

- ③相対密度が低く、入力加速度の振幅が小さい場合、加振初期の段階は②と似た傾向を示し、過剰間隙水圧比が大きな加振後半では①と似た傾向を示した。

外力の評価に関しては今後の実験結果も踏まえて引き続き検討を進めていく予定である。

謝辞：本研究を進めるにあたって、大林組技術研究所松田隆氏には貴重な助言を終始いただいた。深謝の意を表する次第である。また、昨年度の基礎実験は竹中技術研究所の畑中宗憲氏、甲村雄一氏ならびに阿部崇氏の協力の下に実施した。その成果を本研究に存分に生かすことができた。心よりお礼を申し上げる次第である。

### 参考文献

- 1) 大友敬三：地中構造物に及ぼす地盤側方流動の荷重特性評価，土木学会論文集，No.519/I-43，pp.283-297，1998.
- 2) 佐藤博・大保直人・吉迫和生：側方流動地盤内に存在する杭に作用する荷重評価に関する動的遠心模型実験，第24回地震工学研究発表会論文集，pp.665-668，1997.