

土木研究所資料

水中基礎に作用する地震時のサクシヨン に関する研究

平成15年3月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎チーム

水中基礎に作用する地震時のサクシヨンに関する研究

基礎チーム 上席研究員 福井 次郎

主任研究員 大塚 雅裕

交流研究員 喜多 直之*

要 旨

現行の直接基礎の設計法では地震時の基礎の浮上りを許容しているが、水中基礎の設計において地震時応答を考える場合に基礎底面下に作用するサクシヨンの影響は考慮していない。サクシヨンとは、地震時慣性力による基礎の浮上りが生じた場合に、基礎底面と地盤の間に生じる空隙への水の回り込みが遅れ、底面下の水圧に変動が起こることに起因する基礎の浮上り抵抗であり、サクシヨンを設計に考慮するか否かで基礎の応答の評価は大きく変わることが考えられる。

そこで、水中地盤上に設置した模型基礎の浮上り実験を行って、基礎の回転挙動、基礎底面下の水圧変動、基礎の浮上り抵抗の相関関係を把握し、設計における基礎の動的応答特性評価への影響を検討した。

キーワード：水中基礎、直接基礎、サクシヨン、非線形応答

* 交流研究員在職期間（平成13年4月～平成15年3月まで）

目 次

第1章 はじめに	1
1.1 サクシオンとは	1
1.2 サクシオンの影響	2
1.3 基礎を取りまく水の特性	3
第2章 水中基礎に作用するサクシオンに関する模型実験	4
2.1 実験の目的	4
2.2 実験方法	4
2.3 実験結果	9
2.3.1 基礎の挙動と浮上り抵抗	9
2.3.2 角速度と浮上り抵抗特性	10
2.3.3 水深の影響	10
2.3.4 基礎底面下の水圧	11
2.3.5 地盤条件の違い	18
2.3.6 止水の効果	19
2.3.7 正負繰り返し载荷	20
第3章 サクシオン推定方法の検討	22
3.1 計測データの処理	22
3.2 基礎底面下への水の流入速度に依存する水圧変動	24
3.3 水深差の影響	27
3.4 水圧変動量の推定	28
3.5 浮上り前の隙間の影響	31
3.6 サクシオンの上限	31
第4章 サクシオンの効果を考慮した実基礎の挙動	33
4.1 サクシオンを考慮した浮上り式	33
4.2 浮上り修正式の特長	35

4.3 動的解析による応答特性の把握	36
第5章 まとめ	42
参考文献	44
付 録	45

第1章 はじめに

現行の道路橋直接基礎の設計は、特殊な条件の場合を除いて静的設計法を基本としているが、動的挙動に与える影響に不明確な点が多いことから、荷重の設定や抵抗特性の評価において、安全側の評価がなされている場合が多い。

直接基礎が水中にある場合、基礎を取りまく水の影響については、地震時に水より受ける複雑な影響を地震時動水圧として作用させたり、浮力については長期的な影響（水位の変動など）まで考えた定量的な評価が難しいことから、照査項目に応じて安全側に100%考慮するか全く無視するといった方法が採られている。

地震時の設計では基礎の浮上りを許容しているが、基礎が水中にある場合あるいは基礎底面が水に接している場合、基礎の浮上りに伴い作用するサクシジョンの影響は全く無視されている。ここで、サクシジョンとは、地震慣性力により基礎の浮上りが生じた場合に、基礎底面と地盤の間の隙間の体積が変化することにより水圧低下が起こり、これに起因して見かけ上基礎底面を鉛直下向きに引っ張るように作用する圧力をいう。

これらの評価は、基礎の安定性を安全側に評価した設計となっているが、言い換えれば不経済な設計となっているとも考えられる。近年、構造物の設計・施工における合理化が求められている中、直接基礎については他形式の基礎に比べ研究がやや遅れていることから、ここでは直接基礎の設計の合理化を目指し、水中基礎に作用するサクシジョンの効果に着目することとした。

1.1 サクシジョンとは

サクシジョンとは、上記のとおり地震慣性力により基礎の浮上りが生じた場合に、基礎底面と地盤の間の隙間の体積が変化することにより水圧低下が起こり、これに起因して見かけ上基礎底面を鉛直下向きに引っ張るように作用する圧力である。実際には、図-1.1に示すように、死荷重状態において構造物重量、上載する水および大気の重量による下向きの圧力と、地盤反力度および基礎底面下の水圧による上向きの圧力がバランスしているのに対し、地震時では、鉛直荷重が偏心し、基礎の浮上りに伴う基礎底面下の水圧低下により圧力のバランスが崩れ、浮上り部分において基礎を押さえつける圧力が上回る現象である。

基礎の設計では、一般に100%の浮力が考慮されるが、これは、図-1.1の死荷重時では、フーチング上面に下向きに作用する静水圧とフーチング下面に均等に作用する上向きの静水圧との差に起因する揚力であり、構造物の水中部分の体積からなる水の重量に相当する。基礎底面下の水圧が変動（低下）することは、基礎浮上り部分の浮力の低下につながるが、底面下の圧力は、1.3で示すようにゼロ気圧まで低下し得ることから、そのような場合、浮上り部分に上向きに作用していた浮力がなくなるのみならず、上載する水および大気の重量による鉛直下向きの力が浮上に抵抗する力として加わることになる。

ここで、本資料では、「サクシジョン」は基礎底面下の水の圧力変動に伴い基礎の浮上に抵抗する圧

力、「サクション力」はサクションにその作用面積を乗じた浮上り抵抗力和定義する。

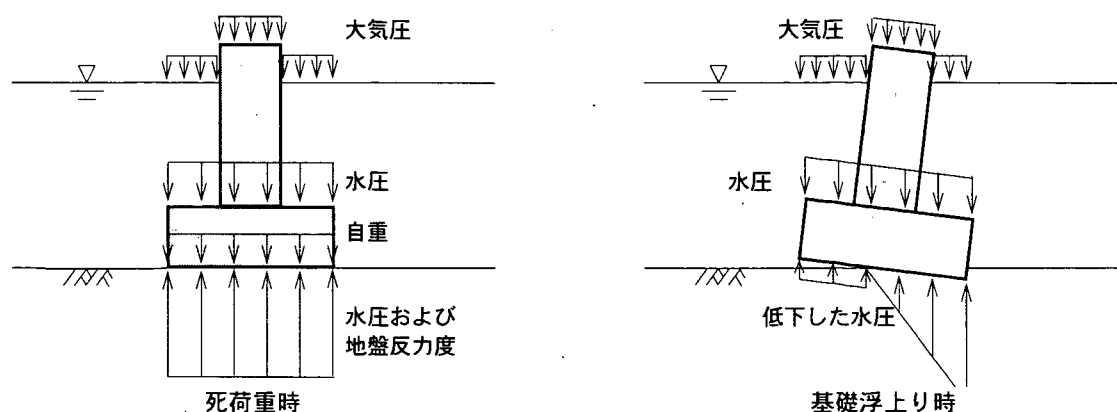


図-1.1 サクションとは

1.2 サクションの影響

従来の設計ではサクションの影響は考慮していなかったが、サクションは基礎の浮上り部分に鉛直下向きに作用し、したがって、図-1.2 に示すように基礎の転倒モーメントに対し抵抗するモーメントとして作用することになり、また、サクション力が下向きの力であることから鉛直反力の増大につながる。

現行の照査法により基礎の安定を考える場合、転倒に対しては安全性を高く評価できるものと考えられる。一方、鉛直支持および水平支持に対しては、設計の条件によるものと思われる。鉛直支持については、作用鉛直力が増大するが、従来設計よりも鉛直荷重の偏心量を小さく見込め、極限支持力を大きく評価できることから、地盤条件および構造物諸元等により安全性の評価が変わってくるものと考えられる。水平支持についても同様で、鉛直力の増大に応じて水平支持力が増大するが、基礎の回転抵抗の増大に伴い基礎の慣性力（水平作用力）も増大するため、設計条件により安全性の評価が変わると考えられる。

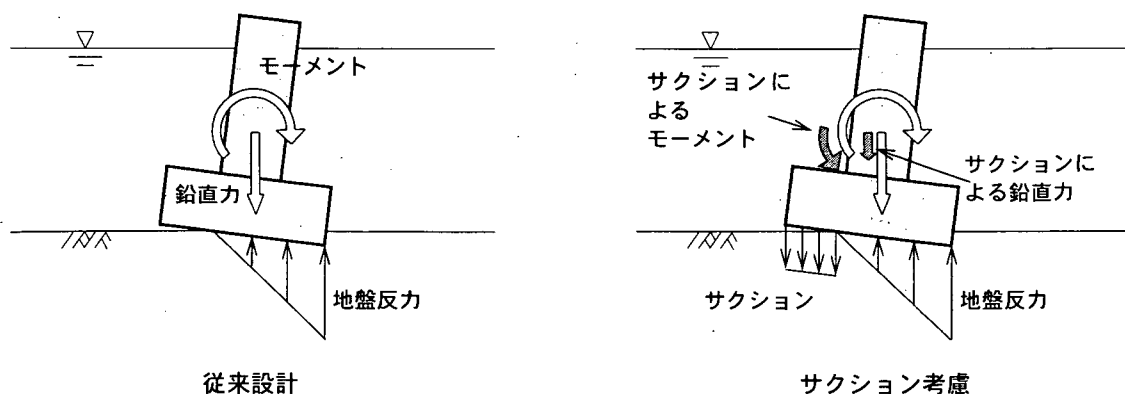


図-1.2 サクションを考慮した設計

1.3 基礎を取りまく水の特性

サクシヨンの効果を検討するにあたり、まず基礎の周りに存在する水の特性について整理する。

(1) 圧縮性

水は圧縮性が低く、わずかな体積変化で大きな圧力低下が起こる。水の弾性係数は $2.32 \times 10^3 \text{N/mm}^2$ (20℃, 1~500 気圧の平均) であり、たとえば水深 50m 下の水は、鉛直方向に約 0.02% 体積膨張すれば大気圧まで圧力が低下する。

(2) 水圧の下限

水圧には下限値がある。海水面（水深 0m）には大気圧（約 100kPa）が作用しており、水面上が真空（圧力ゼロ）となった時の水面の水圧が下限の状態である。

(3) 水の流速

基礎が浮上る際の底面下への水の流入速度の上限値は水深に依存する。基礎の浮上りにより、基礎底面下の水圧が下限状態となった時、基礎底面下と基礎周辺の水の圧力差は最大となる。この時、水の流入速度の上限値 $v_{\max}$ は、摩擦損失や形状損失等がないものとすれば、ベルヌイの定理より下式で与えられる。

$$v_{\max} = \sqrt{2gh + 2p_a / \rho} \quad (1-1)$$

ここに、

h : 水深

g : 重力加速度

ρ : 水の密度

p_a : 大気圧

(4) 粘性の影響

水は粘性を有しており、基礎底面下に流入する際に摩擦損失が生じる。摩擦損失による水圧変動量は、基礎端からの距離に応じて大きくなる。

(5) その他

これらの他に、流入する断面形状による形状損失や、流入断面の急縮小による損失などが基礎底面下の水圧変動に影響する。

第2章 水中基礎に作用するサクションに関する模型実験

動的な基礎の回転挙動に対し、基礎周辺の水圧がどのように変化し、基礎の浮上り抵抗特性にどう影響するかを調べるために模型実験を実施した。

2.1 実験の目的

実験は、基礎の浮上り時における浮上り抵抗特性に影響を与えられ以下の特性を調べることを目的として実施した。

- ・基礎浮上り時における基礎底面下の水圧変動特性
- ・サクションと基礎の浮上り抵抗特性の関係
- ・水深が基礎の浮上り抵抗特性に与える影響
- ・基礎の角速度と発生するサクションあるいは浮上り抵抗特性との関係
- ・地盤の透水条件と発生するサクションの関係
- ・基礎底面下への水の流入を遮断することの効果
- ・水平方向正負繰返し荷重を受ける場合の基礎の浮上り抵抗特性

2.2 実験方法

1.7m×0.8m、深さ 0.7m の水槽内に厚さ約 200mm の地盤を作成し、注水（深さ 30mm～500mm）した状態で基礎模型を設置し、脚頭部に水平荷重を載荷して基礎の浮上りによるサクションの影響を調べた（図-2.1）。

基礎模型は、図-2.2 に示すような、平面寸法 500mm×400mm、厚さ 130mm の鋼製型枠にコンクリートを充填したフーチングおよびφ34mm の鋼製パイプをトラスに組んだ橋脚からなる構造である。フーチングは、直接基礎の形状である他に、後述する地盤条件に応じて、砂の場合には止水板を（図-2.3 参照）、弾性地盤の場合にはゴム板を用いて止水構造を設けた状態（図-2.4 参照）での試験も実施している。模型の重量は、表-2.1 に示すとおりである。なお、本実験は浮上り抵抗特性のみに着目したことから、載荷に際して滑動を防止するためにフーチング底面付近に水平移動防止用の棒を配置している（図-2.1 参照）。

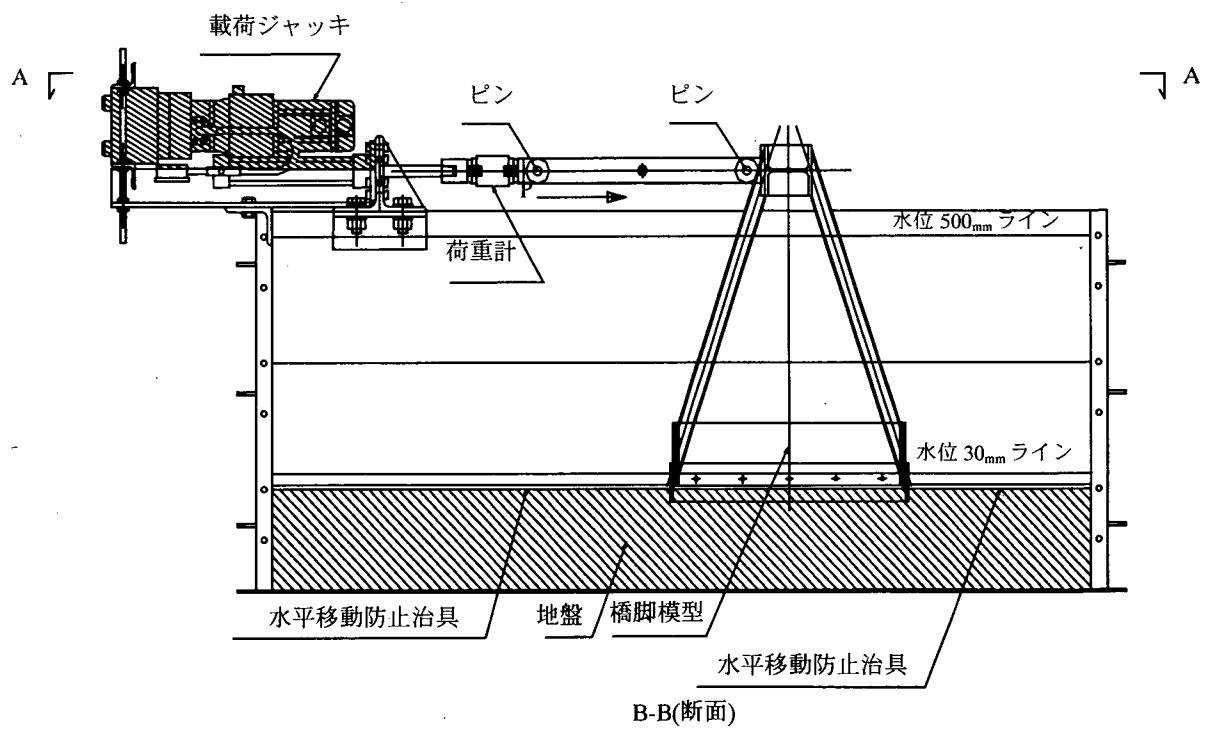
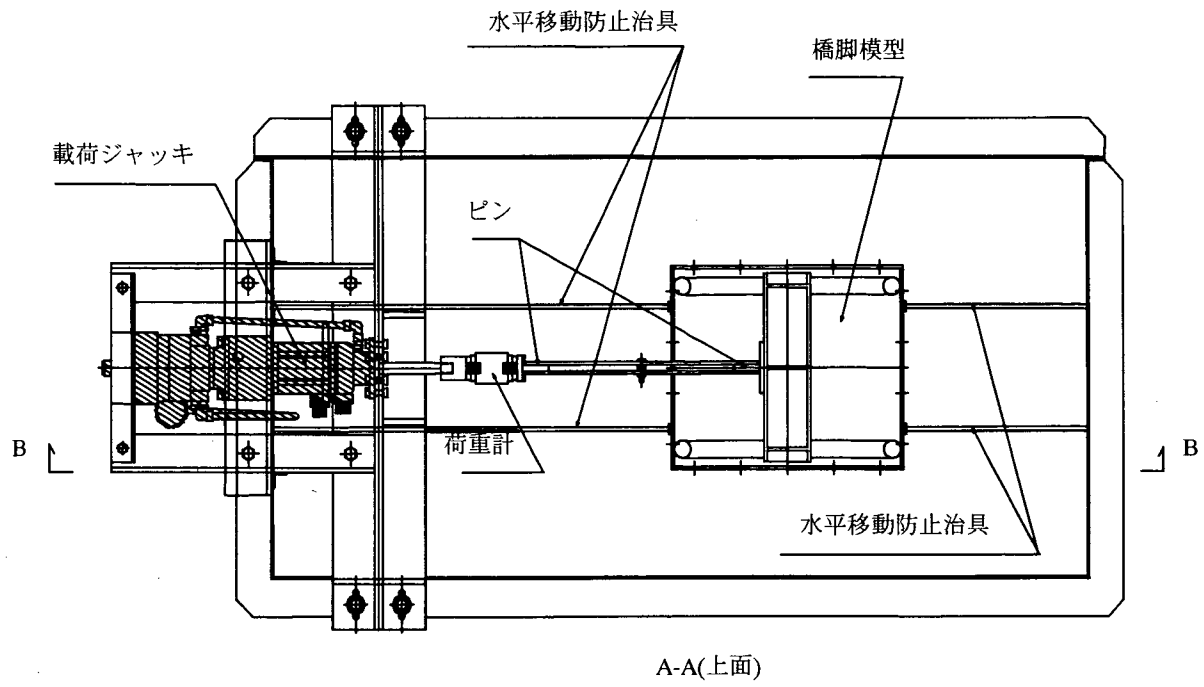


図-2.1 実験装置

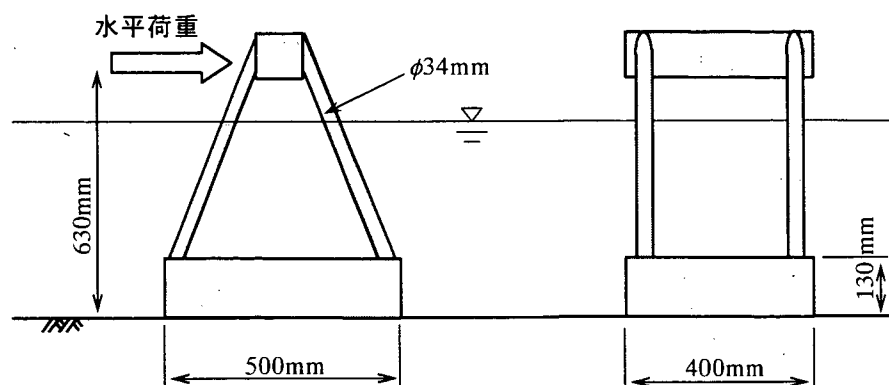


図-2.2 橋脚模型

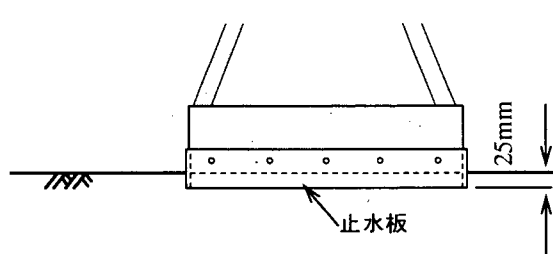


図-2.3 止水板（砂地盤用）

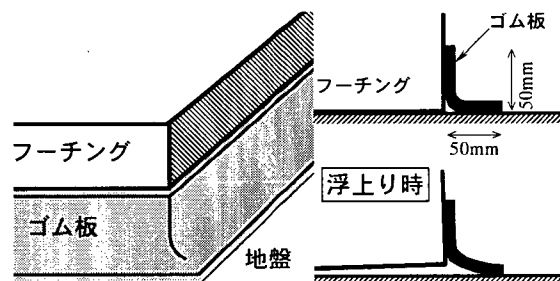


図-2.4 止水ゴム（弾性地盤用）

表-2.1 模型重量

水位 (mm)	止水なし (kN)	止水板付き (kN)	止水ゴム付き (kN)
30	0.89	0.94	0.73
150	—	—	0.71
250	0.67	—	—
500	0.66	0.72	0.69

地盤は、不透水性の弾性地盤（厚さ 23mm、硬度 40 のゴム板）および砂地盤（鹿島砂、相対密度 70%、透水係数 0.061cm/s）の 2 種類を用いた。

水は水道水を使用した。

載荷は、最大角速度の目標値を表-2.2 に示す値として水平変位速度を制御して行ったが、装置の性能上、一定角速度とはならず、また、実測変位から求めた最大角速度は目標値をやや上回っているので注意しておく。以降の説明には、目標とした角速度の値を用いる。

繰返し載荷の載荷パターンは、図-2.5 のとおりである。

表-2.2 実験ケース一覧表

ケース	止水構造	地盤	水深	载荷条件	载荷速度
1	なし	弾性	30mm	一方向载荷	静的: 0.0001rad/sec (水平変位換算 0.06mm/sec)
2				一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
3				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
4				一方向载荷	動的: 0.1rad/sec (水平変位換算 60mm/sec)
5				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
6				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
7			250mm	一方向载荷	静的: 0.0001rad/sec (水平変位換算 0.06mm/sec)
8				一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
9				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
10				一方向载荷	動的: 0.1rad/sec (水平変位換算 60mm/sec)
11				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
12				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
13			500mm	一方向载荷	静的: 0.0001rad/sec (水平変位換算 0.06mm/sec)
14				一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
15				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
16				一方向载荷	動的: 0.1rad/sec (水平変位換算 60mm/sec)
17				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
18				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
19	なし	砂	30mm	一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
20				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
21				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
22				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
23			500mm	一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
24				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
25				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
26				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
27	止水板	砂	30mm	一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
28				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
29				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
30				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
31			500mm	一方向载荷	動的: 0.005rad/sec (水平変位換算 3mm/sec)
32				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
33				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
34				繰返し载荷	動的 0.005・0.05・0.1rad/sec で各5サイクル(図-2.5 参照)
35	止水ゴム	弾性	500mm	一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
36				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
37			250mm	一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
38				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)
39			150mm	一方向载荷	静的: 0.0001rad/sec (水平変位換算 0.06mm/sec)
40				一方向载荷	動的: 0.05rad/sec (水平変位換算 30mm/sec)
41				一方向载荷	動的: 0.2rad/sec (水平変位換算 120mm/sec)

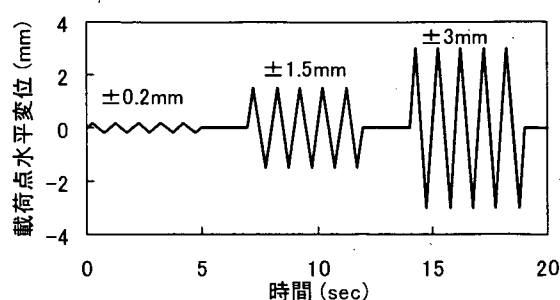


図-2.5 繰返し载荷の载荷パターン

計測の内容は以下のとおりである。

- ・ 載荷荷重（水平荷重）を計測した。
- ・ 載荷点の水平移動量および回転角や沈下量を算出するために脚頭部で 2 箇所の鉛直変位を計測した。
- ・ 図-2.6 に示す基礎底面の 10 箇所に水圧計を埋め込み、基礎浮上り時の水圧変動を調べた。また、砂地盤の場合には、図-2.7 に示す位置に水圧計を設置し、地盤内の間隙水圧も計測した。
- ・ 地盤中には、図-2.8 に示す位置に土圧計を配置し、基礎浮上り時の土圧変動を計測した。

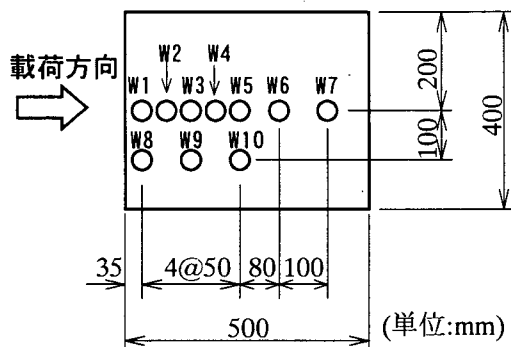


図-2.6 水圧計設置位置

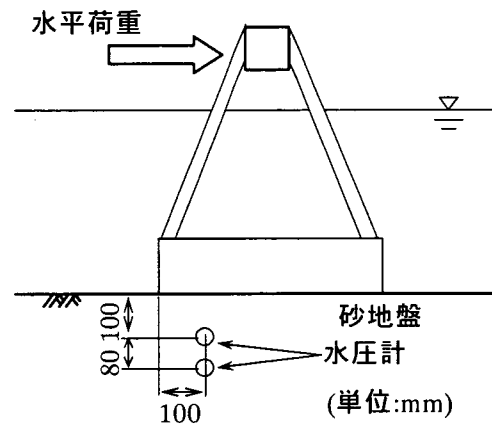


図-2.7 砂地盤中の水圧計

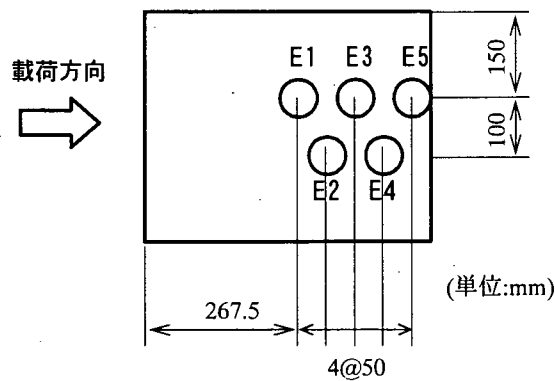


図-2.8 土圧計配置位置

2.3 実験結果

実験は、地盤条件として弾性と砂の2種類について実施したが、ここでは弾性地盤のケースを中心にしてとりまとめる。

2.3.1 基礎の挙動と浮上り抵抗

図-2.9 および図-2.10 に、それぞれケース 17（水深 500mm，角速度 0.2rad/s）における基礎の回転角および抵抗モーメントの時刻歴を示す。回転角は、計測した2点の鉛直変位におけるノイズの影響が大きかったため、これらを多項式で近似し、2点の近似式より求めた。抵抗モーメントは、水平荷重に地盤面から载荷点までの高さ 0.63m を乗じた値である。

0.02sec までは、回転角がほとんど増加していないのに対し、抵抗モーメントはこの時間領域においても増加していることから、このわずかな時間帯において、基礎底面下の水および地盤の弾性変形による水圧変化が生じているものと考えられる。

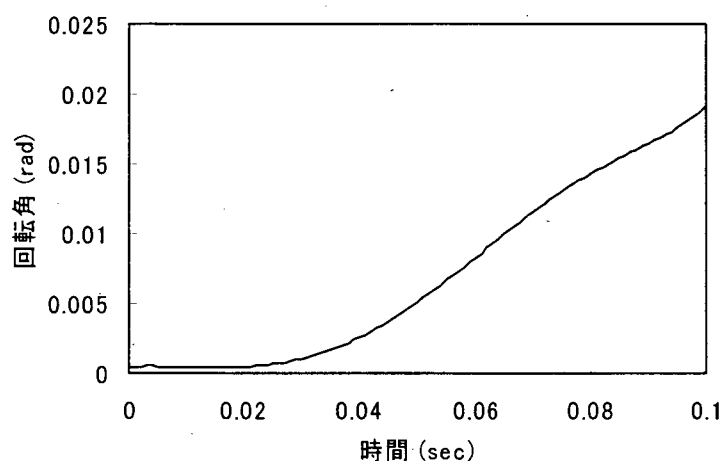


図-2.9 回転角の時刻歴(ケース 17)

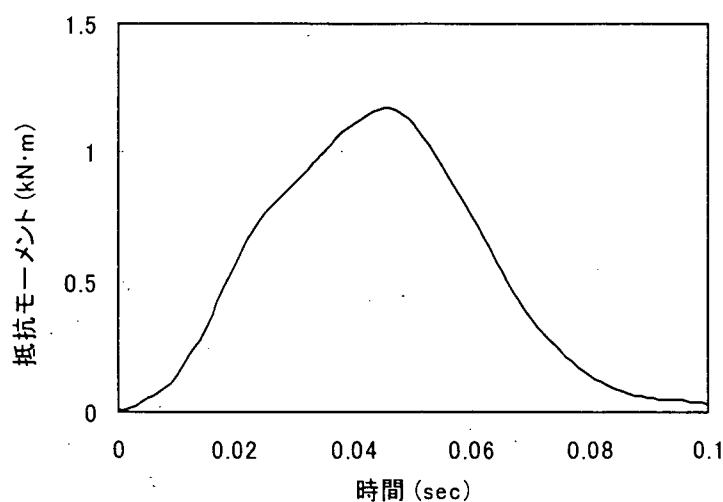


図-2.10 抵抗モーメントの時刻歴(ケース 17)

2.3.2 角速度と浮上り抵抗特性

角速度の異なるケース 15～ケース 17 における抵抗モーメントと時間の関係を図-2.11 に示す。抵抗モーメントのピーク値は、角速度が大きい場合に大きくなる。また、ピークとなる時間は、角速度が小さいほど遅くなる傾向にある。

角速度が大きいケース 17 では、抵抗モーメントが低下した後も、抵抗モーメントが波打つ現象が見られる。模型基礎が载荷後静止した状態での抵抗モーメントは約 0.17kN であるが、それを下回り、回転抵抗がほとんどない状態も現れる。これは、基礎底面下の水が慣性力を持つため、特定の時間帯には、逆に基礎底面を押し上げるように作用するためと考えられる。角速度が大きくなると、基礎底面下への水の流入速度が他のケースより大きいと考えられることから、その影響は顕著に現れるものと思われる。

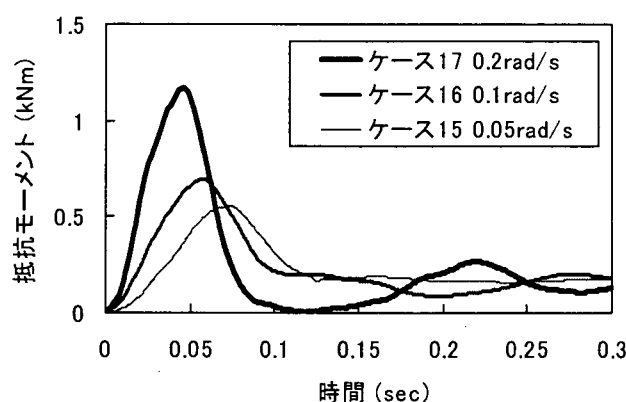


図-2.11 角速度の影響

2.3.3 水深の影響

図-2.12 に、ケース 11 およびケース 17 の抵抗モーメントの時刻歴を示す。水深の大きいケース 17 の方が大きな抵抗モーメントが発揮されている。この理由については 2.3.4 (3) の基礎底面下の水圧変動のところで詳しく述べるが、水深が大きいほど基礎の浮上りに伴う水圧変動量が大きくなるために抵抗モーメントに差が生じているものと考えられる。

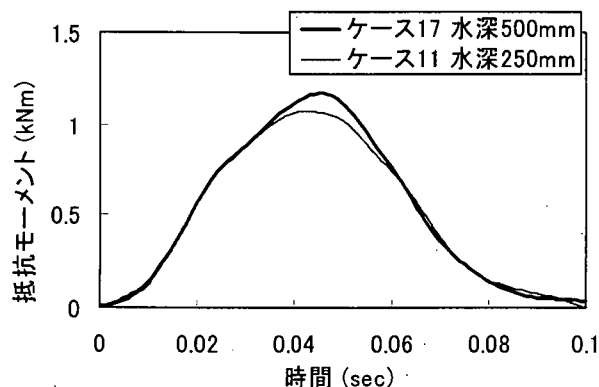


図-2.12 抵抗モーメントの比較

2.2.4 基礎底面下の水圧

(1) 水圧変動

図-2.13 に、ケース 17 における基礎底面下の水圧の時刻歴を示す。以降、水圧の値は大気圧をゼロと扱うものとする。

W1 を除き、負圧のピーク値は、基礎の浮上り端部から離れるにしたがい減少し、また、負圧のピークの発生時刻は、基礎の浮上り端部から離れるにしたがい遅れる様子がわかる。

なお、図-2.13 において W5 の初期値は他の計測点と異なっているが、これは基礎を設置した状態で基礎底面とゴム地盤との密着性が高かったためと考えられる。

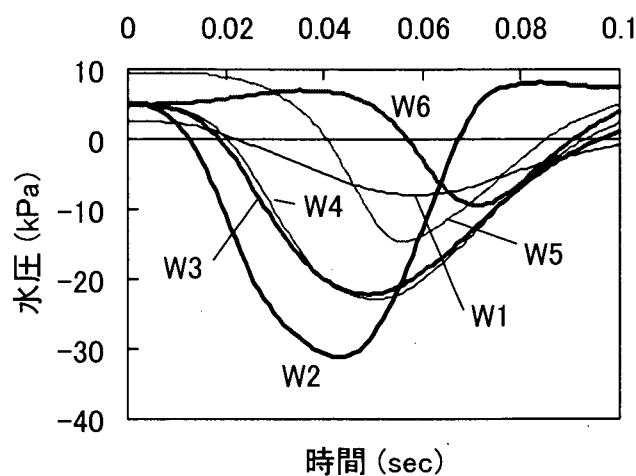


図-2.13 基礎底面下の水圧の時刻歴(ケース 17)

(2) 水圧分布

ケース 17 における載荷方向の水圧分布（基礎中心位置）を図-2.14 に示す。

W1 においては発生した負圧が小さく、それ以外では、基礎の浮上り端から接地端側に向けて負圧は三角形に近い分布となっている。

一方、図-2.15 に、ケース 17 における W3 と W9（基礎浮上り端から 135mm）の水圧の時刻歴を示すが、2 本の水圧の時刻歴曲線はほぼ一致しており、両端部からの流入の影響が少なく、載荷直角方向では等分布に近い水圧分布となると言える。

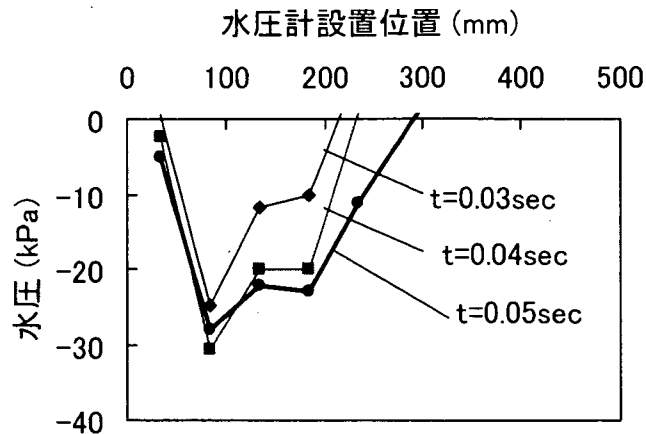


図-2.14 載荷方向の水圧分布(ケース 17)

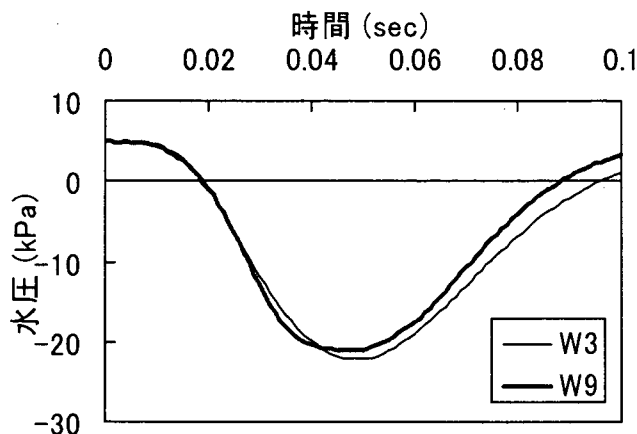


図-2.15 W3 と W9 の水圧の時刻歴(ケース 17)

ここで、抵抗モーメントと基礎底面下の水圧変動との関係について検証する。ケース 17 の $t=0.04\text{sec}$ におけるモーメントの釣合関係を考える。モーメントの中心は、図-2.16 に示すように基礎の接地端とする。載荷直角方向の水圧分布は、計測された水圧の時刻歴を参考に等分布であるものと仮定する。地盤反力度は、基礎自重およびサクシオン力の合計が三角形分布で抵抗するものとする。

表-2.3 は、作用力およびモーメントの内訳を示しているが、載荷に対して抵抗モーメントが大きく不足している。仮に、基礎の浮上り幅が一定で回転運動するものとする、基礎底面下への水の流入速度は直線分布となり(ただし、載荷直角方向からの流入は考えないものとする)、摩擦損失がなく、定常流と考えれば、ベルヌイの定理より水圧変動量の分布は放物線分布となる。したがって、W1 において大きな負圧が計測されていないが、実際には基礎浮上り端付近では大きな圧力低下が生じていることが予想される。表-2.4 は、浮上り端から距離 x の点における水圧変動量 $\Delta p(x)$ を

$$\Delta p(x) = -800(x - x_u)^2$$

ここに、 x_u : 基礎浮上り幅

と仮定した時の作用力およびモーメントの内訳である。また、図-2.17に示した曲線は、仮定した水圧変動量分布である。以上のような仮定により、モーメントの釣合関係が説明できる。W1において計測された水圧には、基礎底面下への流入断面が急縮小する際に発生する非圧流部（図-2.18）の影響が現れたのではないかと考えられる。

なお、ここでは水圧変動量をベルヌイの定理により大まかに仮定したが、基礎の浮上り挙動、基礎底面下の水の動きと水圧変動との関係については、3章で詳細に検討を行う。

表-2.3 計測値による釣合関係

	水平作用力 (kN)	鉛直作用力 (kN)	モーメント (kN・m)
荷 重	1.82	-	1.146
自 重	-	0.66	-0.165
地盤反力	-	-2.68	0.177
サクション	-	2.02	-0.747
モーメント+	-	-	1.323(1.00)
モーメント-	-	-	0.912(0.69)

鉛直作用力は下向きが+、モーメントは時計回りが+

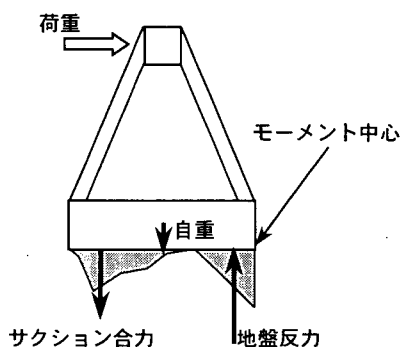


図-2.16 モーメントの釣合

表-2.4 水圧変動量を放物線分布と仮定した場合

	水平作用力 (kN)	鉛直作用力 (kN)	モーメント (kN・m)
荷 重	1.82	-	1.146
自 重	-	0.66	-0.165
地盤反力	-	-3.69	0.244
サクション	-	3.03	-1.199
モーメント+	-	-	1.390(1.00)
モーメント-	-	-	1.364(0.98)

鉛直作用力は下向きが+、モーメントは時計回りが+

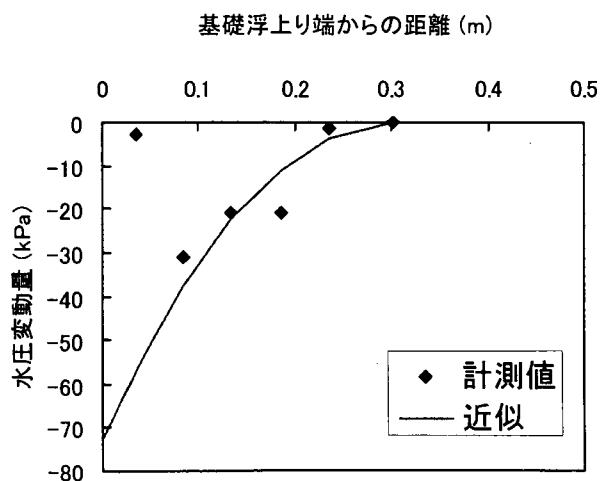


図-2.17 水圧変動量分布の仮定

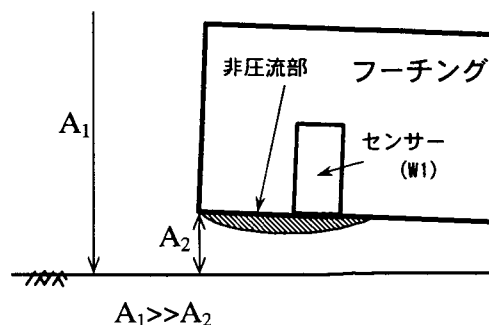


図-2.18 流入断面急縮小の影響

(3) 水深差の影響

図-2.19 に、ケース 11（水深 250mm）およびケース 17（水深 500mm）における計測点 W1～W6 の水圧の時刻歴を示す。ここで、水圧が低下する時間帯における両波形がほぼ一致するようにケース 17 の時間を 0.002sec シフトしてある。

W2～W4 について、水圧がほぼゼロとなったときに両ケースの波形が一致している。また、両波形が一致する時刻は、前述した基礎の回転角がほとんど増加しない 0～0.02sec の時間帯にあり、この時間帯に水深差の影響が解消されたと考えられる。したがって、水深が大きいほど基礎底面下の圧力変動量は大きくなると考えることができる。

次に、解消された水深差に相当する水圧差が再現し始める時刻に着目し、水圧の伝播速度を評価する。図-2.19 において、解消された水圧差は、負圧のピーク値が発揮される時刻付近から再現し始める。図-2.20 に、W2～W6 におけるケース 11 とケース 17 との水圧差の時刻歴を示す。また、傾向が分かりやすいケース 10 とケース 16 との水圧差の時刻歴も図-2.21 に示すが、両図より解消された水圧差が再現し始める時刻（図中に示した▲の時刻）は基礎端部からの距離に応じて遅れていく傾向が見られる。ケース 10 とケース 16 の場合で、例えば W3 と W6 における水圧差が再現し始める時刻から水圧の伝播速度を求めると、3m/s 程度となる。定常状態の流体における圧力波は、流路断面が一定の場合には音速(約 1,500m/s)で伝播するが、これらの図から、基礎底面下の水圧は音速に比べ非常に低速で伝播することが確認できる。この原因については 3.3 で検討する。

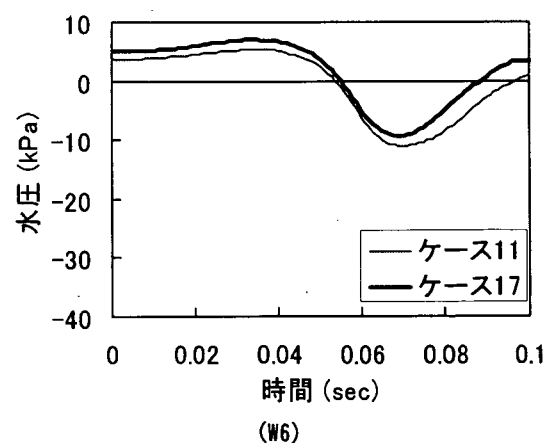
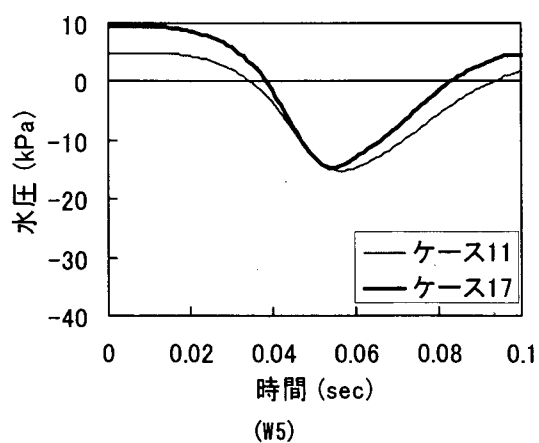
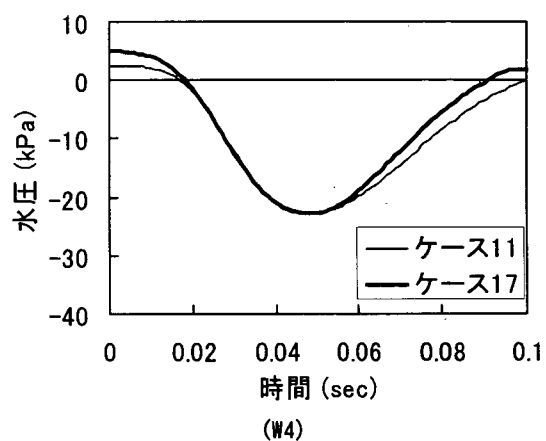
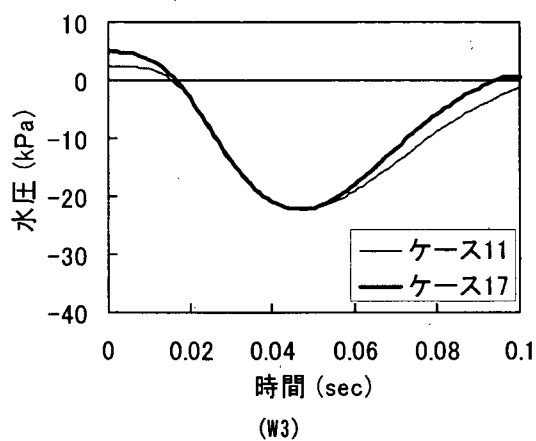
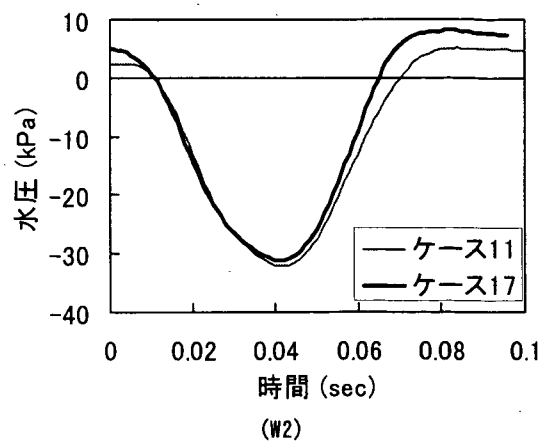
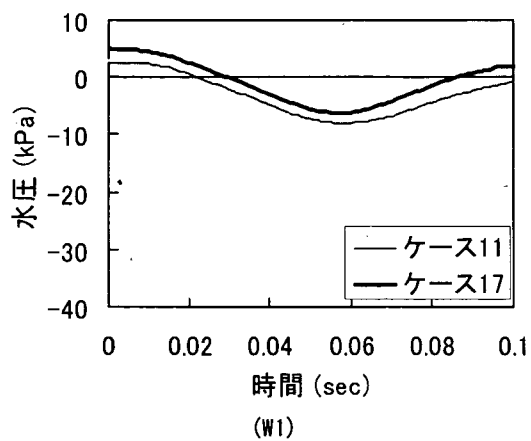


図-2.19 水圧の時刻歴 (水深差の影響)

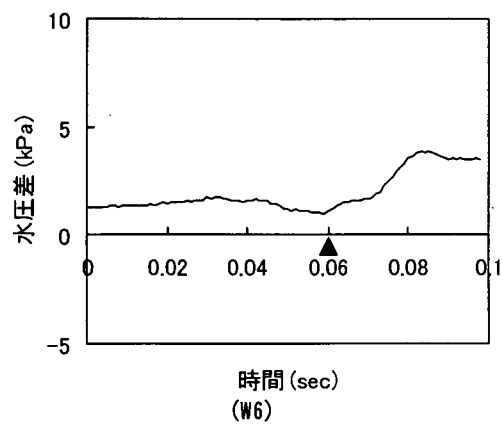
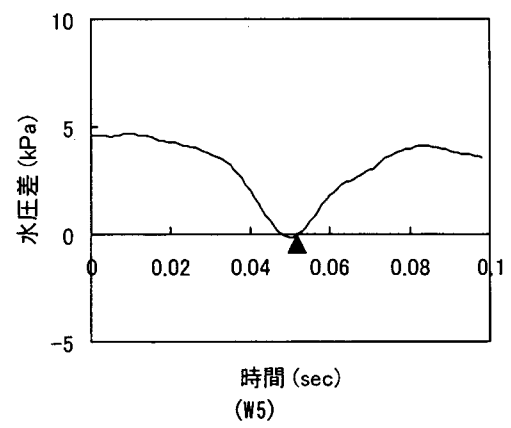
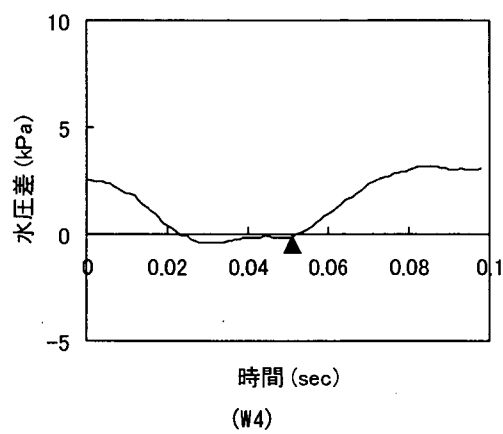
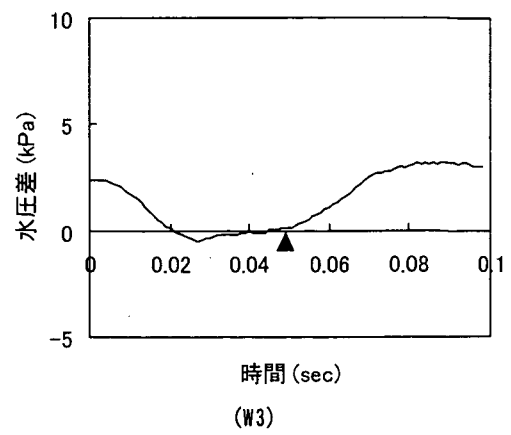
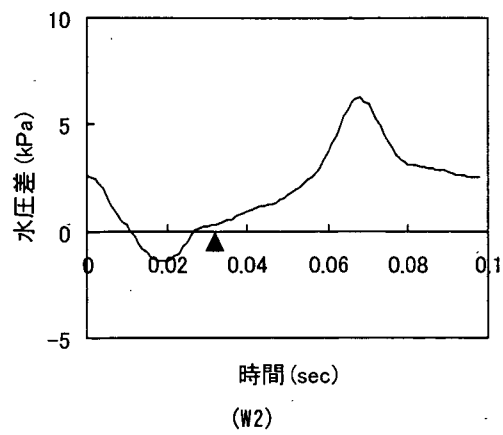


図-2.20 水圧差(ケース 11 とケース 17)の時刻歴

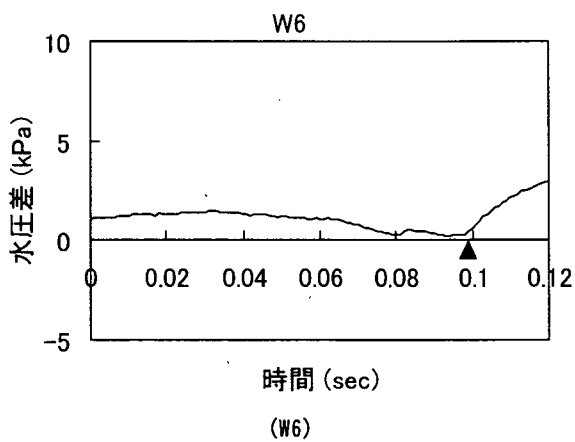
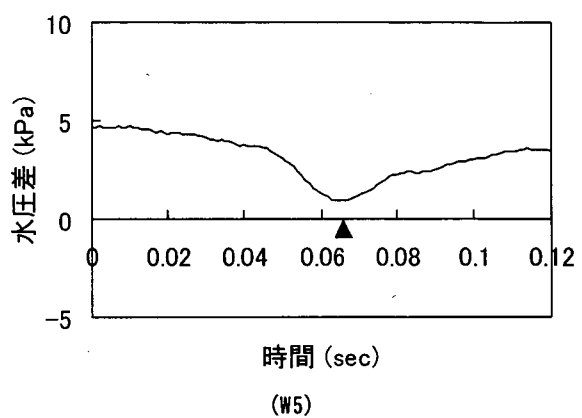
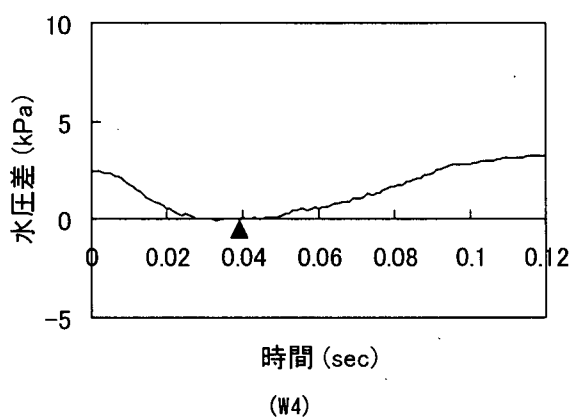
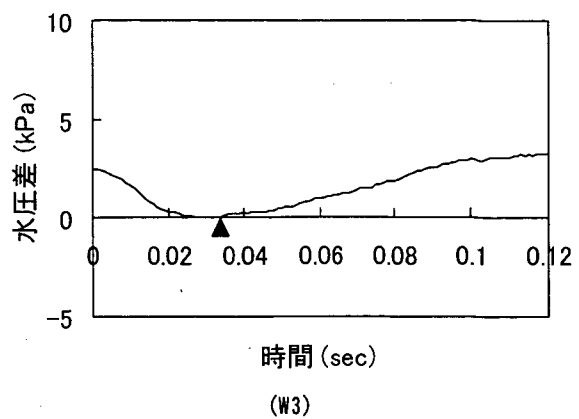
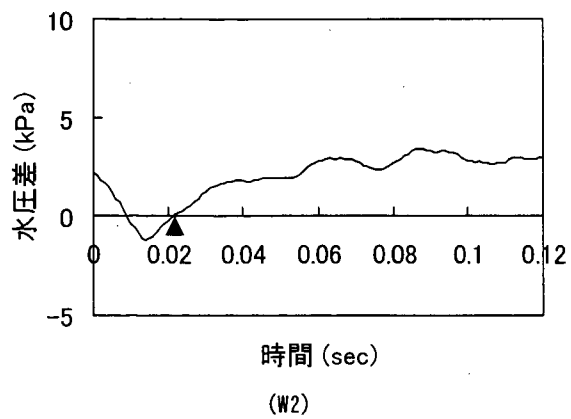


図-2.21 水圧差(ケース 10 とケース 16)の時刻歴

2.3.5 地盤条件の違い

図-2.22 に、ケース 17（弾性地盤）とケース 25（砂地盤）における抵抗モーメントの時刻歴を示す。弾性地盤に比べ、砂地盤はほとんどサクションの影響を受けない結果となっている。図-2.23 に、ケース 25 における基礎底面下の水圧の時刻歴を示すが、図-2.13 に示したケース 17 に比べて発生している水圧変動量はわずかである。図-2.24 に、ケース 25 の地盤内水圧の時刻歴を示すが、間隙水圧にも変動が現れており、基礎の浮上りによる基礎底面下の空隙への水の流入が、弾性地盤の場合には基礎端部からのみ生じるのに対し、砂地盤では基礎直下地盤内からも生じたことがわかる。このためにケース 25 の抵抗モーメントが小さくなったと考えられる。

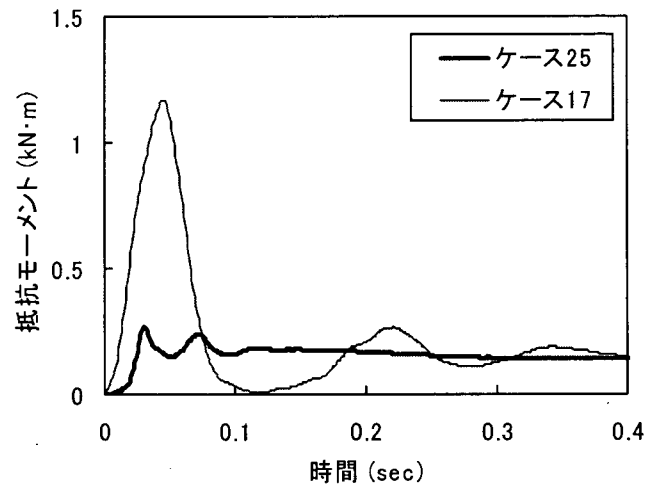


図-2.22 地盤条件の違い

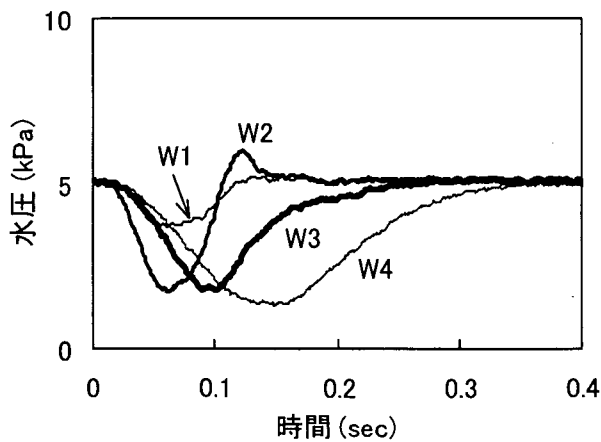


図-2.23 水圧の時刻歴(ケース 25)

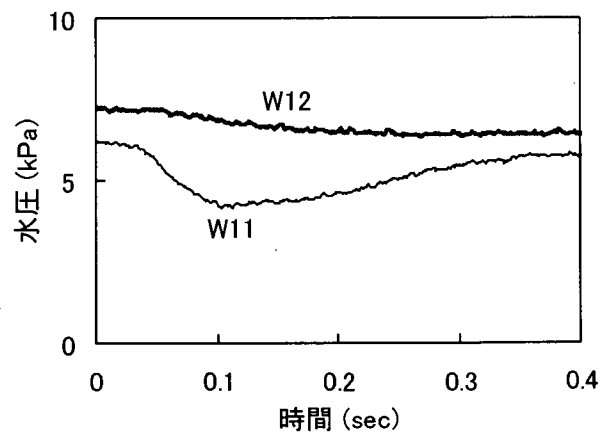


図-2.24 地盤内の水圧変動(ケース 25)

2.3.6 止水の効果

図-2.25 に、ケース 36 の抵抗モーメントの時刻歴を示す。ゴム板を止水のために取り付けたケースは、ゴム板にもサクションが作用するため、止水構造なしのケースと抵抗モーメントを直接比較できないが、図-2.10 に示したケース 17 に比べ相当大きな抵抗モーメントが発揮されている。この構造では完全な止水状態となっていないことが考えられ、抵抗モーメントは、ピーク後徐々に低下していくものの、止水なしのケースとは異なり、抵抗モーメントが保持される。1.2sec 付近で急激に抵抗モーメントが低下するが、これは止水構造のゴム板が基礎底面に巻き込まれたのが確認されており、内部に水が流入したためと考えられる。

次に、ケース 36 の水圧の時刻歴を図-2.26 に示す。止水構造が剛な構造でないため（図-2.27 参照）、真空状態(約-100kPa)には至っていないが、止水の効果によりこれに近い負圧が発生している（この構造における負圧のほぼ上限と考えられる）。図-2.26 には、W1～W4 の計測値を示しているが、どの計測点においても負圧の最大値はほぼ同じになっている。

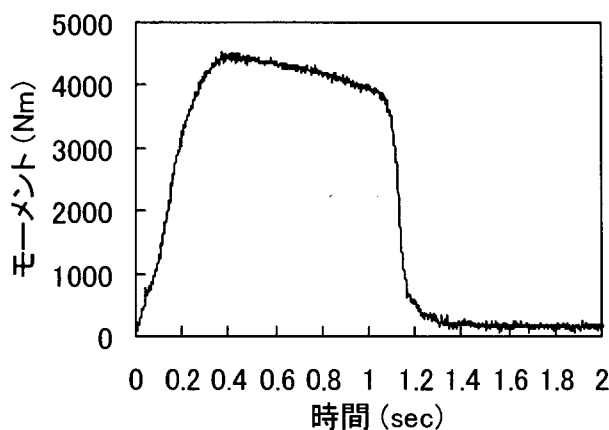


図-2.25 抵抗モーメントの時刻歴(ケース 36)

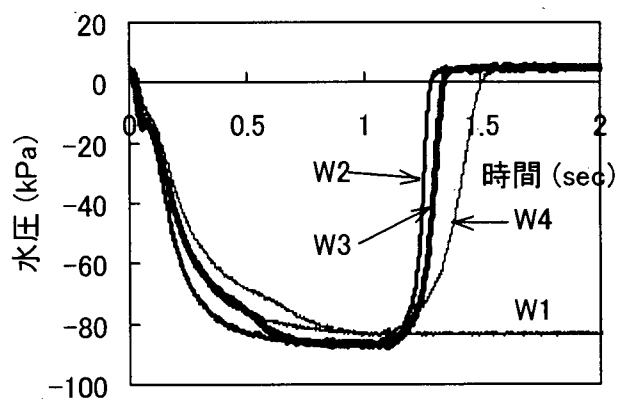


図-2.26 水圧の時刻歴(ケース 36)

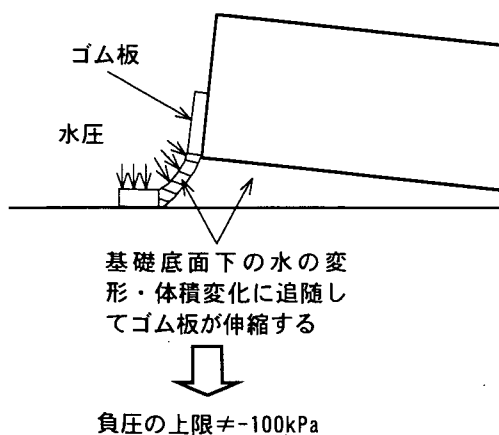


図-2.27 止水構造と負圧の上限

2.3.7 正負繰返し载荷

载荷は、目標とする角速度を 0.005, 0.05, 0.1rad/s として変位制御で図-2.28 に示すように 3 ステップ(制御変位: 0.2mm, 1.5mm, 3mm)をそれぞれ 5 サイクルずつ行った。なお、ここで示す回転角の値は、水平変位の実測値を 21 点の移動平均で近似し、地盤面から载荷点までの高さ 630mm で除したものである。

図-2.29 に、第 2 ステップおよび第 3 ステップにおける抵抗モーメント-回転角の履歴曲線を示すが、減衰が現れていることがわかる。仮に線形ばね定数を各ステップ第 2 サイクル目における抵抗モーメント最大点および最小点を結ぶ直線の傾きとして等価減衰定数を算出すると、第 2 ステップで 0.66, 第 3 ステップで 0.43 となる。

第 3 ステップの最初の 1/2 周期の履歴については、他の履歴曲線と乖離している。これに関して、第 3 ステップの基礎中心位置における鉛直変位の時刻歴を図-2.30 に示すが、回転角がゼロの時に 0.1mm 程度基礎が浮き上がった状態となっており、基礎浮上の際に底面下に回り込んだ水が基礎降下後に残留したことが影響しているものと考えられる。基礎底面の隙間と水圧変動量の関係については以降で検討する。

次に、第 2 ステップにおける W2 (浮上り端部より 85mm) の水圧と回転角との関係を図-2.31 に示す。これを見ると、基礎の浮上り時に負圧が発生するのみではなく、基礎の降下時に高い正の水圧が発生するのがわかる。この正圧は、基礎の降下開始と同時に増大するのではなく回転角が小さくなった状態で増大し始める。これは、回転角が小さい時ほど水の流出断面が小さいために流出が遅れ、基礎底面下の隙間体積に対する隙間の体積変化量が大きくなるためと考えられる。本来、負圧についても同様のことが言えるが、2 サイクル目において負圧が増大し始めるのは同図では回転角が小さい時ではなく、回転角が増大し始めたと同時にとなっている。これは、水が基礎底面下に残留していることが原因と予想される。

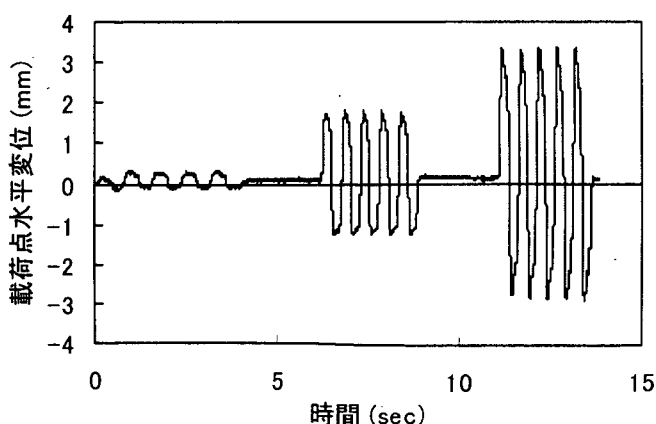


図-2.28 载荷点水平変位(ケース 18 の実測値)

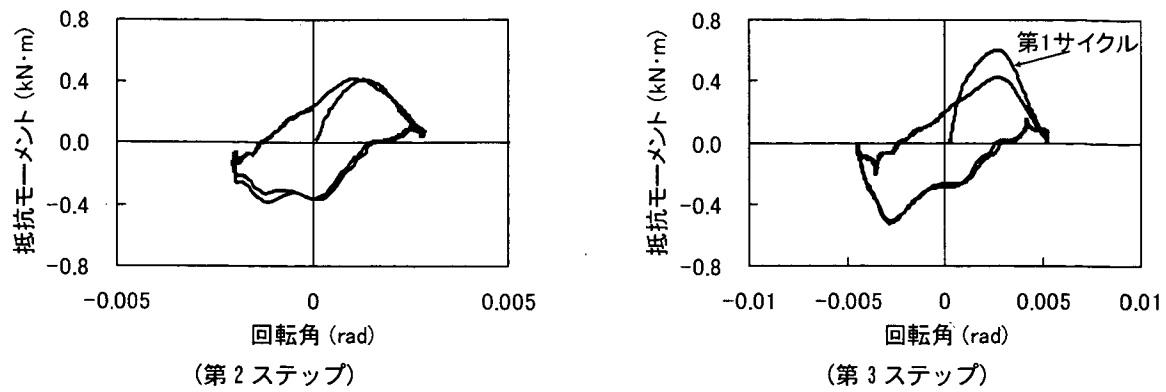


図-2.29 抵抗モーメント-回転角関係

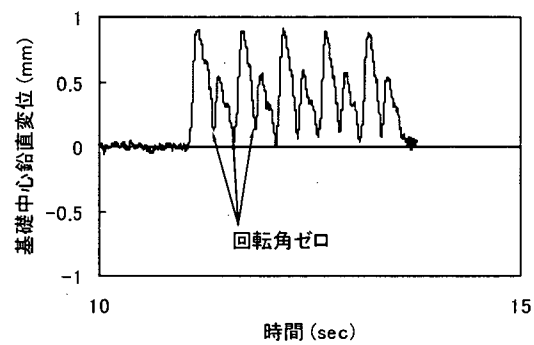


図-2.30 鉛直変位の時刻歴 (第3ステップ)

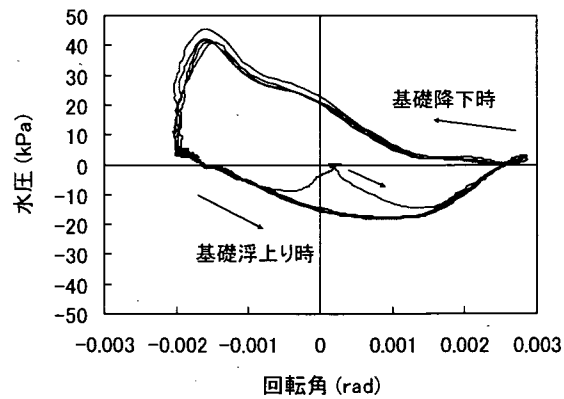


図-2.31 水圧(W2)-回転角関係

第3章 サクション推定方法の検討

ここでは、解析的に実験結果を再現する。地盤が不透水性であるという条件で、基礎が浮き上がる際に水が浮上り端部のみから基礎底面下に流入する場合を考えるものとし、検討は、ケース 16 および ケース 17 の条件に対して行うものとする。

3.1 計測データの処理

基礎の挙動と発生するサクションの関係を検討するにあたり、入力値となる上記ケース 16、ケース 17 の基礎の動きに関するデータを整理する。

鉛直変位の計測値は、ノイズ成分が大きく、直接これらのデータを用いて回転角や角速度、基礎浮上り量などを算出することができないため、2 点の鉛直変位のデータを 6 次の多項式で最小二乗近似した。また、基礎の浮上り幅をこの鉛直変位のデータから算出すると、回転角が微小の時に非常に精度が悪いため、計測した土圧から浮上り量（断続的なデータ）を求め、上記 2 点の鉛直変位の近似式より求まる回転角との関係をさらに累乗近似で与えた。

(1) 鉛直変位

浮上り側の鉛直変位 D_{vf} (mm) および基礎接地側の鉛直変位 D_{vr} (mm) を時間 t (sec) に関する多項式で近似した結果は表-3.1 のとおりである。

表-3.1 鉛直変位算定式

ケース	D_{vf}	D_{vr}	使用データ
16	$7763083.2918t^6$ $-2667308.3452t^5$ $+288247.8523t^4$ $-8444.5943t^3$ $-14.4036t^2$ $+3.2829t$ $+0.0013$	$-1649512.7498t^6$ $+384975.7430t^5$ $-34810.5554t^4$ $+2409.6926t^3$ $-24.8941t^2$ $-1.5525t-0.0080$	-0.02～ 0.12sec
17	$37274914.36060t^6$ $-9428549.89660t^5$ $+694088.25446t^4$ $-6303.70293t^3$ $-242.96015t^2$ $+3.26222t$ $+0.04639$	$14613684.68066t^6$ $-4382557.51819t^5$ $+400134.34923t^4$ $-8277.52849t^3$ $-60.25379t^2$ $+2.10789t$ -0.00192	-0.02～ 0.1sec

(2) 回転角

回転角 θ は、2 点の鉛直変位の計測間隔が 100mm であることより

$$\theta = (D_{vf} - D_{vr}) / 100 \quad (3-1)$$

で与えられる。

図-3.1 に、ケース 16 およびケース 17 の回転角 θ の時刻歴を示す。

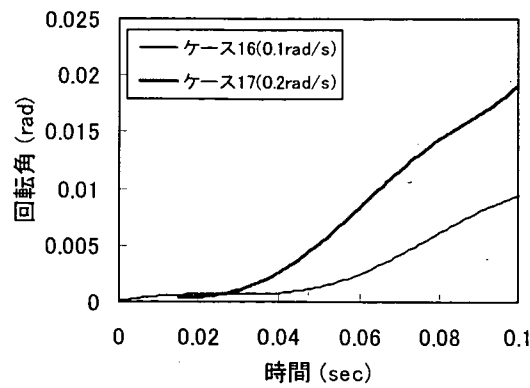


図-3.1 回転角の時刻歴

(3) 基礎浮上り幅の時刻歴

基礎浮上り幅 x_u は、本来であれば2点の鉛直変位から求めるべきであるが、浮上り量が小さい時の精度が非常に悪いため、計測した土圧がゼロとなった時の土圧計設置位置と回転角 θ の関係より近似式を作成した。

表-3.2 基礎浮上り幅算定式

	近似式	R ² 値
C16	$x_u = 792.68\theta^{0.1464}$	0.919
C17	$x_u = 981.66\theta^{0.1979}$	0.9582

図-3.2 に、ケース 16 およびケース 17 の x_u - θ 曲線を示す。

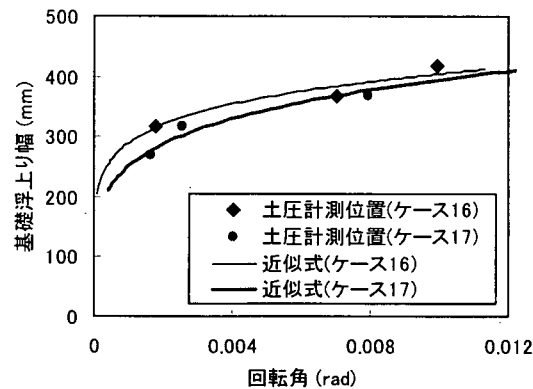


図-3.2 基礎浮上り幅-回転角関係

3.2 基礎底面下への水の流入速度に依存する水圧変動

基礎側面からの水の流入が考えられるが、載荷方向に基礎中央および中央から 100mm における水圧を比較すると、大きな水圧差が見られないため、ここでは 2 次元問題として、解析による実験結果の再現を行った。

まず、図-3.3 に示すように x - y 座標をとる。

2 次元問題における Navier-Stokes の運動方程式は、

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= F_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu}{3\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial x} + \nu \nabla^2 u \\ \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= F_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\mu}{3\rho} \frac{\partial \varphi}{\partial y} + \nu \nabla^2 v\end{aligned}\quad (3-2)$$

で表される。ここに、

- u, v : x, y 方向の速度成分
- ρ : 流体の密度
- p : 平均圧力
- F_x, F_y : 単位質量に対する質量力
- μ : 粘性係数
- ν : 動粘性係数 (μ/ρ)

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}$$

$$\varphi = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

ここで、非圧縮性流体に限定すると、

$$\varphi = 0 \quad (3-3)$$

となる。また、定常流であると考え、

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (3-4)$$

となる。質量力は作用していないので、

$$F_x = F_y = 0 \quad (3-5)$$

地盤と基礎底面間の隙間は小さく、 ν は非常に小さいことから、運動方程式のうち第 2 式は無視し、また、隙間の傾斜が小さく、 y 方向にのみ粘性が影響する考えると、運動方程式の第 1 式は、

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0 \quad (3-6)$$

となる。これを

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \int_0^x \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dX \right) = 0 \quad (3-7)$$

と書き替え、カッコ内を取り出すと、

$$\frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho} - \int_0^x \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} dX = C \quad (3-8)$$

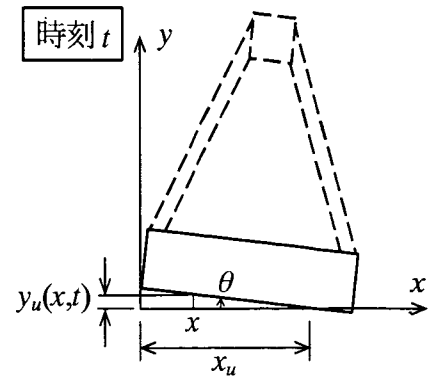


図-3.3 座標系の設定

となる。ここに C は積分定数である。

境界条件として、基礎底面下の隙間に水が流入し始める時、 $x=0$ において式(3-6)の左辺第 1, 3 項はゼロであり、この時の水圧を p_0 とすると、

$$C = p_0 / \rho \quad (3-9)$$

となる。

次に、式(3-8)の左辺第 3 項を考える。

基礎端から距離 x の位置における基礎の浮上り量 $y_u(x)$ は、図-3.3 に示した基礎の浮上り幅 x_u 、基礎の回転角 θ として、

$$y_u(x) = (x_u - x)\theta \quad (3-10)$$

また、 $x=x \sim x_u$ 間の基礎底面下の隙間の体積 $V_{lm}(x)$ は、基礎奥行きを D 、浮き上がる前に存在する隙間を y_0 (一定値とする) として、

$$V_{lm}(x) = \frac{x_u - x}{2} (y_u(x) + 2y_0) D \quad (3-11)$$

となる。2 次元問題として扱っていることから、基礎側面からの水の流入はないものとし、浮上り端から距離 x の位置における水の流入量 $Q(x)$ および平均流入速度 $\bar{u}(x)$ は、

$$Q(x) = \frac{\partial V_{lm}}{\partial t} \quad (3-12)$$

$$\bar{u}(x) = \frac{Q(x)}{(y_u(x) + y_0) D} \quad (3-13)$$

で与えられる。

基礎底面下の隙間の傾斜は小さく、基礎底面および地盤面での流速はゼロであることより、ある断面における y 方向の流速分布 (図-3.4 参照) は、

$$u(x, y) = ay \{y - [y_u(x) + y_0]\} \quad (3-14)$$

で表される。ここで、 a は定数である。

平均流速 $\bar{u}(x)$ は、

$$\begin{aligned} \bar{u}(x) &= \frac{1}{y_u(x) + y_0} \int_0^{y_u(x) + y_0} u(x, y) dy \\ &= -\frac{a}{6} (y_u(x) + y_0)^2 \end{aligned} \quad (3-15)$$

であり、これより求めた a を式(3-14)に代入して、

$$u(x, y) = -\frac{6\bar{u}(x)}{(y_u(x) + y_0)^2} y \{y - [y_u(x) + y_0]\} \quad (3-16)$$

となる。式(3-8)の左辺第 3 項を F (摩擦損失水頭) とすると、

$$F = \int_0^x \frac{12\bar{u}(x)}{(y_u(x) + y_0)^2} dX \quad (3-17)$$

で表される。 $\bar{u}$ が x の関数であり、 F の積分は不可能なため、数値積分により計算を行うことになる。また、時間とともに断面が変化 (ある断面をある時刻に通過した水がその後通過する断面は時間と

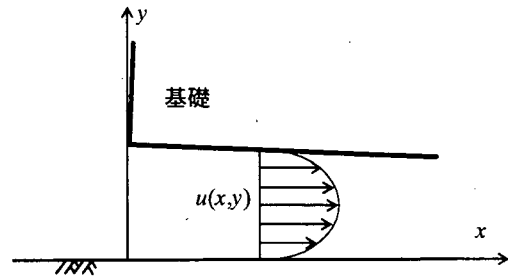


図-3.4 流速分布

もに拡大)することを考慮して摩擦損失を算出する必要がある。

数値積分の具体的な方法については、図-3.5 に示すように、水がある時刻 t に基礎端部から x の断面を速度 $u(t)$ で通過するものとして考える。時刻 t は、微小時間間隔 Δt を用いて、

$$t = i\Delta t \quad (i=0 \sim n) \quad (3-18)$$

と表現する。微小時間 Δt に水が進む距離 Δx は、

$$\Delta x(i\Delta t) = \bar{u}(i\Delta t)\Delta t \quad (3-19)$$

であり、時間の関数である。式(3-17)を書き替え、

$$\begin{aligned} F &= -\sum_{i=0}^{n-1} \frac{12\nu\bar{u}(i\Delta t)}{(y_u(i\Delta t) + y_0)^2} \Delta x(i\Delta t) \\ &= -\sum_{i=0}^{n-1} \frac{12\nu\bar{u}(i\Delta t)^2}{(y_u(i\Delta t) + y_0)^2} \Delta t \end{aligned} \quad (3-20)$$

と表すことができる。なお、基礎端から距離 x までの摩擦損失を考える場合に、 $0 \rightarrow x$ へ積分するよりも $x \rightarrow 0$ へ積分する方が計算が容易であることから、式(3-19)は、

$$\Delta x(i\Delta t - \Delta t) = \bar{u}(i\Delta t)\Delta t \quad (3-21)$$

とし、式(3-20)は、

$$F = -\sum_{i=1}^n \frac{12\nu\bar{u}(i\Delta t)^2}{(y_u(i\Delta t) + y_0)^2} \Delta t \quad (3-22)$$

と表す。

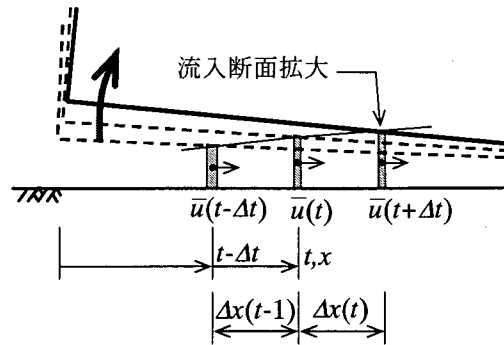


図-3.5 水の動き

3.3 水深差の影響

3.2 の流入水の流速に依存する水圧変動の評価では、2.3.4 で示した水深が大きいほど基礎底面下の水圧変動量が大きい現象を説明できない。

図-2.9 に示した実験での基礎の回転角の時刻歴は、載荷開始から約 0.02sec までほとんど変化せず、それ以降に増大し始めている。一方、図-2.19 に示した水圧の時刻歴では、時刻 0.02sec 頃までにいくらかの水圧低下が生じ、水深の異なるケース 11 とケース 17 において載荷開始時にあった水圧差 2.5kPa が、基礎がほとんど浮上っていない（流入水の流速が小さい）この時間帯に解消されたものと考えることができる。これは、水が非圧縮性のため、非常にわずかな基礎の変位（浮上り）が起これただけでも基礎底面下の水圧が大きく変動することに起因した現象と考えられる。厳密には、水の体積変化による水の圧力とゴム地盤の接地圧との釣合関係を考える必要があり、今回の実験では水より剛性の低い（弾性係数の小さい）ゴム地盤の剛性が水圧変動に支配的となっているものと考えられる。本実験の結果では、水圧差がなくなった時の圧力がほぼ大気圧となっているが、地盤の剛性によって水圧差の解消の過程も変わってくることが予想されるので、今後、水と地盤の剛比に着目した実験的検討が必要である。

次に、解消された水深差による水圧差が再現される過程での水圧の伝播について検討する。

上記のように水深差による水厚差が解消されたとしても、水中での圧力の伝播速度は約 1500m/s（音速）と非常に高速であり、瞬時に基礎周囲の水圧が伝播して元の水圧差が回復すると思われる。しかし、図-2.20、図-2.21 にケース 11 とケース 17 との水圧差およびケース 10 とケース 16 との水圧差の時刻歴を示したが、水圧差がゼロとなった後、元の水圧差に戻り始める時刻は基礎浮上り端部からの距離に応じて遅れ、この遅れの程度から水圧の伝播速度が水中での圧力の伝播速度に比べて非常に低速であることが確認された。これは、流路断面が時間とともに変化（拡大）することに起因するものと考えられる。

図-3.6 は等速に水が流れる管路の末端に閉塞器を設けたモデルである。水の流速、弾性係数、密度、管の弾性係数、内径および肉厚をそれぞれ v 、 E_v 、 ρ 、 E 、 D 、 δ として、弁の閉塞による圧力変化に起因する管の変形を考慮した波動方程式は、

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} \quad (3-21)$$

ここに、

$$c = \sqrt{\frac{E_v}{\rho} \left/ \left(1 + \frac{E_v}{E} \frac{D}{\delta} \right) \right.} \quad (3-22)$$

で表される¹⁾。 c は水撃圧の伝播速度であり、管の剛性が ∞ の場合、 $c = \sqrt{E_v / \rho}$ となり、これは水中における音速にあたる。

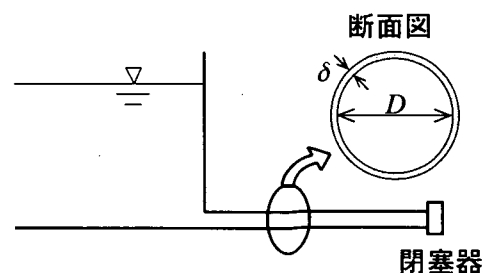


図-3.6 閉塞器付きの管路

今回の実験においても、水の流入が始まる時点で基礎底面下と基礎周囲の水圧とに差があり、基礎周囲の水圧の基礎底面下への伝播速度はこの c と同様に考えることができる（ただし、式(3-21)の波動方程式は、 $c \gg v$ の条件で与えられた式であり、今回の実験条件について説明するには厳密ではない）。

式(3-21)における $E\delta$ は、管の断面内の剛性を表しているが、本実験の場合、流入断面の変化（拡大）は水の弾性変形レベルに比べて相当大きいことから、管の断面内の剛性 $E\delta$ はほぼゼロと考えられ、この場合 c はゼロとなる。したがって、基礎周辺水圧の底面下全体への伝播は、水撃圧の伝播のような高速度では起こらないと言える。

図-3.7 は、基礎端部からの水の移動距離 x と x に到達するまでの時間との関係を示したものである。図中の計算値の曲線は、ケース 17 で計測された模型基礎の挙動に対し、時刻 0.02sec に流入を開始した水の移動距離と到達時間の関係を計算したものであり、実験値は、図-2.20 に示した記号 ▲ の時刻と水圧計設置位置の関係を示している。両者は概ね一致しており、水深に応じた水圧は、水の流入速度と同程度の速度で伝播するものと考えられる。

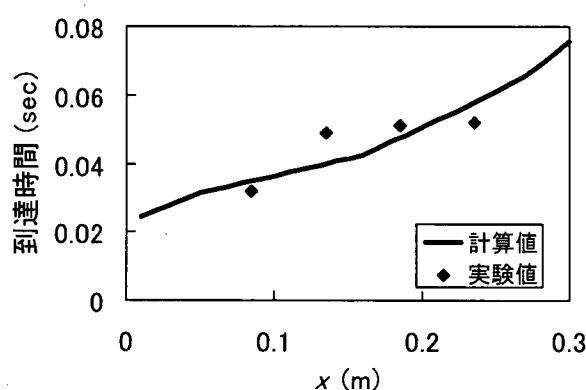


図-3.7 基礎周辺水圧の到達時間(ケース 17)

以上のように、基礎の浮上りにより瞬間的な圧力の低下が起こることと、周辺の水圧の伝播速度が低速であることから、水深差の影響が表れると考えられる。

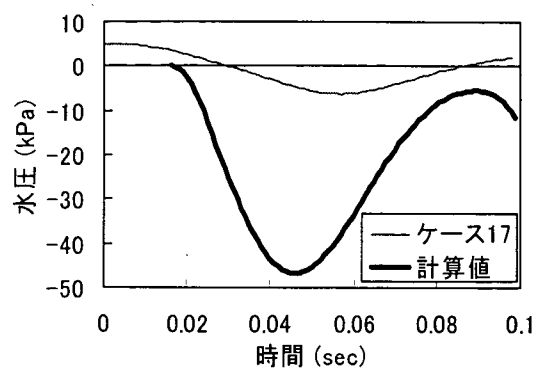
3.4 水圧変動量の推定

3.1 で近似した鉛直変位 y_u および浮上り幅 x_u を用い、3.2 で示した方法により求めた水圧計設置位置における基礎底面下水圧変動を図-3.8 および図-3.9 に示す。計算にあたり、入力値となる基礎の挙動については、角速度 0.2rad/s の場合はケース 17, 0.1rad/s の場合はケース 16 の計測値を近似した回転角および基礎浮上り幅の時刻歴を用いた。浮上り前の基礎底面下の隙間 y_0 には 1mm を与えた。なお、ここでは、水深差の影響は考慮していない。

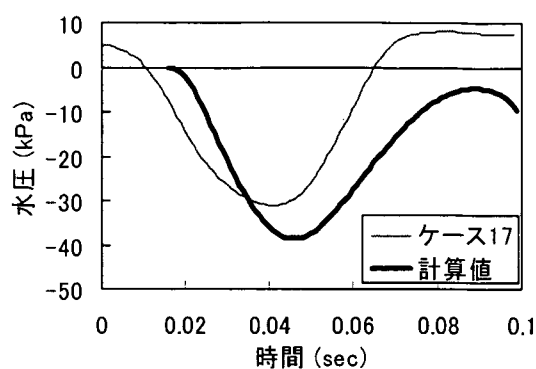
角速度 0.2rad/s の場合、負圧のピークの発現時期が基礎浮上り端部からの距離に応じて遅れ、また、負圧のピーク値が基礎端部に近いほど大きいという傾向は再現できており、W2~W4 における負圧の時刻歴波形は実験値に近いものになっていると思われる。

0.1rad/s の場合、負圧ピークの発現時期および負圧ピーク値ともに計算値と実験値に若干の差があるものの、ピークの発現が基礎端部からの距離に応じて遅れ、基礎浮上り端部に近いほど大きな負圧が発生するという傾向は再現できている。

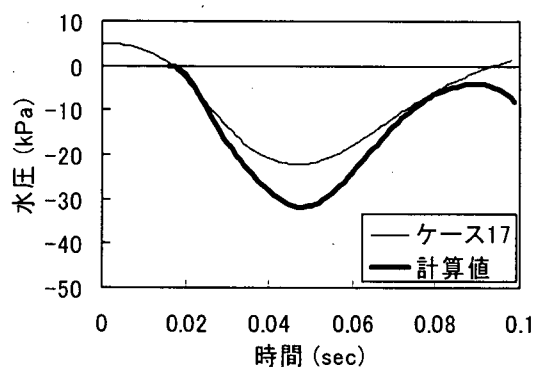
図-3.10 に、 0.2rad/s の場合における基礎底面下の水の流速の時刻歴（計算値）を示す。基礎浮上り端部からの距離に応じて流速のピーク値は少しずつ遅れ、負圧のピーク値が遅れる現象と対応している。



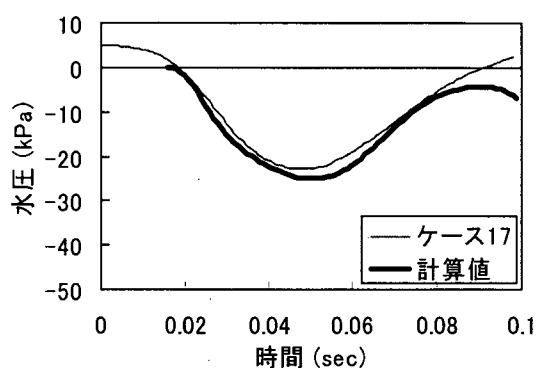
(a) W1



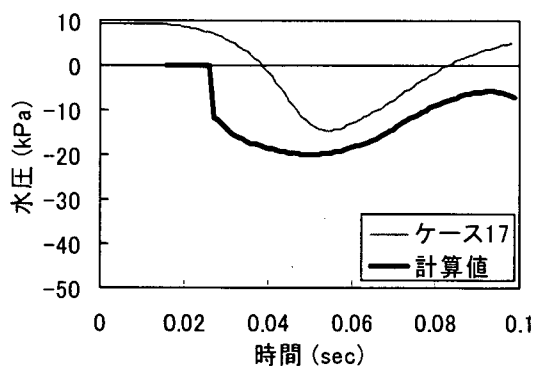
(b) W2



(c) W3

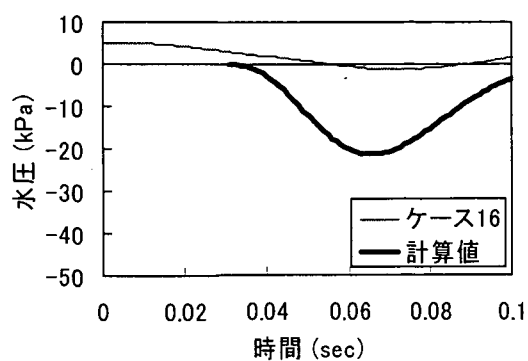


(d) W4

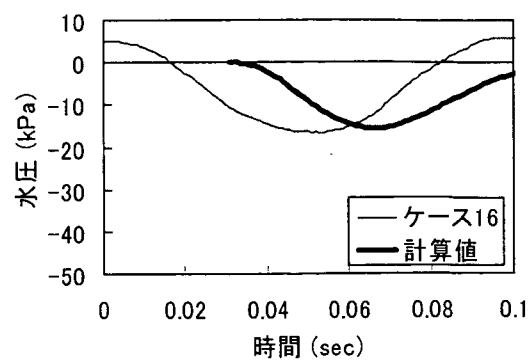


(e) W5

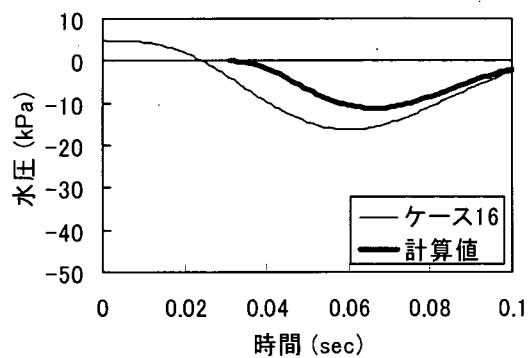
図-3.8 水圧変動の計算値(0.2rad/s)



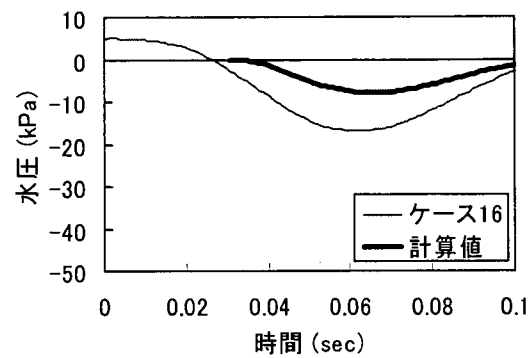
(a) W1



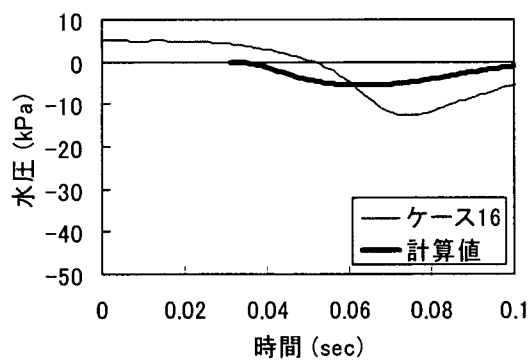
(b) W2



(c) W3



(d) W4



(e) W5

図-3.9 水圧変動の計算値(0.1rad/s)

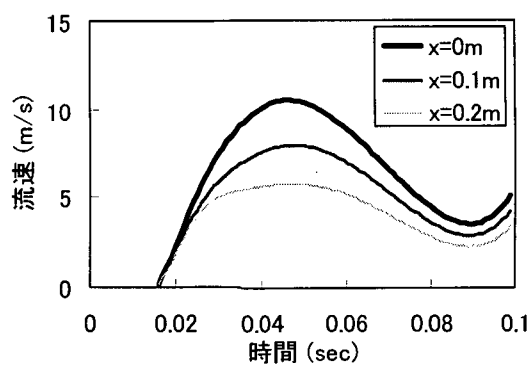


図-3.10 流速の時刻歴(ケース 17)

3.5 浮上り前の隙間の影響

3.4 の水圧変動量の推定において、浮上り前の基礎底面下の隙間を仮定したが、この隙間の与え方によって負圧最大時の水圧および摩擦損失による水圧の計算値がどのように変化するかを示したものが図-3.11 である。3.4 では、浮上り前の基礎底面下の隙間 y_0 に 1mm を与えたが、 y_0 を小さくすると、 y 方向の流速の変化が大きくなるために発生する摩擦損失が大きくなる。摩擦損失は、流れる距離に応じて大きくなるため、基礎浮上り端からの距離が大きいほど全水圧変動量に占める摩擦損失分の割合は大きくなる。以上のように、基礎底面の状態により生じる圧力変動量が変わると考えられるので、実基礎における初期の基礎下面の状態、あるいは繰返し荷重を受けた場合の状態等をさらに検討する必要がある。

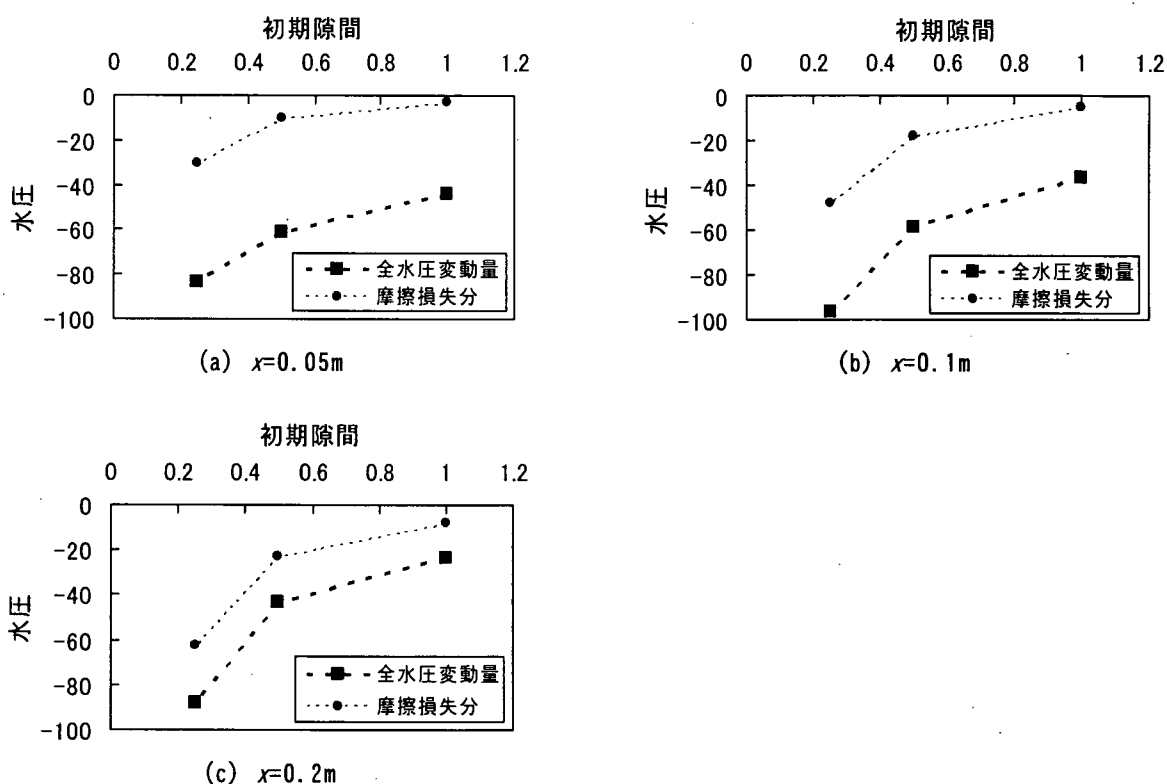


図-3.11 基礎底面の初期の空隙と摩擦損失

3.6 サクシヨンの上限

3章では、不透水性地盤上の基礎を対象として基礎の浮上りと発生するサクシヨンの関係を解析的に検討した。基礎が浮上り、基礎底面下に水が流入する過程で底面下に生じる水圧変動特性は、Navier-Stokes の運動方程式による2次元問題として扱うことで概ね予測することができ、基本的に流入水の流速に依存することが確認された。この流速は、基礎の浮上り挙動（角速度）に依存するものである。

なお、ここでの検討では、死荷重時（浮上り前）の基礎底面下の隙間の状態と発生するサクシヨンの大きさの関係や、水深の違いにより発生するサクシヨンの大きさが異なるということに対し、地盤

の剛性が異なる場合の影響等を十分に確認・検証できていないことから、今後、これらの影響についてさらに検討を行う必要がある。

基礎底面下の水圧の変動量が流速に依存することを示したが、本資料の冒頭に示した水圧の下限値の存在を考慮すれば、基礎の角速度がある限界を超えると基礎底面下が真空状態となり、発生するサクション量が上限となる。この状態では発生するサクションは流速・基礎の角速度の大きさとは無関係となり、したがって基礎の角速度の大きさにより2つの状態が存在するものと考えることができる。2章に示した実験結果では、後者の現象を直接確認していないが、発生するサクションが流入水の流速に依存しない止水構造を設けたケースが後者の現象を再現していると考えることができる。

次章では、この2つの状態を考慮した基礎の設計法の検討を行うこととする。

第4章 サクションの効果を検討した実基礎の挙動

実験結果を分析し、水が基礎底面下に流入する場合の底面下の水圧変動特性は、基本的に水の流入速度に依存することを確認した。流入水の摩擦損失による水圧変動も、基礎が浮き上がる前の底面下の隙間の大きさにより大きさが異なるものの、基本的には速度に依存するものである。

一方、基礎底面下が真空状態となるほどの速い角速度で基礎が浮き上がる場合には、底面下の水圧変動は水の流入速度あるいは基礎の浮上り速度（角速度）に依存しないものと考えられる。

基礎の設計では、作用する力（加速度）や変位量で構造が決定され、この時、加速度や変位と位相差を持つ速度はゼロとなることから、基礎の設計にサクションが効くのは以下の条件の場合と考えられる。

- ・ 基礎の角速度が大きく、基礎底面下の空隙への水の流入が遅れる場合
- ・ 基礎端部に止水構造等が設けられ、基礎が浮上った時に基礎底面下が真空状態となる場合

基礎の応答角速度によって作用するサクション力が変化することを動的解析モデルで評価するのは非常に難しいため、本章では、基礎底面下がほぼ真空となる状態（以下、「真空状態」と呼ぶ）でのサクションを考慮した基礎の浮上り抵抗特性を静的解析により評価するとともに、基礎の角速度により異なる2つの状態を考慮して動的解析によるサクションの効果と基礎の安定性を検証する方法について検討を行う。

4.1 サクションを考慮した浮上り式

ここでは、サクションの影響を評価するために浮上り理論式²⁾の（以下、「理論式」と呼ぶ）の拡張を行う。

地震時の転倒に対する抵抗モーメント M は、地盤反力による抵抗モーメント M_E とサクションによる抵抗モーメント M_S の和で表される。

$$M = M_E + M_S \quad (4-1)$$

(1) 地盤反力による抵抗モーメント M_E

地盤反力による抵抗モーメント M_E と回転変位 θ の関係は以下の式で表される。

$$M_E = I_x k_v \theta \quad (4-2)$$

ここに、 I_x 、 k_v はそれぞれ基礎に浮上りが生じた場合の断面二次モーメント、鉛直地盤反力係数であり、底面反力作用幅を x_e 、基礎幅を B 、 $x_e=B$ の時の断面二次モーメントを I_B として、 I_x は次式で表される。

$$I_x = \frac{x_e^2}{B^3} (3B - 2x_e) I_B \quad (4-3)$$

浮上り限界モーメント M_0 と浮上り限界回転角 θ_0 との関係は、

$$M_0 = I k_v \theta_0 \quad (4-4)$$

で表される。荷重の偏心距離を e として、

$$x_e = 3\left(\frac{B}{2} - e\right) \quad (4-5)$$

であり、式(4-2)/式(4-4)に式(4-3)、式(4-5)を代入して次式が得られる。

$$\frac{M_E}{M_0} = \left(\frac{27}{2} \frac{e}{B} - 54 \left(\frac{e}{B} \right)^2 + 54 \left(\frac{e}{B} \right)^3 \right) \frac{\theta}{\theta_0} \quad (4-6)$$

また、モーメント M_E と鉛直反力 V の関係は、サクシヨン力による鉛直力の増分を考慮して次式が得られる。

$$M_E = eV = e(V_0 + p_s D(B - x)) = e \left(V_0 + p_s D \left(3e - \frac{B}{2} \right) \right) \quad (4-7)$$

ここに、 D 、 V_0 、 p_s はそれぞれ基礎奥行き長さ、浮力を考慮した基礎の重量、底面に作用するサクシヨンである。ただし、サクシヨンは等分布である。

$$M_0 = \frac{V_0 B}{6} \quad (4-8)$$

より、式(4-7)は以下のように表すことができる。

$$\frac{M_E}{M_0} = 3 \frac{e}{B} \left(2 - \frac{p_s B D}{V_0} + 6 \frac{p_s B D}{V_0} \frac{e}{B} \right) \quad (4-9)$$

式(4-6)および(4-9)より、式(4-10)が得られる。

$$\frac{e}{B} = \frac{1}{2} + \frac{BDp_s/V_0 - \sqrt{(BDp_s/V_0)^2 + 4(BDp_s/V_0 + 1)(\theta/\theta_0)}}{6(\theta/\theta_0)} \quad (4-10)$$

式(4-10)を式(4-6)あるいは式(4-9)に代入すれば、 M_E/M_0 と θ/θ_0 の関係が得られる。ただし、 M_E/M_0 と θ/θ_0 の関係を直接表現しようとすると式が非常に煩雑となるので、基本式として式(4-9)と(4-10)を分離した状態で表すことにする。

(2) サクシヨンによる抵抗モーメント M_s

サクシヨンによる抵抗モーメント M_s は、浮上り幅に作用するサクシヨン力 $p_s(B-x)D$ と基礎中心からサクシヨン力の合力の作用位置までの距離 $x_e/2$ の積で表される。これに式(4-5)、式(4-8)を考慮して、

$$\frac{M_s}{M_0} = -9 \frac{BDp_s}{V_0} \left(1/4 - 2 \frac{e}{B} + 3 \left(\frac{e}{B} \right)^2 \right) \quad (4-11)$$

が得られる。

(3) 非線形応答モーメント M

M_0 で無次元化した式(4-1)、(4-9)、(4-10)および(4-11)より、

$$\frac{M}{M_0} = \frac{M_E}{M_0} + \frac{M_s}{M_0} = -\frac{9}{4} \frac{BDp_s}{V_0} + \left(6 + 15 \frac{BDp_s}{V_0} \right) \frac{e}{B} - 9 \frac{BDp_s}{V_0} \left(\frac{e}{B} \right)^2 \quad (4-12)$$

が得られる。ここまですら求めた式(4-9)～(4-12)を以降、「修正式」と呼ぶことにする。

図-4.1 に、理論式、式(4-9)および式(4-12)の曲線を示す。修正式では、サクシヨンによる抵抗モーメントが付加されることおよび、サクシヨンにより鉛直反力が増大することにより、理論式に比べ線形に近い応答解が得られる。

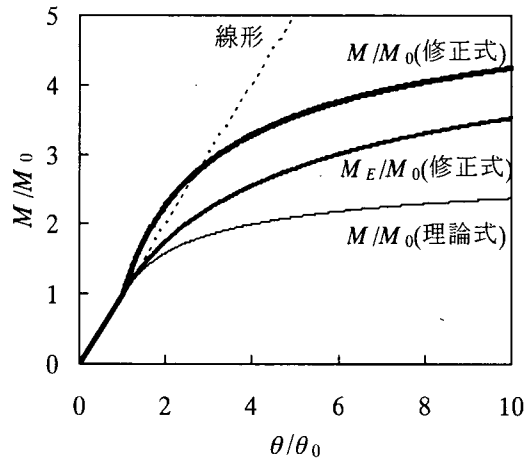


図-4.1 非線形応答

(4) 非線形応答水平力 H_N

ここでは、非線形応答水平力 H_N は線形応答水平力 H_L に対し次式で与えることにする。

$$H_N = H_L \frac{M_N}{M_L} \quad (4-13)$$

4.2 浮上り修正式の特徴

以下に、4.1 で拡張した浮上り修正式を用いた計算例を示す。ここでは、現行設計基準による安定性照査法を基に検討するものとする。

現行設計法では、レベル 1 地震時の照査で基礎寸法が決定する。検討の条件として、水深 5m の地盤上に設置された平面寸法 10m×10m、死荷重反力 48,000kN の直接基礎を対象とする。作用するサクシジョン力は、水圧変動量を 150kPa として算出する。

図-4.2 に、サクシジョンを考慮した場合および同じ平面寸法、死荷重反力でサクシジョンを考慮しない場合の基礎における回転角とモーメント(浮上り限界回転角および浮上り限界モーメントで正規化)の関係を示している。理論式に比べ、修正式は線形に近い曲線となる。図中には、地盤反力によるモーメントの曲線も示しているが、地盤反力のみで抵抗するとしている理論式に比べ同一回転角におけるモーメントは大きな値となる。これは、4.1 で示した式(4-7)を見れば明らかであるが、作用するサクシジョン力が鉛直反力に付加されることによる。

図-4.2 に、線形解が $M_L/M_0=2.2$ となる場合について、エネルギー一定則を適用して得られる非線形解を示している。地盤反力とサクシジョン力が回転に対して抵抗し、修正式により評価した回転角は理論式によるよりも小さく抑えられる。

図-4.3 では、荷重の偏心距離の比較を行っているが、サクシジョンを考慮することで偏心距離は小さく評価されることがわかる。これは、転倒に対する抵抗を大きく見積もれることを意味する。また、鉛直支持力の照査において、極限支持力を高く見積もることができる。

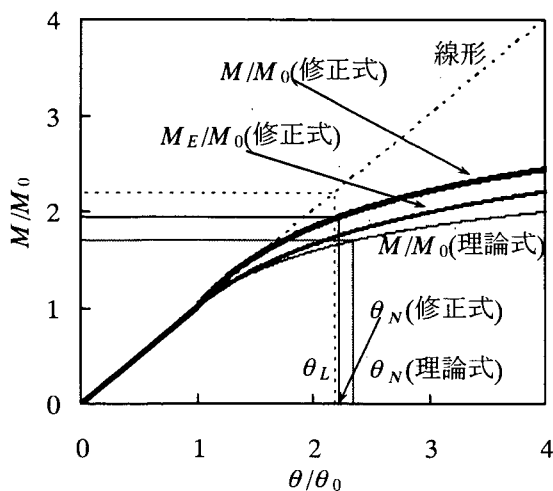


図-4.2 抵抗モーメントの比較

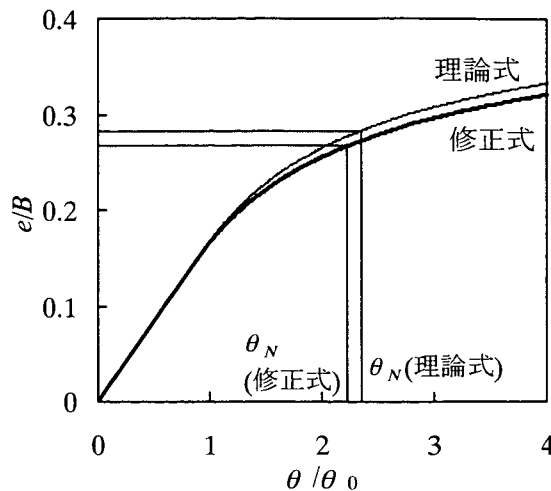


図-4.3 荷重の偏心距離の比較

一方、基礎の水平抵抗については、式(4-13)によればモーメントの評価に比例して大きく評価されるため、設計上厳しい評価を行うことになる。本計算例では、理論式により算出されるモーメントに対し、修正式のそれは1.15倍となっている。これに対し、基礎底面地盤のせん断抵抗力が地盤の内部摩擦角に依存する（基礎底面と地盤との間の付着力 $C_B=0$ ）とすれば、サクシオンを考慮することで鉛直反力は1.09倍となることから、水平抵抗に対する安全率は小さく評価される。

4.3 動的解析による応答特性の把握

本章の冒頭で述べたように、基礎の角速度に応じて発現するサクシオンの性格が異なるのに対し、基礎がどのような動的応答を示すかを検討するとともに、基礎の安定性の評価方法について検討を行う。

まず、図-4.4に示すような離散的な鉛直支持機構を持つ2次元梁ばねモデルを用いた時刻歴応答解析を行うことを考える。個々の鉛直ばねは、圧縮側には地盤の抵抗特性を持ち、引張側には基礎底面下の隙間が真空状態にあると想定して引張力の上限を有する抵抗特性を与える。

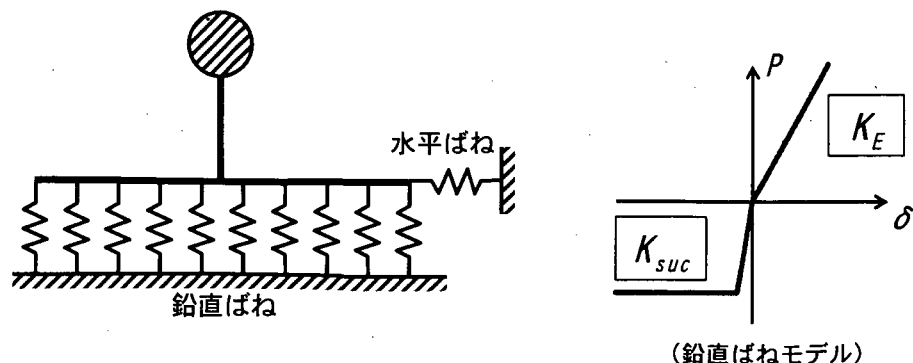


図-4.4 サクシオンを考慮した鉛直支持モデル

基礎の応答角速度が比較的小さく、発生するサクシヨンの大きさが角速度に依存する場合、あるいは応答の途中で基礎の角速度には依存しない状態（真空状態）から角速度に依存する状態（水が充満した状態）に移行する場合には、モデルで想定している仮定が成り立たなくなる。前者の場合はサクシヨンの作用が構造物の諸元の決定には影響しない。後者に対しては、基礎底面下の水の状態と基礎の応答、安定性との関係を時刻歴応答解析結果に基づいて別途検討する必要がある。

基礎が浮上る過程における基礎底面下の隙間への水の流入量 Q は、底面下が真空となる場合には基礎端部の浮上り量と水深の条件より次式で与えることができる。

$$Q = \sqrt{2g(h + p_a / w)} \int_0^t y_u(0, t) dt D \quad (4-14)$$

ここに、 g , h , t , $y_u(0, t)$, p_a , w , D はそれぞれ重力加速度、水深、浮上り開始からの時刻、時刻 t の基礎端部浮上り量、大気圧、水の単位体積重量および基礎の奥行きである。右辺のルートの部分はベルヌイの定理により与えられる流速である。

流入量 Q と基礎底面下の隙間の体積 V_{lm} の関係を図-4.5 に模式的に示す。 V_{lm} がピークに達した時、基礎の角速度はゼロであり、また、 $V_{lm} > Q$ の時、基礎底面下は真空状態にある。

図-4.5 に示した2本の Q 曲線について、a 曲線のように V_{lm} がピークに達する前に $V_{lm} = Q$ となる場合には、基礎の浮上りの進行中にサクシヨン力が発揮されなくなることから、 $V_{lm} = Q$ となった時に突然浮上り抵抗が低下し、図-4.6 に示すように回転角が急増すると予想される。この場合、サクシヨンを考慮して設計した基礎は安定性を損なうことが予想される。

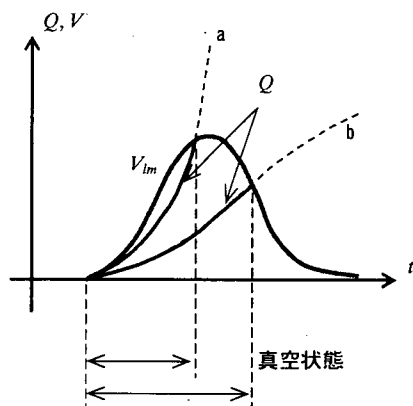


図-4.5 水の流入量と基礎底面下の空隙体積

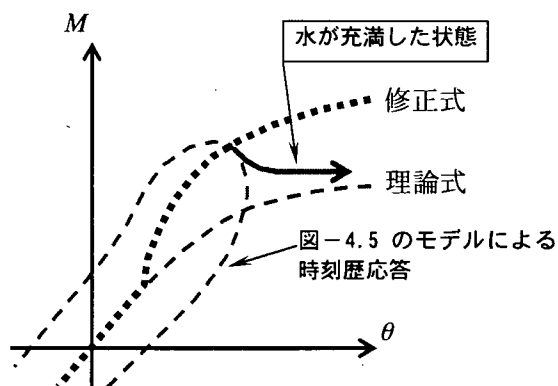


図-4.6 水が充満した状態に移行した後の応答(1)

一方、 V_{lm} がピークに達した以降に $V_{lm} = Q$ となる b 曲線の場合、基礎の回転角が最大となった後に降下している状態である。この過程では、基礎および地盤に作用する力の関係が図-4.7 のように移行するものと考えることができる。

(a) に示した鉛直荷重 V_0 とは、基礎の浮上り前の鉛直荷重であり、 e_0 とはその鉛直荷重 V_0 の偏心距離である。図-4.7(a) の力の釣り合いより、

$$R = V_0 + V_{suc} \quad (4-15)$$

ここに、 R 、 V_{suc} はそれぞれ地盤反力、サクション力である。また、モーメントの釣り合いより、

$$eR + \frac{x_e}{2} V_{suc} = e_0 V_0 \quad (4-16)$$

である。ここに、 e 、 x_e はそれぞれ鉛直反力の偏心距離、反力作用幅である。反力作用幅 x_e は、

$$x_e = 3 \left(\frac{B}{2} - e \right) \quad (4-17)$$

であり、これらより鉛直荷重 V_0 の偏心距離 e_0 は次式で与えられる。

$$e_0 = e + \left(\frac{3}{4} B - \frac{e}{2} \right) \frac{V_{suc}}{V_0} \quad (4-18)$$

地盤反力 R の偏心距離 e は式(4-10)で与えられるものと同値であるが、(a)の真空状態では、この e に対して e_0 が大きい。

(a)の真空状態から水が充満した状態に移る時、基礎底面下の隙間の体積は収縮状態にあることから、基礎周囲の水圧が音速で基礎底面下に伝播し、底面下も瞬時に静水圧状態となる。この時、力の釣り合い関係は瞬間的に図-4.7の(a)の状態から(b)の状態に移行し、鉛直荷重 V_0 と地盤反力 R 、偏心距離 e_0 と e とはそれぞれ等しくなる。サクション力が作用しなくなるため、地盤が抵抗する鉛直力は(a)の状態よりも低下するが、反力作用幅 x_e が(a)の状態よりも小さくなるため、(b)の状態の最大地盤反力度は必ずしも(a)より小さくなるとは限らない。この状態は、サクションを考慮しない従来の設計法で想定している状態に他ならない。

その後、基礎の降下とともに鉛直荷重の偏心距離は小さく、反力作用幅は大きくなり、基礎底面下の水圧は静水圧より高い圧力となる。静水圧より水圧の高くなった基礎底面下の水は、基礎を押し上げるのではなく、降下する基礎を支持するように働くので、図-4.7(c)に示すように鉛直荷重 V_0 の偏心距離 e_0 は地盤反力 R の偏心距離 e よりも小さくなり、また地盤が支持していた鉛直力の一部が水が負担することにより最大地盤反力度も低下する。ただし、大きな揚力が作用するのは、2.3.7で示したように基礎の着地直前のみと思われる。

したがって、基礎が降下する過程において水が充満した場合には、充満した直後が基礎の安定上最も厳しい状態と言える。

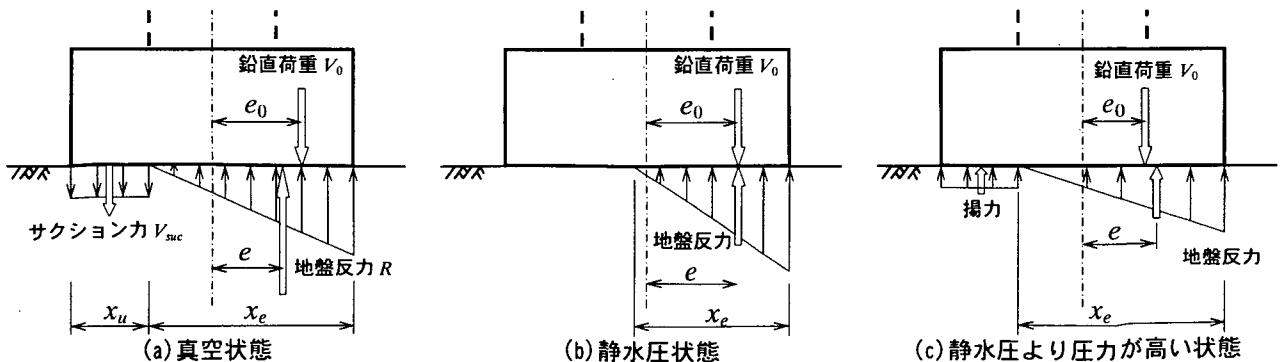


図-4.7 水が充満する時の鉛直作用力の状態

このような過程を考えた時、基礎の応答は図-4.8 のようなイメージになるものと考えることができる。図-4.7 の(a) の状態で作用しているサクション力は、基礎の角速度（降下速度）を高める働きをしており、基礎底面下の隙間に水が充満し、瞬間的にサクションが作用しなくなった場合には、図-4.6 に示したような回転角が急増する挙動とはならず、モーメントの低下の度合いが大きくなる挙動を示すものと考えられる。

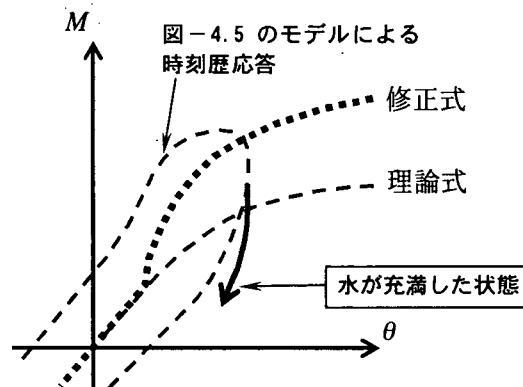


図-4.8 水が充満した状態に移行した後の応答(2)

以上を整理すると、サクションを考慮した基礎の安定性照査の手順は次のようになる。

- ① 4.1 で導いた浮上り修正式に基づき基礎の諸元を決定する。
- ② 図-4.4 のモデルによる時刻歴応答解析を実施する。
- ③ 基礎が浮上る過程において常に基礎底面下が真空状態となっていることを確認し、時刻歴応答値に対して基礎の安定性を照査する。
- ④ 浮き上がった基礎が降下する過程において、水が充満し、基礎底面下の水圧が静水圧になった状態の基礎の安定性を照査する。

なお、③および④の安定性の照査は、現行の直接基礎の照査法（鉛直支持、水平支持、転倒）に従うことになるが、④の基礎の降下時における転倒の照査は不要と考えられる。

ここで、4.2 で使用した条件を用いて実際に上記の手順の計算を行い、基礎の安定性を検討する。

この基礎モデルは、地盤反力度の照査（鉛直支持に対する安全性）で基礎の諸元が決定されている。地盤種別は硬岩であり、地盤反力度の上限値は $1,500\text{kN/m}^2$ とする。地盤ばねの算出に必要なとなる地盤の変形係数は 450MN/m^2 とする。動的解析を実施するにあたり必要な他の与条件として、現行の直接基礎の設計は、レベル1地震時の設計で基礎の諸元を決定するので、時刻歴応答解析に用いる入力地震動波形は、文献³⁾にあるレベル1地震時の設計に用いるⅠ種地盤の標準加速度応答スペクトルに適合する図-4.9 に示す波形を用いる。部材毎に減衰定数を与えるものとし、橋脚を5%、フーチング、地盤ばねおよびサクションばねを20%とする。

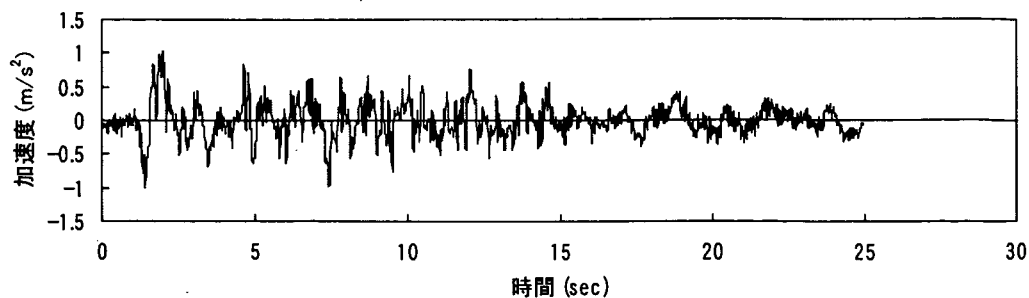


図-4.9 入力地震動波形（レベル1地震動）

図-4.101 に、時刻歴応答解析により得られた応答モーメントと応答回転角の関係を示す。入力地震動がレベル1地震動であり、非線形域に入るとはいえその程度は僅かであることから、時刻歴応答は線形に近い挙動となっている。

図-4.11 には最大モーメントが発生する時間帯における基礎底面下の空隙体積 V_{lm} 、水の流入量 Q の時刻歴波形および応答モーメントの時刻歴波形を示している。空隙体積 V_{lm} がピークを超えた後に水が充満 ($V_{lm} < Q$) している。

応答モーメントの時刻歴波形のグラフには、サクシオンを考慮した設計を行った場合と無視した設計を行った場合の最大抵抗モーメントを示している。この最大抵抗モーメントは以下のようにして求めている。まず、最大地盤反力度は次式で与えられる。

$$q_{\max} = \frac{2V}{x_e D} \quad (4-19)$$

ここに、 V 、 x_e 、 D はそれぞれ基礎の浮上り前の鉛直荷重、反力作用幅および基礎の奥行きであり、 V は、サクシオンを無視する場合には基礎の浮上り前の鉛直荷重、サクシオンを考慮する場合にはそれにサクシオン力を付加したものである。 V 、 D および地盤反力度の上限値は与条件としてあらかじめ与えられているので、 x_e の下限値が決まる。鉛直荷重 V の偏心距離 e は、

$$e = \frac{B}{2} - \frac{x_e}{3} \quad (4-20)$$

であり、最大抵抗モーメント $M_{\max}$ は、 e と V の積で与えられる。

基礎平面寸法 $10\text{m} \times 10\text{m}$ 、基礎の浮上り前の鉛直荷重 $V_0 = 48,000\text{kN}$ の条件においてサクシオンを無視した設計を行った場合、地盤が抵抗できる最大モーメントは $137.6\text{MN} \cdot \text{m}$ となり、また、サクシオンを考慮した場合には $155.75\text{MN} \cdot \text{m}$ となる。

この計算例では、サクシオンが作用している時の応答モーメントは地盤が抵抗できる最大モーメント $155.75\text{MN} \cdot \text{m}$ を下回っており、また水が充満してからの応答モーメントも最大抵抗モーメント $137.6\text{MN} \cdot \text{m}$ を下回り、鉛直支持に対し安全性が確保されていると考えることができる。

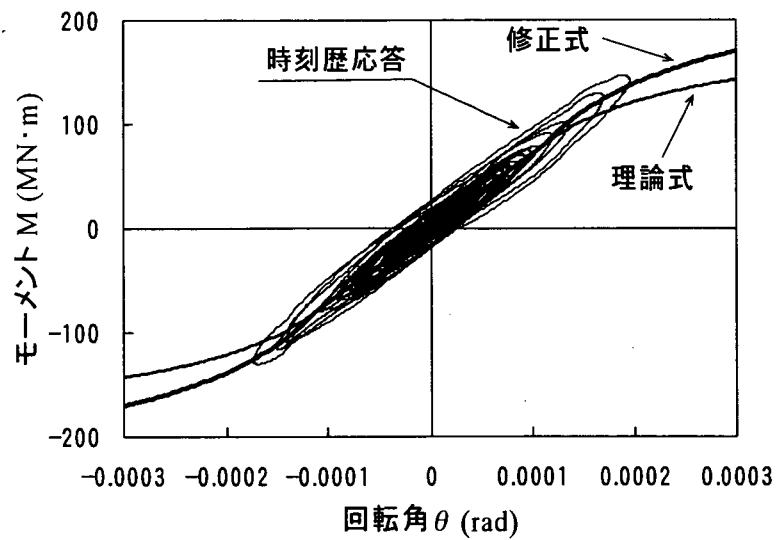


図-4.10 応答モーメント～回転角関係

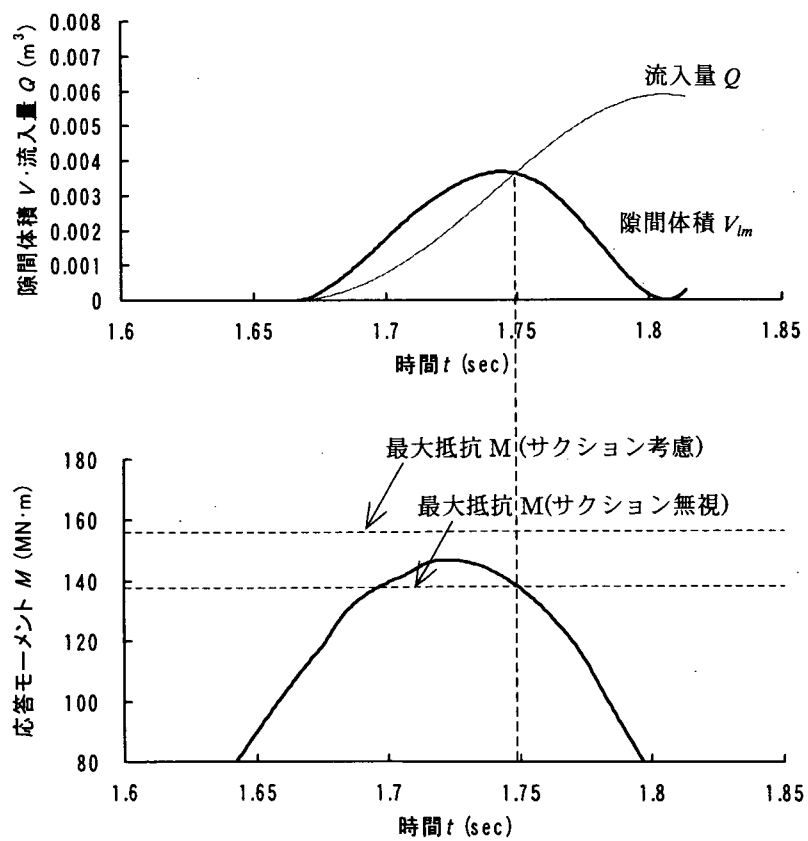


図-4.11 V_{Im} , Q および M の時刻歴波形

第5章 まとめ

水中に設置した模型基礎の浮上り実験を行い、基礎底面の水の動きとその水圧変動、基礎の浮上り抵抗との関係を検討した。不透水性地盤上の基礎について検討した結果、基礎の浮上りに対するサクシヨンの影響として以下のことがわかった。

- ・ 基礎の角速度が大きいほど基礎浮上り時に発揮されるサクシヨンは大きく、大きな浮上り抵抗が生じる。これは、サクシヨンとは基礎底面下の水の圧力変動量に相当し、この圧力変動量は基礎底面下への水の流入速度に依存し、また流入速度は基礎の角速度などの基礎の挙動に依存するためである。
 - ・ ただし、発揮されるサクシヨンには上限がある。上限に達した状態とは、浮き上がった基礎の底面下に生じた隙間が水の流入の遅れによりほぼ真空となった状態であり、基礎の角速度に依存しなくなる。
 - ・ 基礎底面下への水の流入を完全に遮断することにより前述の真空の状態を再現し、最大の浮上り抵抗を発揮させることが可能である。
 - ・ 水深が大きいほど大きなサクシヨンが発揮される。水が非圧縮性であることと、基礎底面下の隙間の体積の時間的変化が基礎の浮上り開始時に大きいことにより、水深が異なることによる静水圧の差は、瞬間的に解消される。
 - ・ 正負繰り返し荷重の場合、基礎が浮上る過程では浮上り開始時に圧力変動の時間的変化（変動速度）が大きく、逆に基礎が降下する過程では着地直前に圧力変動の時間的変化が大きくなる。
- これらはいずれも、基礎底面下の隙間の体積の時間的変化が大きい時である。

一方、透水性地盤上の基礎の場合には、不透水性地盤の場合よりも発生するサクシヨンは小さく、基礎の浮上りに対し大きな抵抗が発揮されないことも確認された。

また、このようなサクシヨンの作用が基礎の動的挙動に与える影響を検討し、不透水性地盤上に設置された基礎においては、従来設計法により評価したサクシヨンを考慮していない基礎の動的挙動と本検討で予想したサクシヨンが作用した場合の挙動とに大きな差があることが確認できた。

以上、水中基礎が地震時荷重により浮上る際の抵抗特性について得られた知見を示したが、実設計にこれらの特性を考慮するためにはさらに解決すべき課題が残されている。以下に示すものは、これまでの検討でクリアにされていない問題点等である。

- ・ 模型実験では砂（透水性）およびゴム地盤（不透水性）の2種類の地盤を用い、透水性地盤では発揮されるサクシヨンは非常に小さい値となったが、透水性地盤であっても透水係数の大きさにより発揮されるサクシヨンが異なるため、設計で考慮すべきサクシヨンと透水係数の関係を調べる必要がある。
- ・ 基礎浮上り時の水の流入が高速のために基礎底面下の地盤表面を乱すことがあると考えられ、地盤が乱されることによる基礎の安定性への影響を検討する必要がある。

- ・ 今回は、全て2次元問題として検討を行っている。基礎の規模が大きくなるほど浮上り時に基礎側方から流入する水の影響が大きくなるものと思われ、3次元的検討を行う必要がある。
- ・ 浮上り抵抗が大きく評価されるということは、水平抵抗に対して設計が厳しくなることにつながる。また、繰返し荷重を受け、浮上った基礎の底面下に流入した水が、基礎降下後に基礎底面下に残留することを考えると、滑動抵抗の低下も予想される。本検討では、水中基礎の浮上り抵抗に着目したが、今後、水平抵抗特性に関する検討が必要である。

参考文献

- 1) 椿 東一郎：基礎土木工学全書 7 水理学Ⅱ，森北出版株式会社，1974.5
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ 下部構造編，丸善，2002.3
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，丸善，2002.3

付 録

1. モーメント, 回転角の時刻歴	48
2. 回転角速度の時刻歴	89
3. 基礎底面下水圧の時刻歴	95
4. モーメント～回転角関係	173
5. モーメントピーク時の基礎底面下水圧分布	195



データの処理方法について

<時刻>

- ・ 水平荷重が載荷される時点時刻 $t=0$ とした。

<水平荷重>

- ・ 時刻歴グラフにおける乱れの程度により、グラフ形状に影響がない程度の適切な移動平均を適用した。

case37,38 : 21 点, case39-41 : 101 点, 他は 11 点

<モーメント>

- ・ モーメントは水平荷重(kN) $\times 0.63$ (m)で算出した。
- ・ 水深差をパラメータとした比較を行う場合、モーメントは浮力による補正を行った。
水深 $h=500$ mm を基準として、 $h=500$ mm と各水深における模型の水中重量の差 $\times 0.25$ (m)を各ケースのモーメントから差し引いた。

<水平変位>

- ・ 時刻歴グラフにおける乱れの程度により、グラフ形状に影響がない程度の適切な移動平均を適用した。

case33 : 11 点, case25 : 21 点, case16,17,21,22,30 : 31 点, 他は 51 点

<回転角>

- ・ 回転角は水平変位(mm)/630(mm)で算出した。

<水圧>

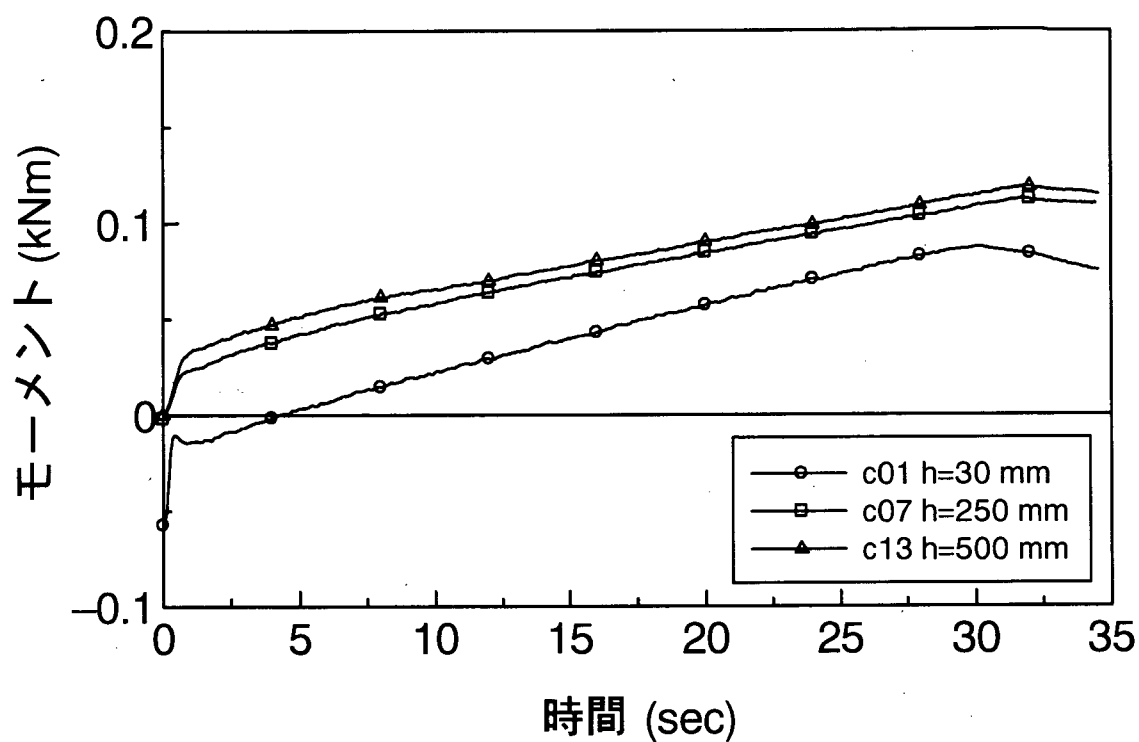
- ・ 時刻歴グラフにおける乱れの程度により、グラフ形状に影響がない程度の適切な移動平均を適用した。

case18,26 : 11 点, case21,24,25,32,33,35-38,40,41 : 31 点, 他は 51 点

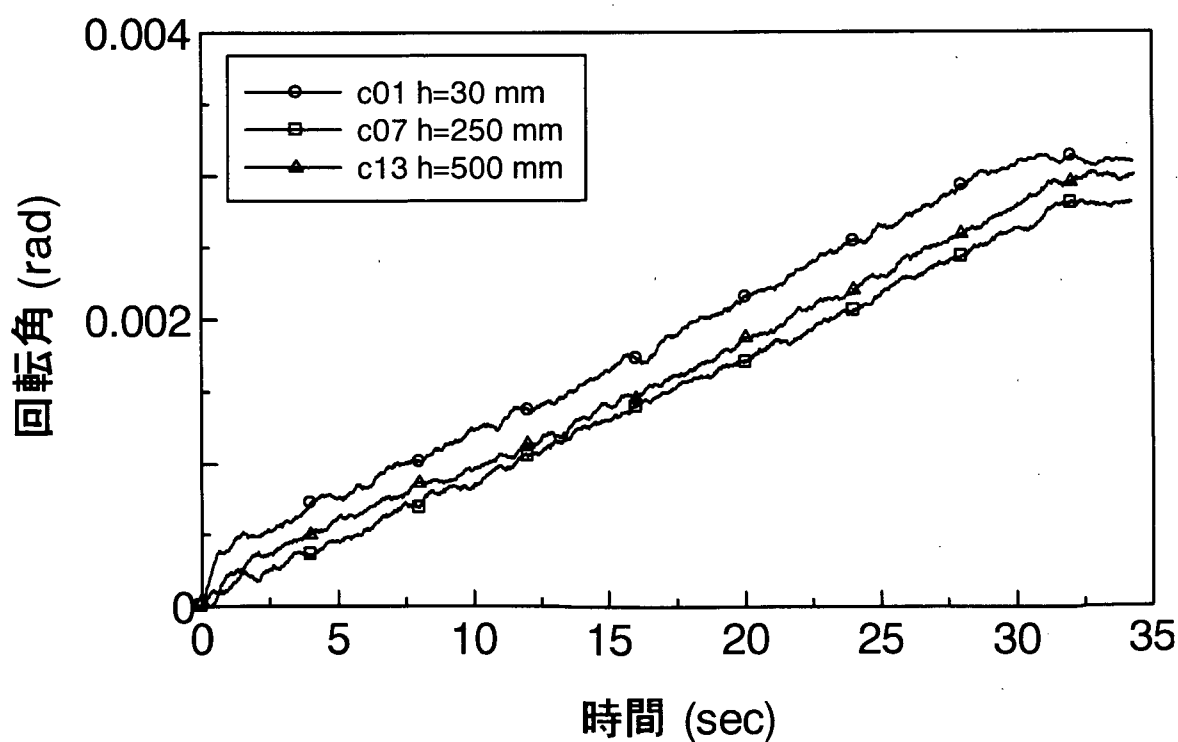
- ・ 各水深における初期静水圧による補正を行った。
下記のケースを除き、載荷終了後の収束値が静水圧であるとした。
case1 : w_6 のみ最後の 10 点の平均値を基準とした。
case18,36 : $t<0$ の平均値を基準とした。
case19-34 : 砂地盤では $t<0$ の平均値を基準とした。
case18 : $t<0$ の平均値を基準とした。
case39 : 最後の 10 点の平均値を基準とした。

1. モーメント, 回転角の時刻歴

1.1 水深差の影響

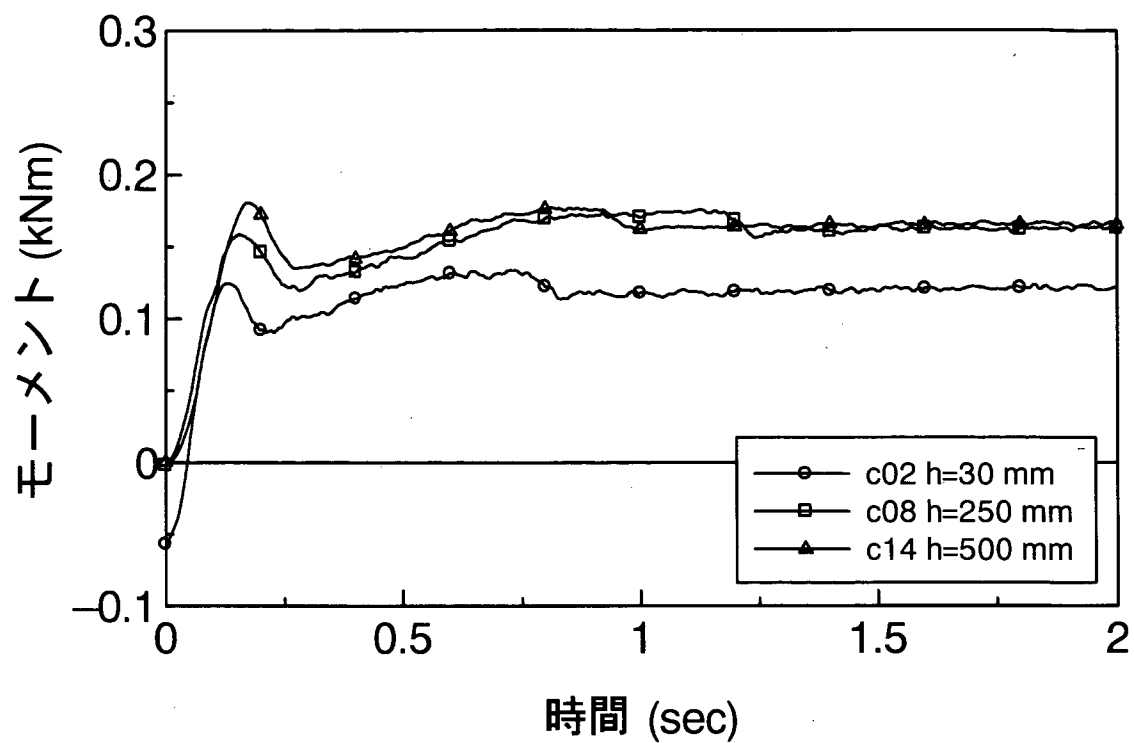


(a) モーメント～時間関係

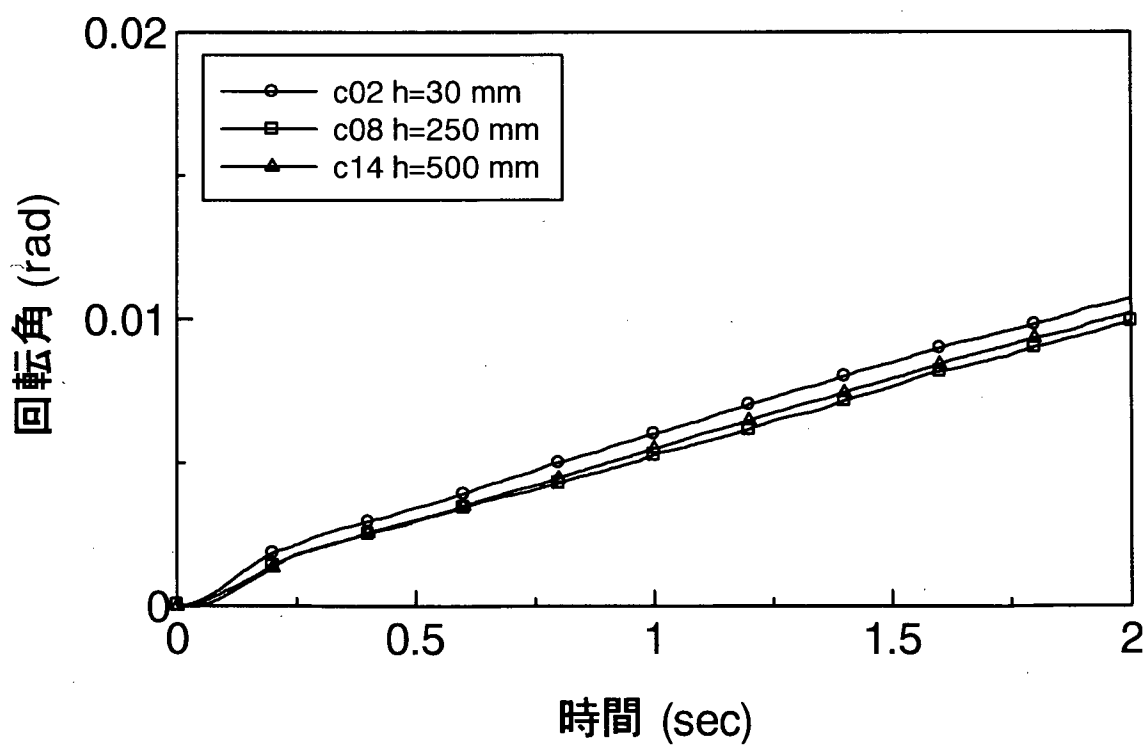


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.1 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤

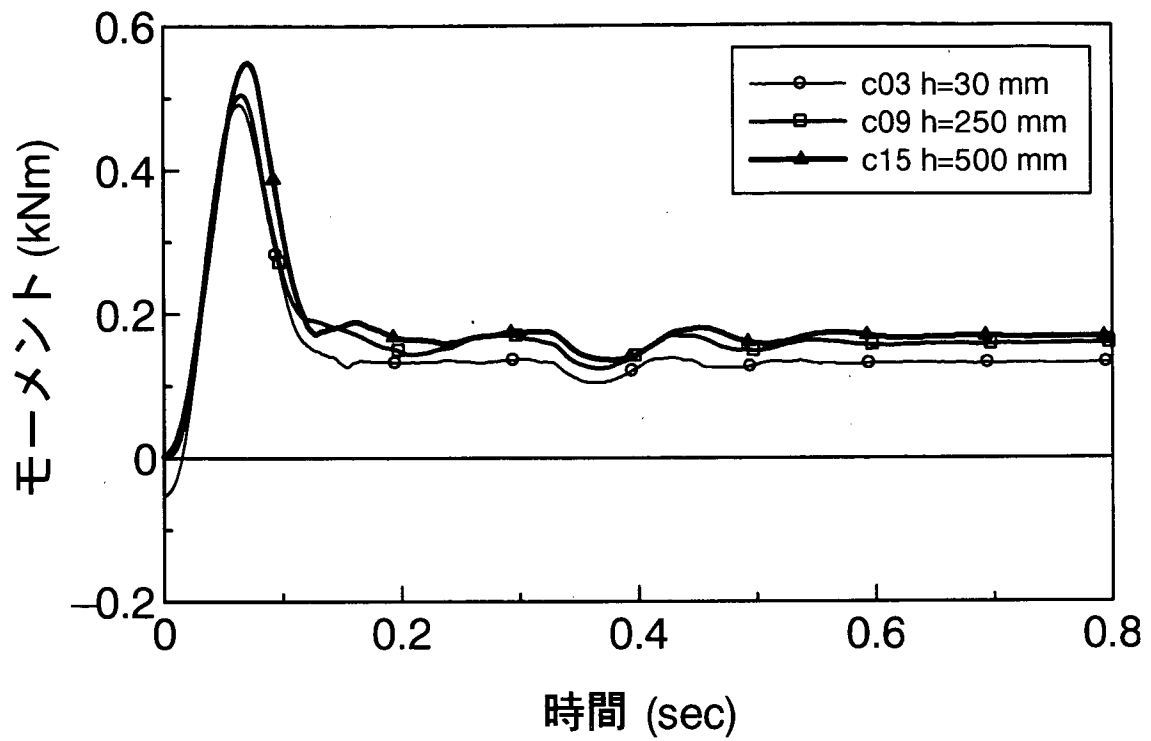


(a) モーメント～時間関係

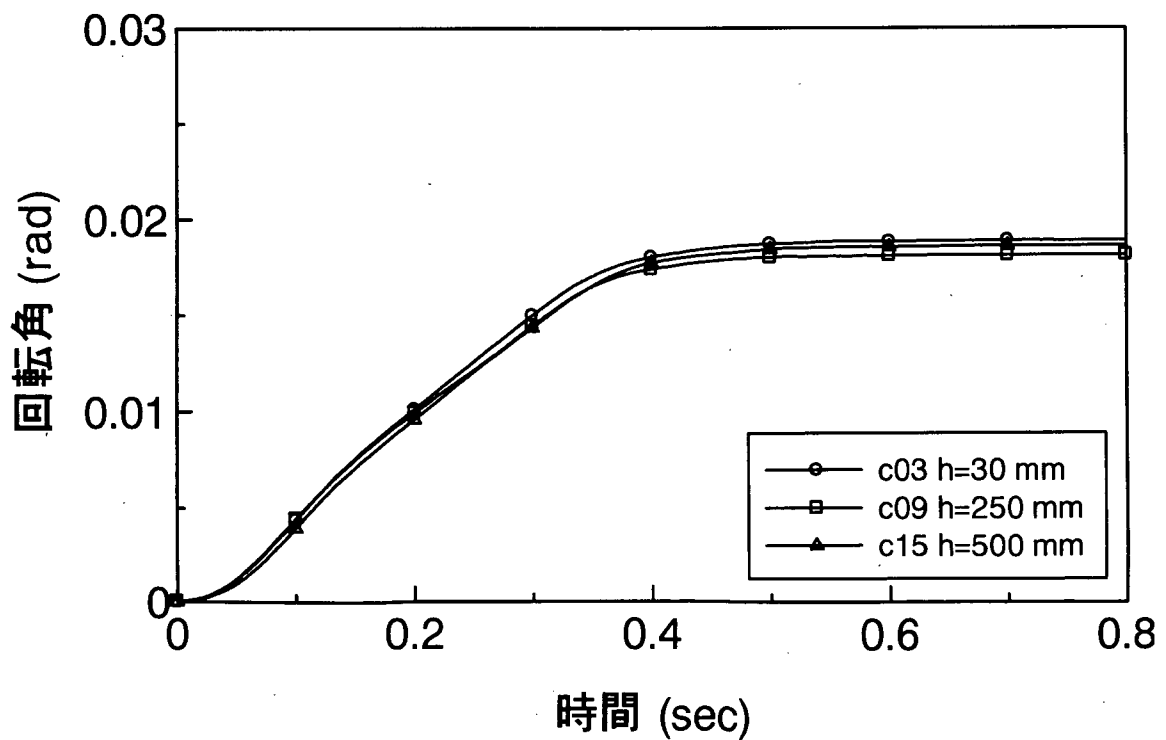


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.2 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤

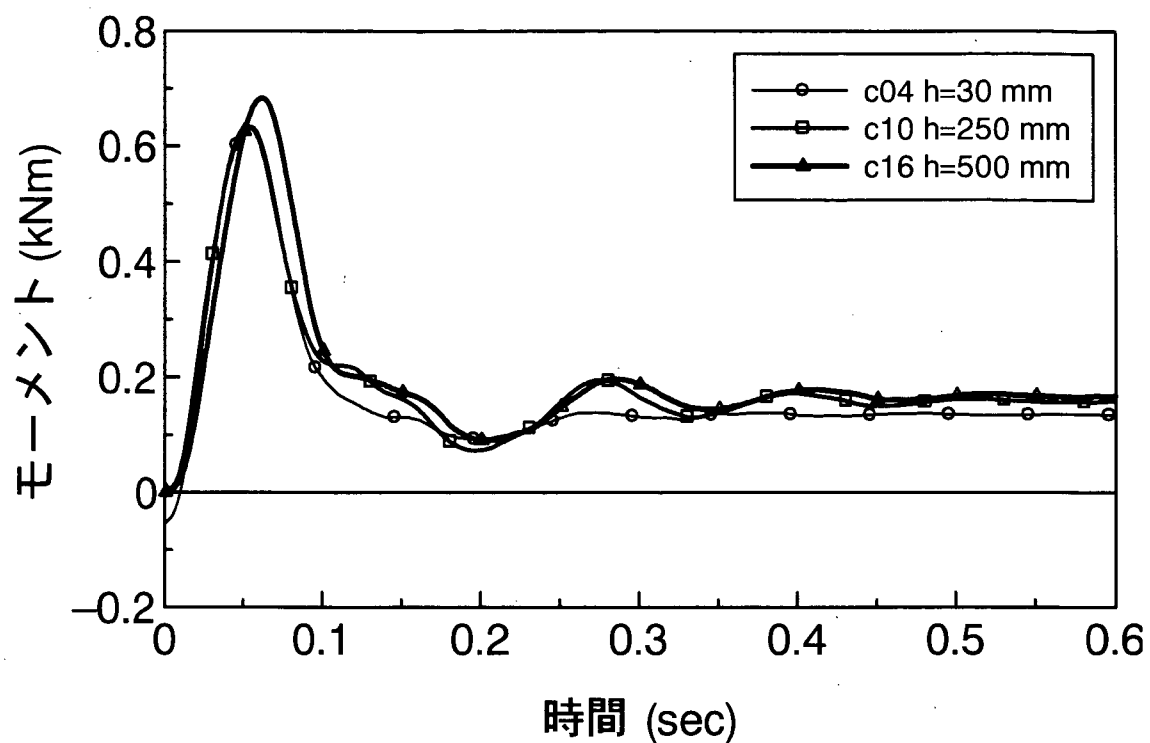


(a) モーメント～時間関係

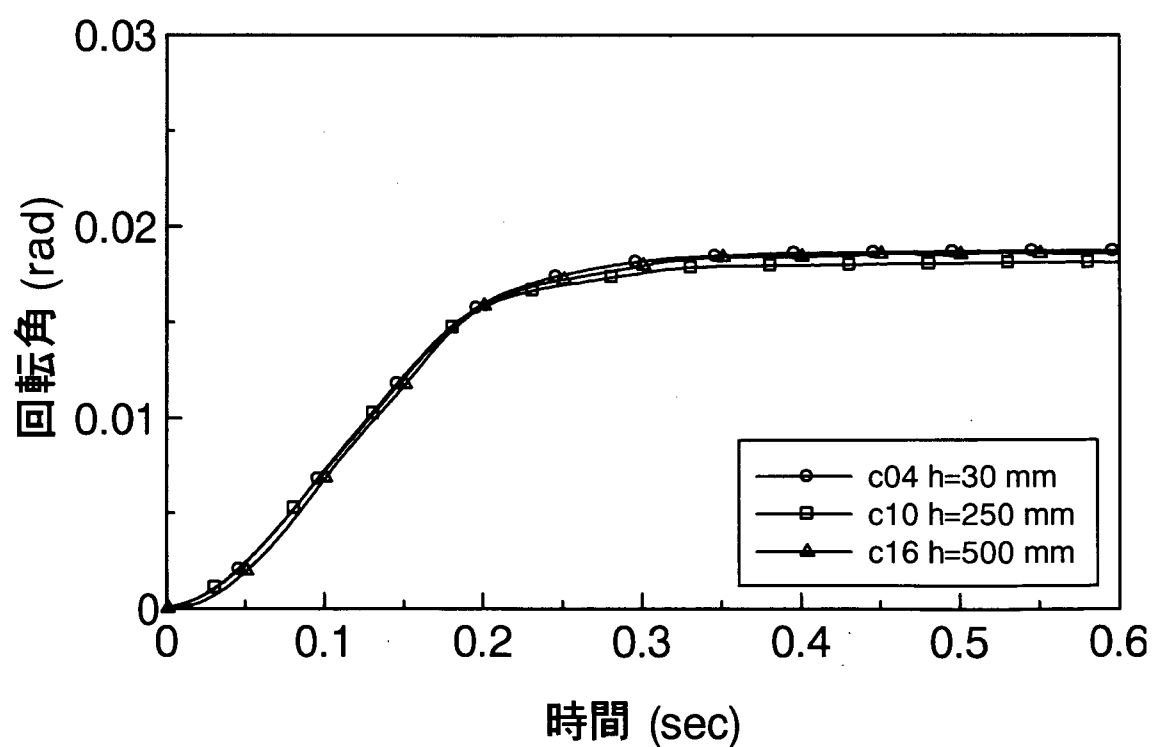


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.3 回転角速度 $\omega=0.05$ rad/sec, 弾性地盤

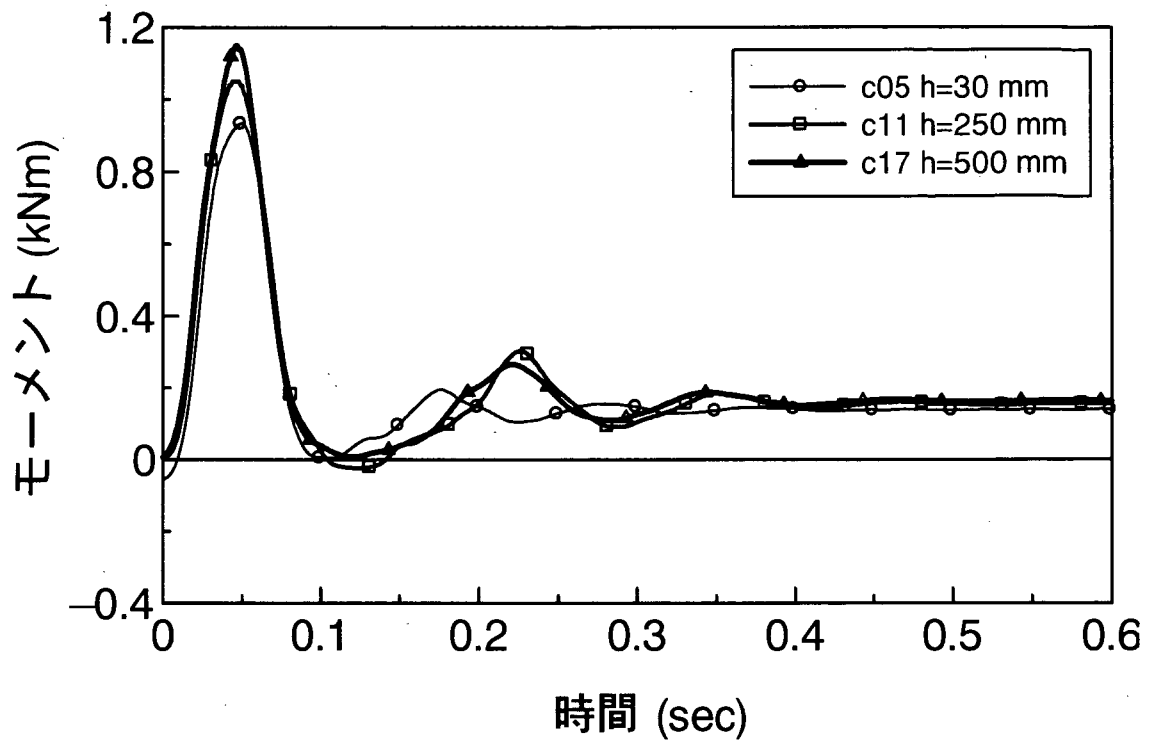


(a) モーメント～時間関係

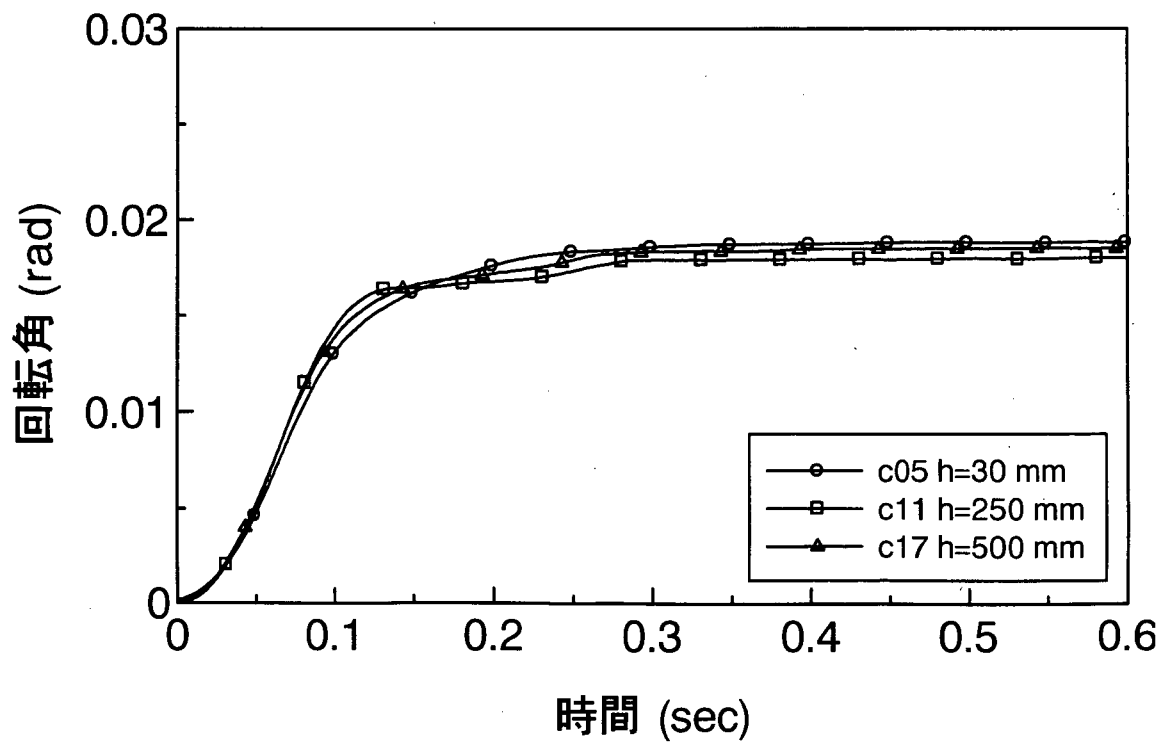


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.4 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤

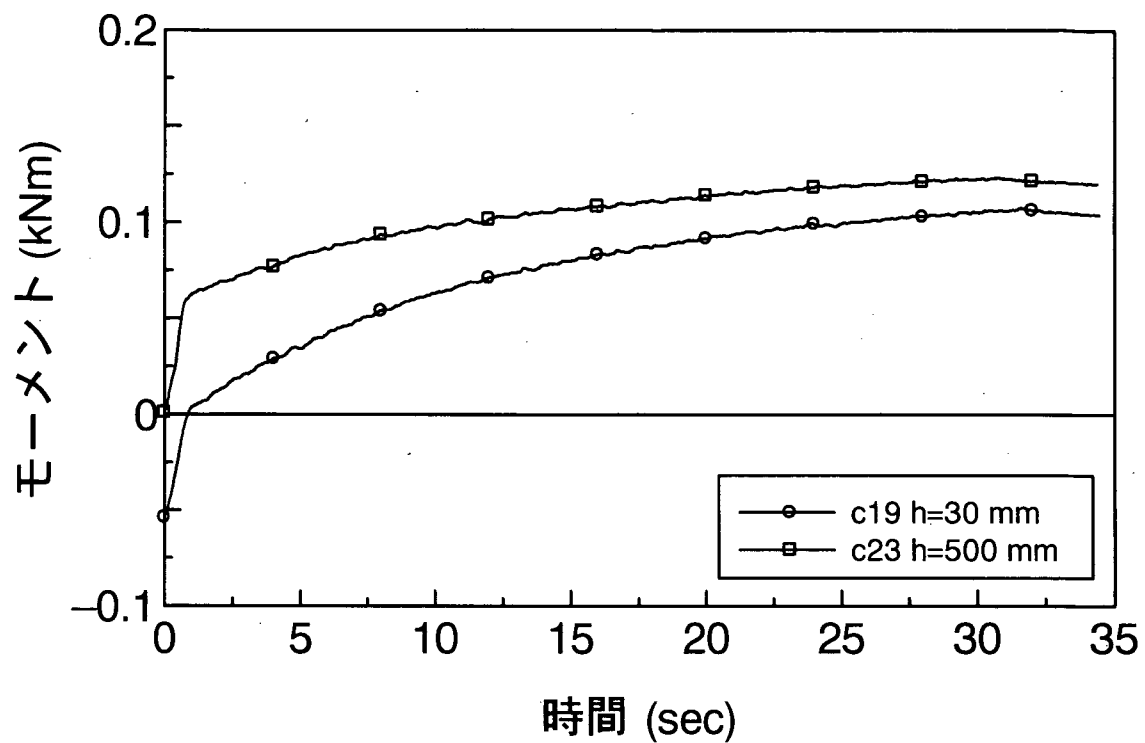


(a) モーメント～時間関係

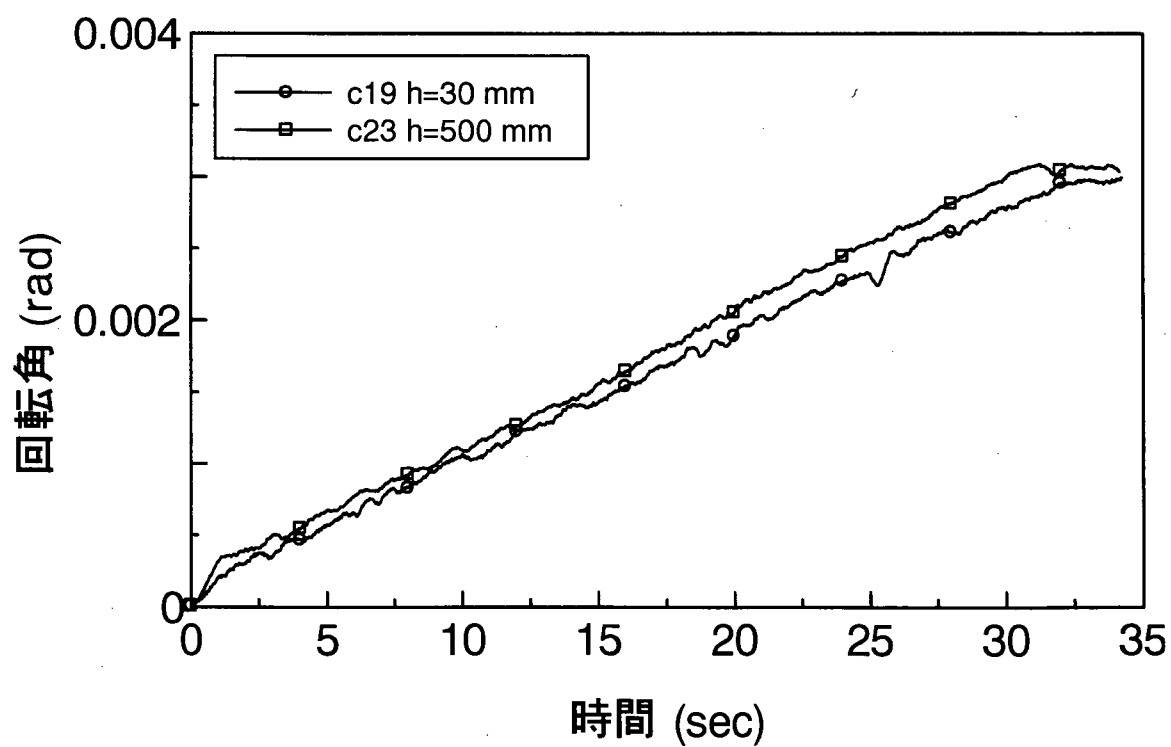


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.5 回転角速度 $\omega=0.2$ rad/sec, 弾性地盤

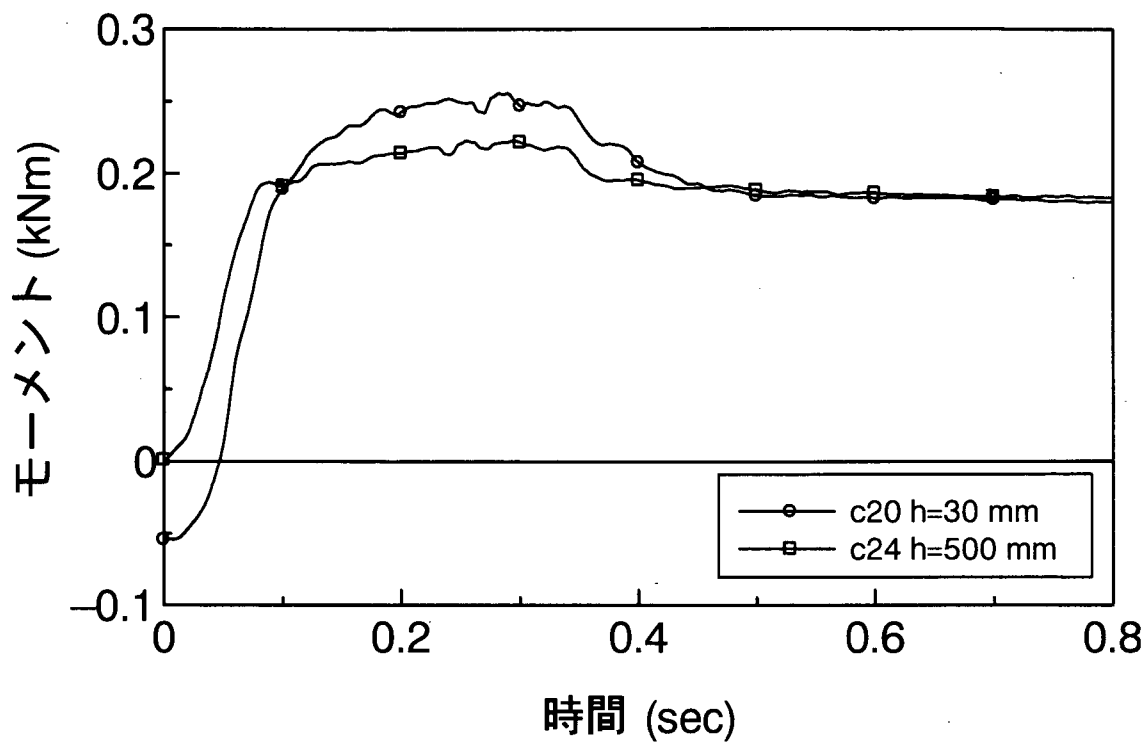


(a) モーメント～時間関係

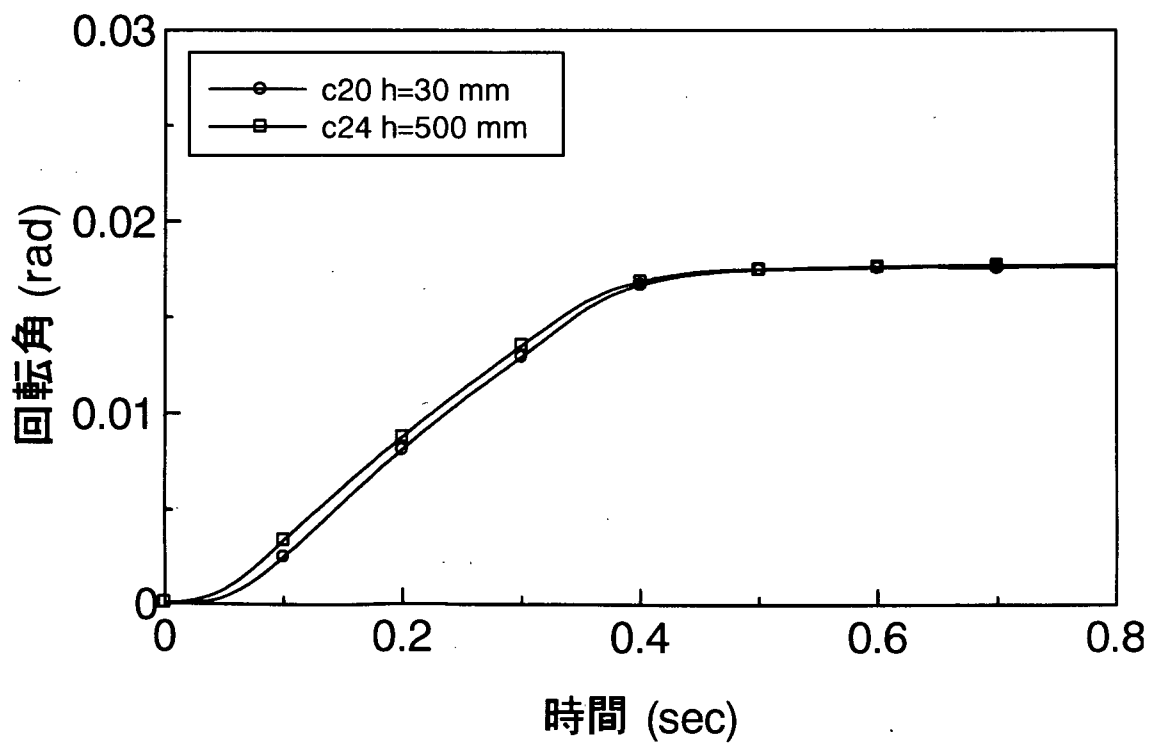


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.6 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤

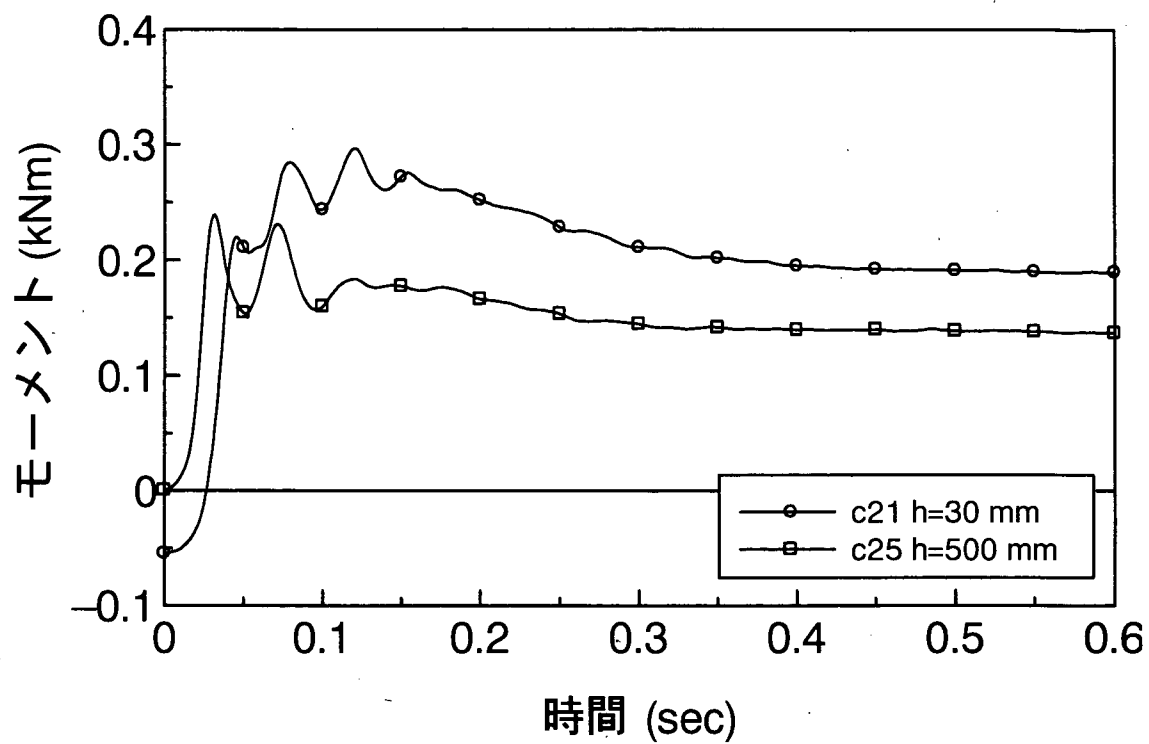


(a) モーメント～時間関係

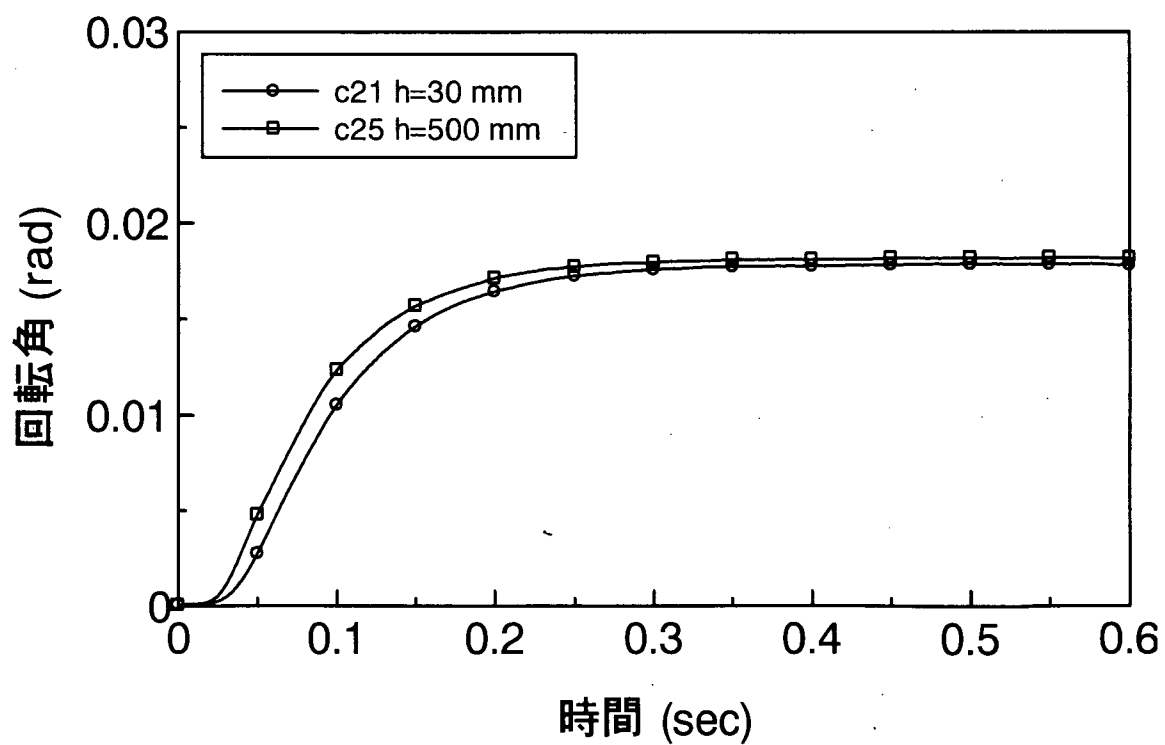


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.7 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤

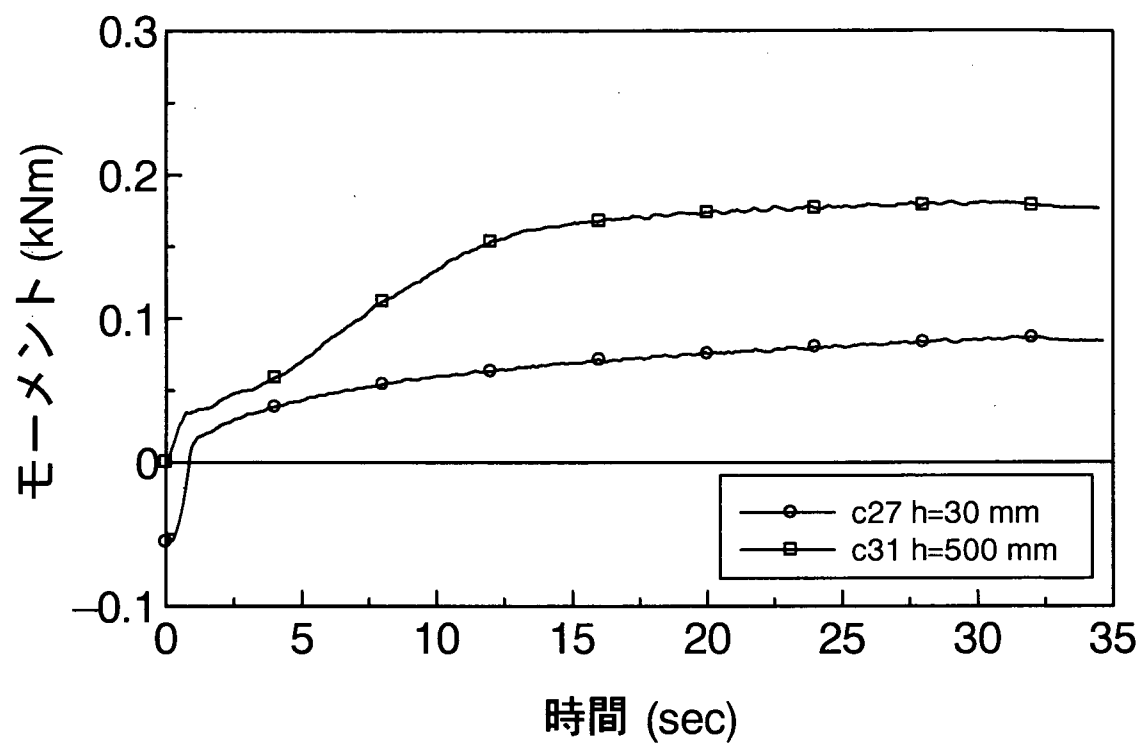


(a) モーメント～時間関係

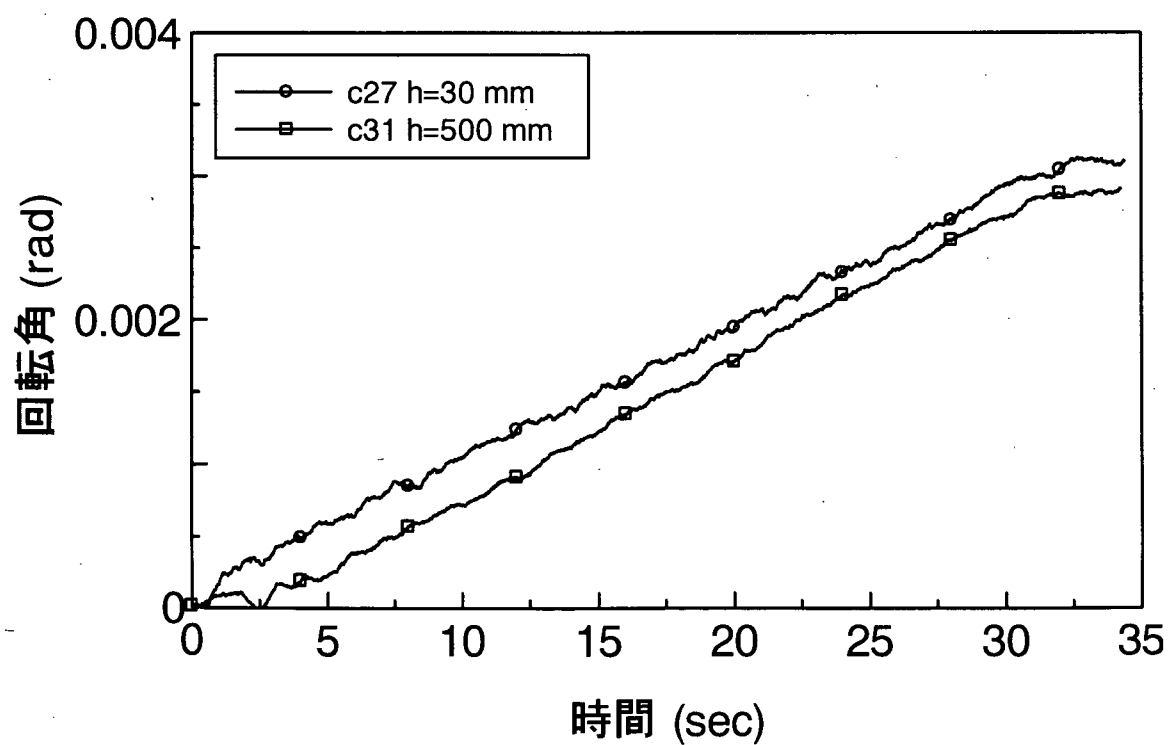


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.1.8 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

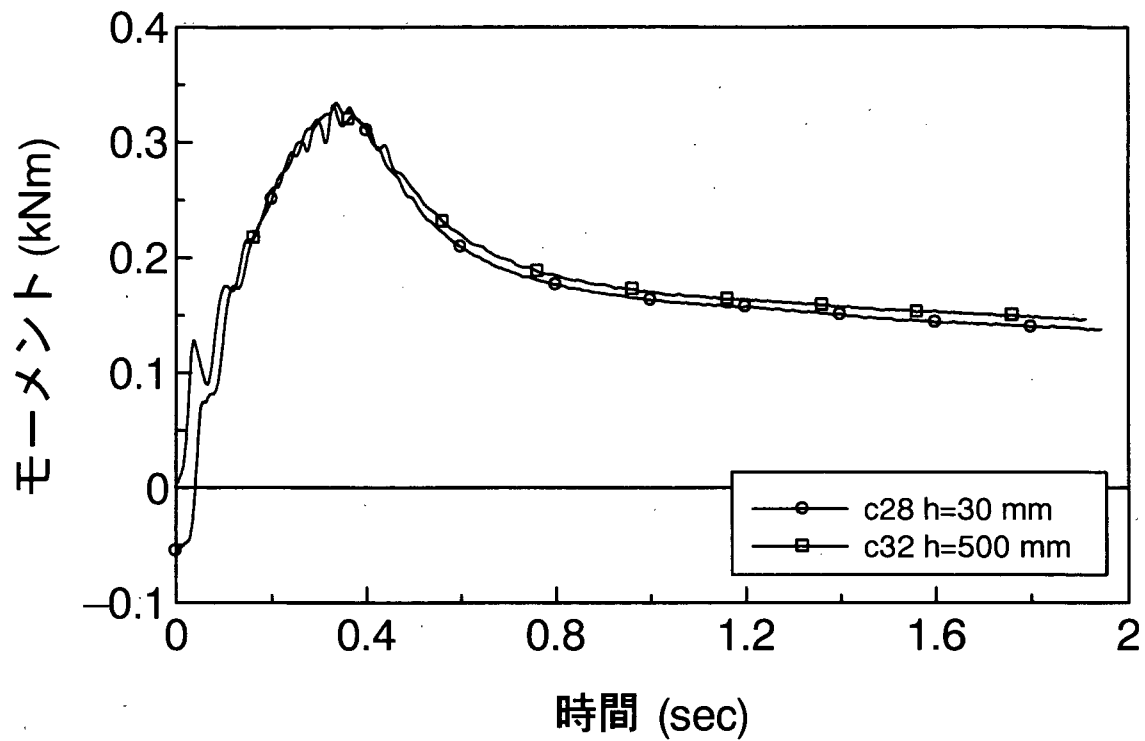


(a) モーメント～時間関係

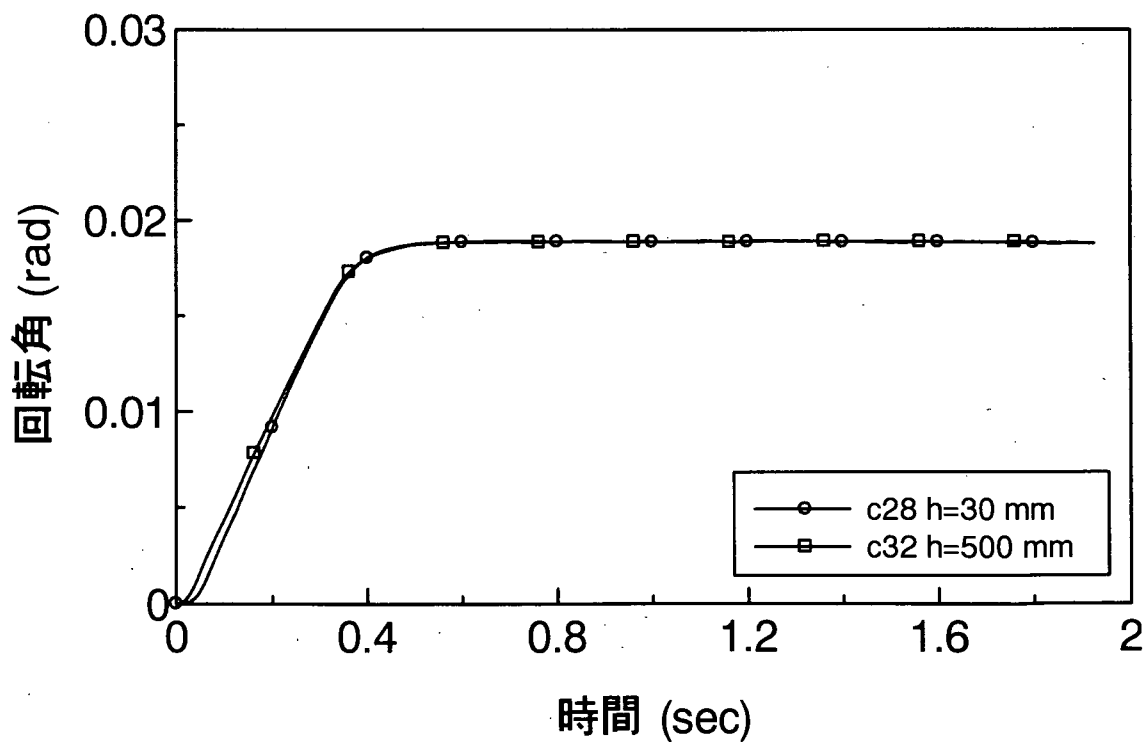


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.9 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

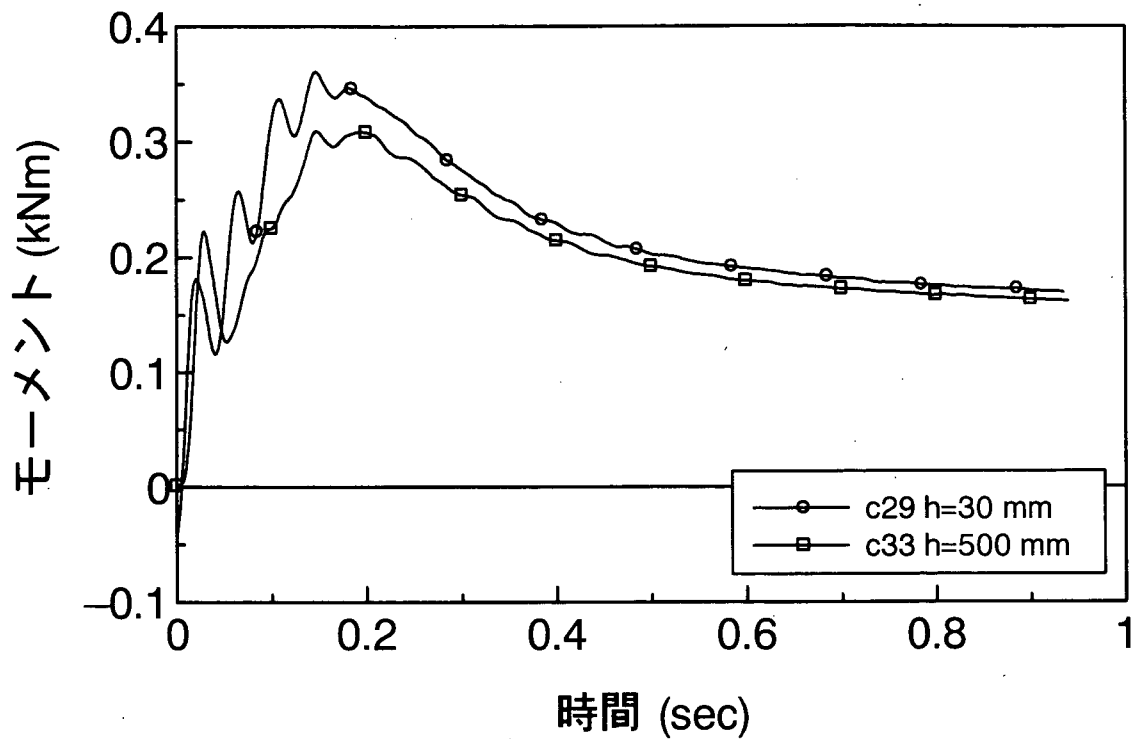


(a) モーメント～時間関係

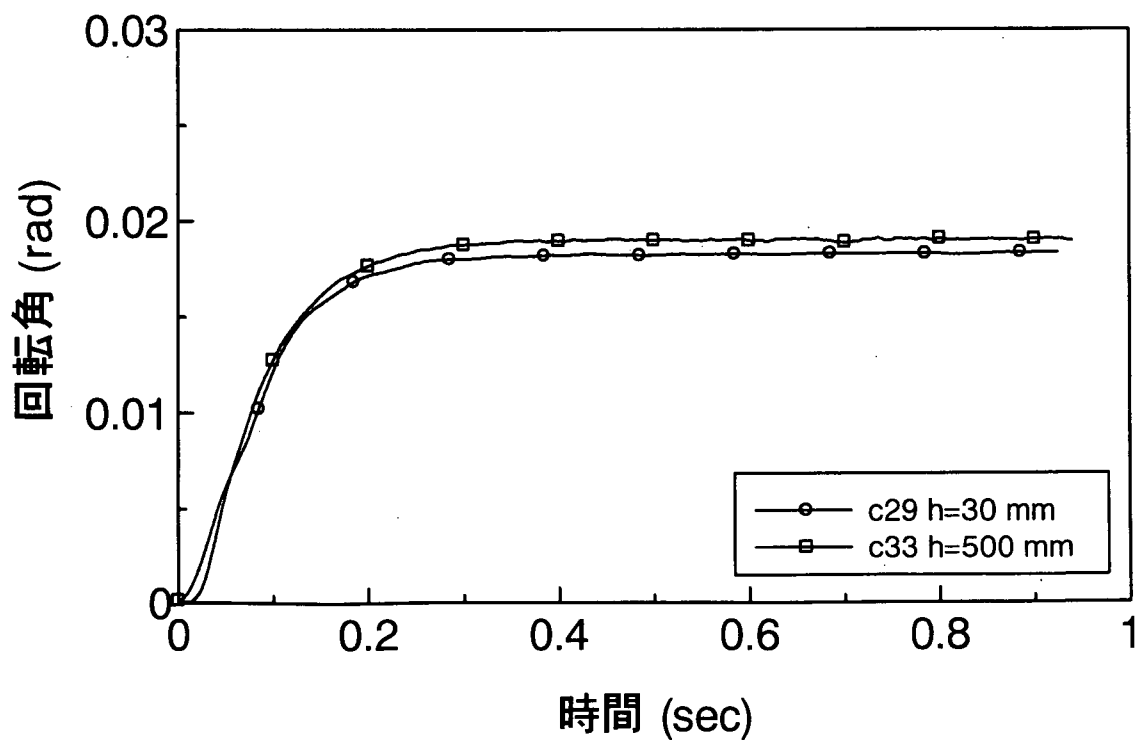


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.10 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

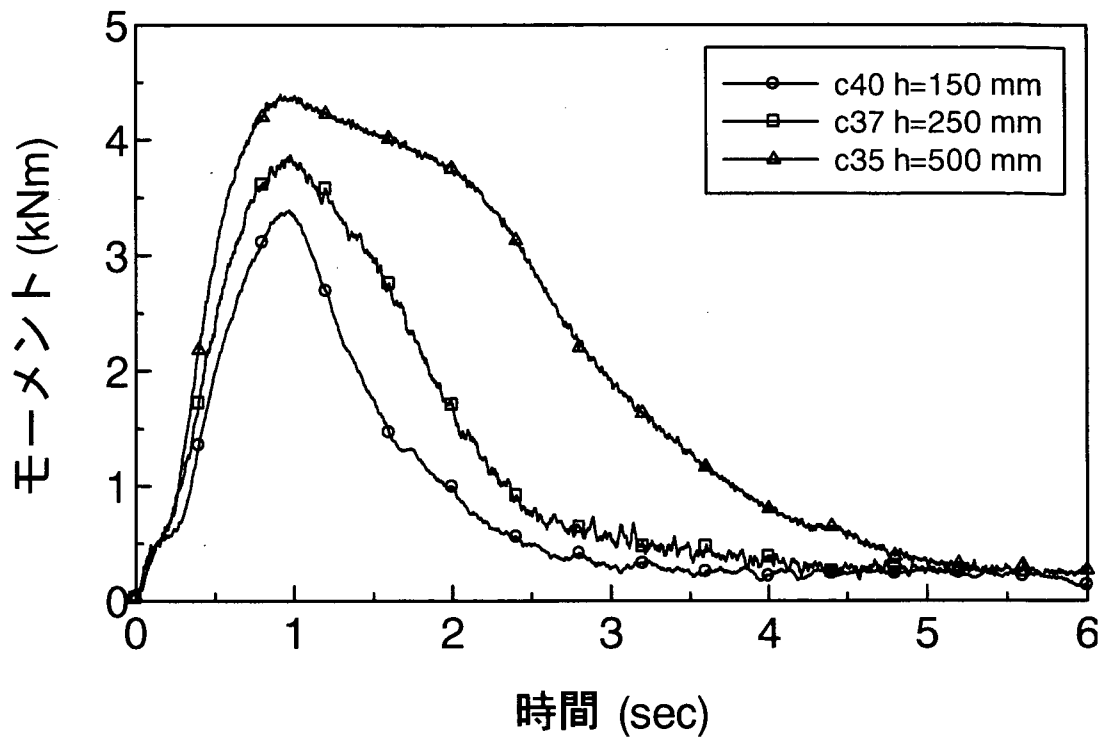


(a) モーメント～時間関係

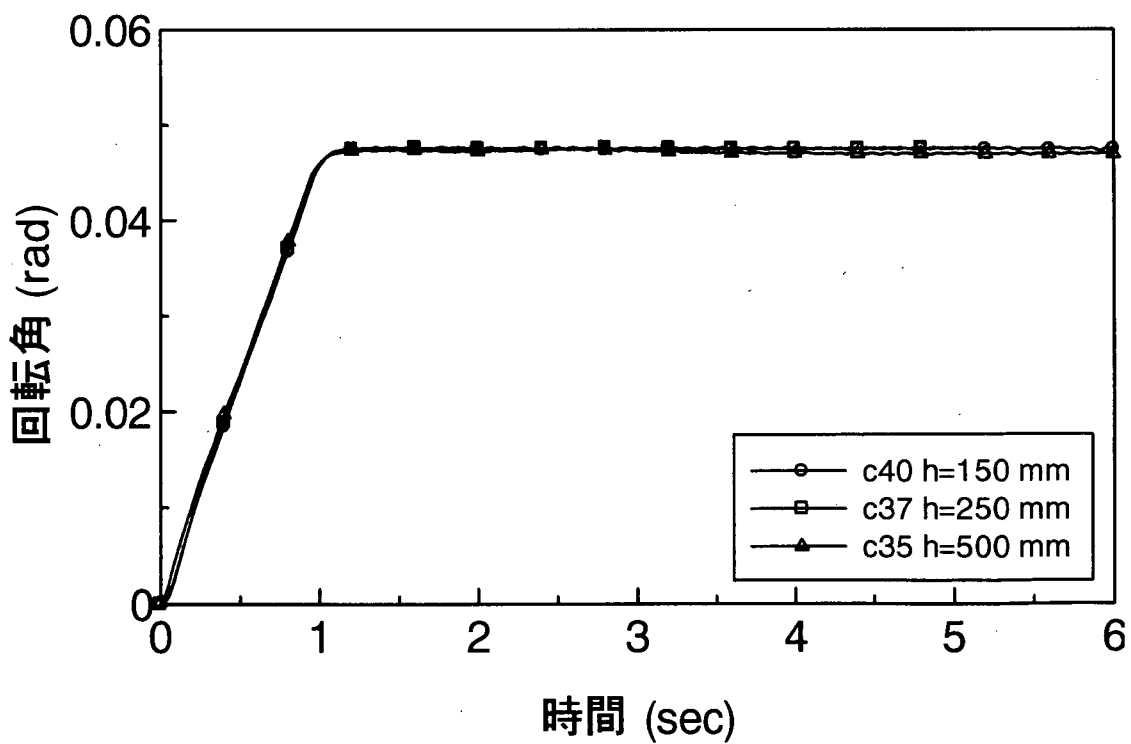


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.11 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

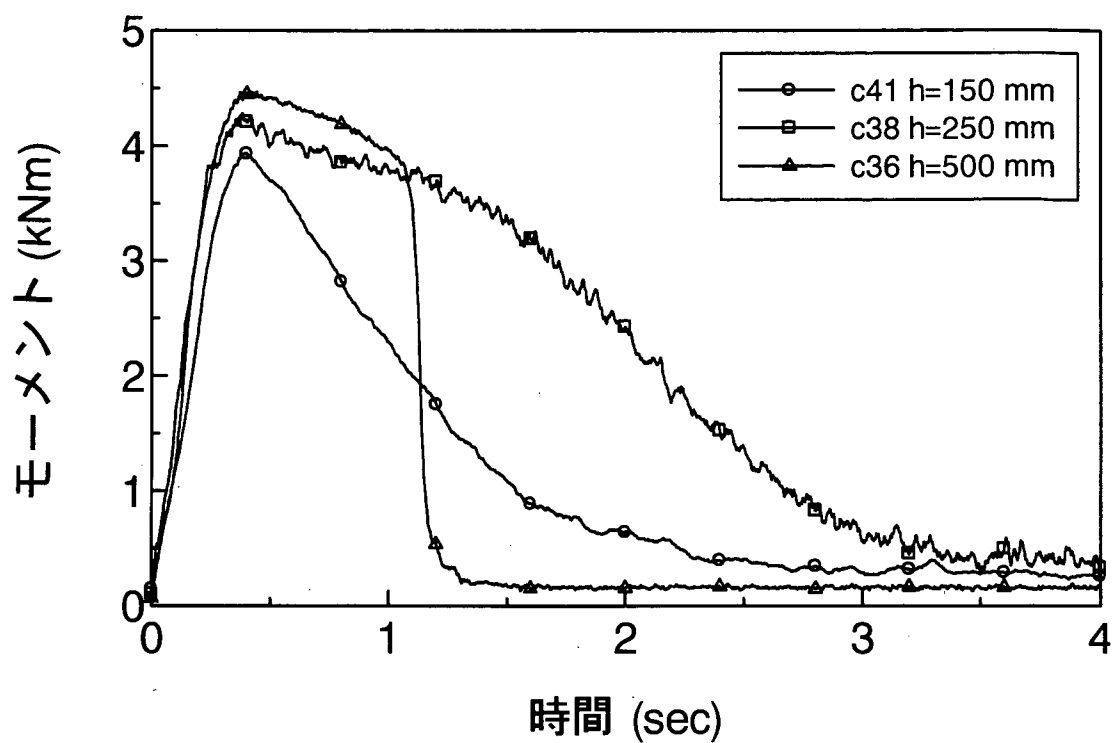


(a) モーメント～時間関係

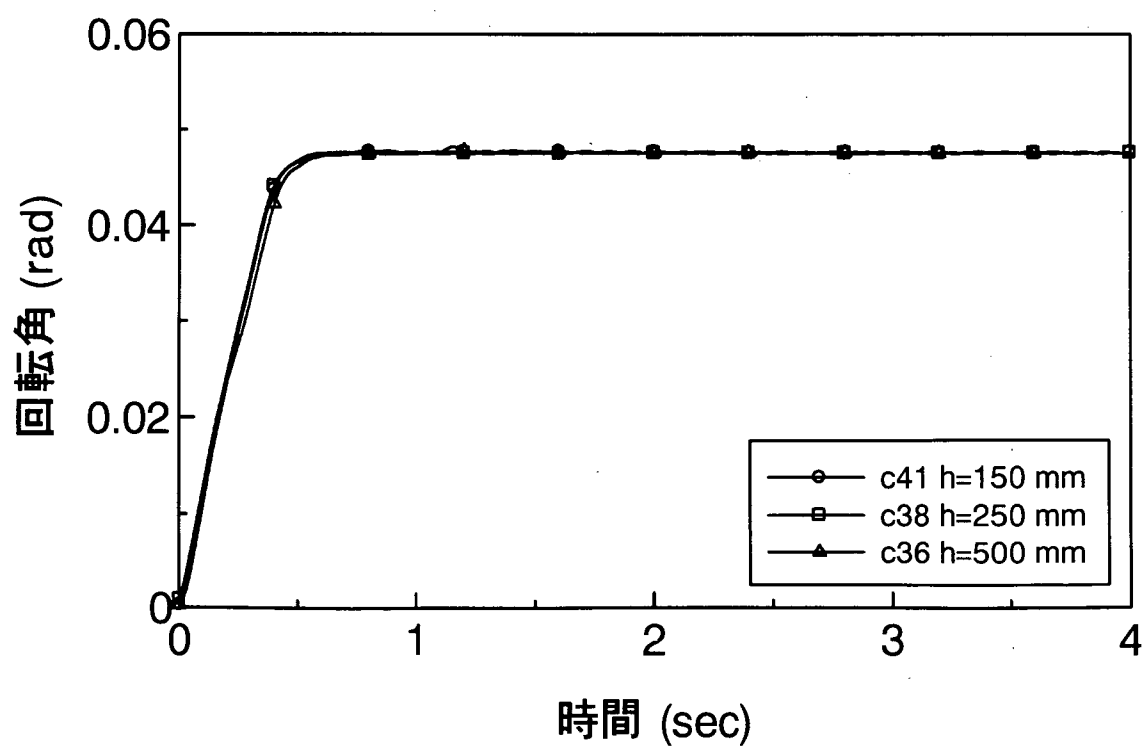


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.12 回転角速度 $\omega=0.05 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



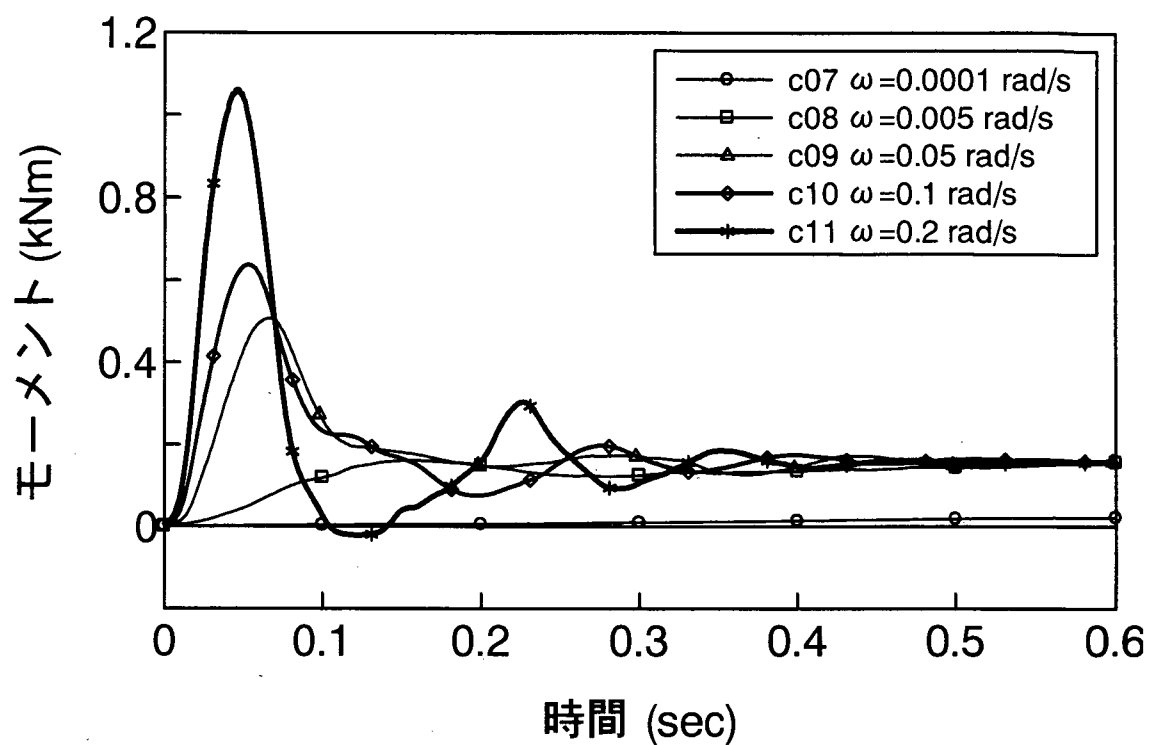
(a) モーメント～時間関係



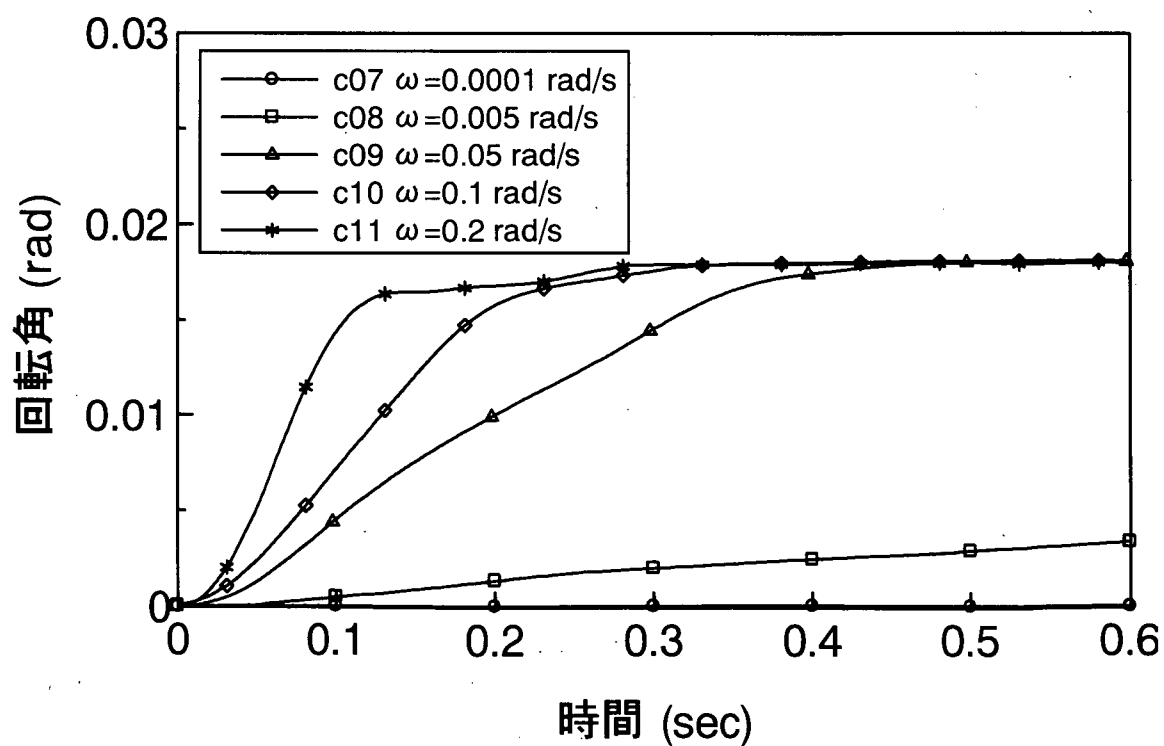
(b) 回転角～時間関係

図-付 1.1.13 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

1.2 回転角速度の影響

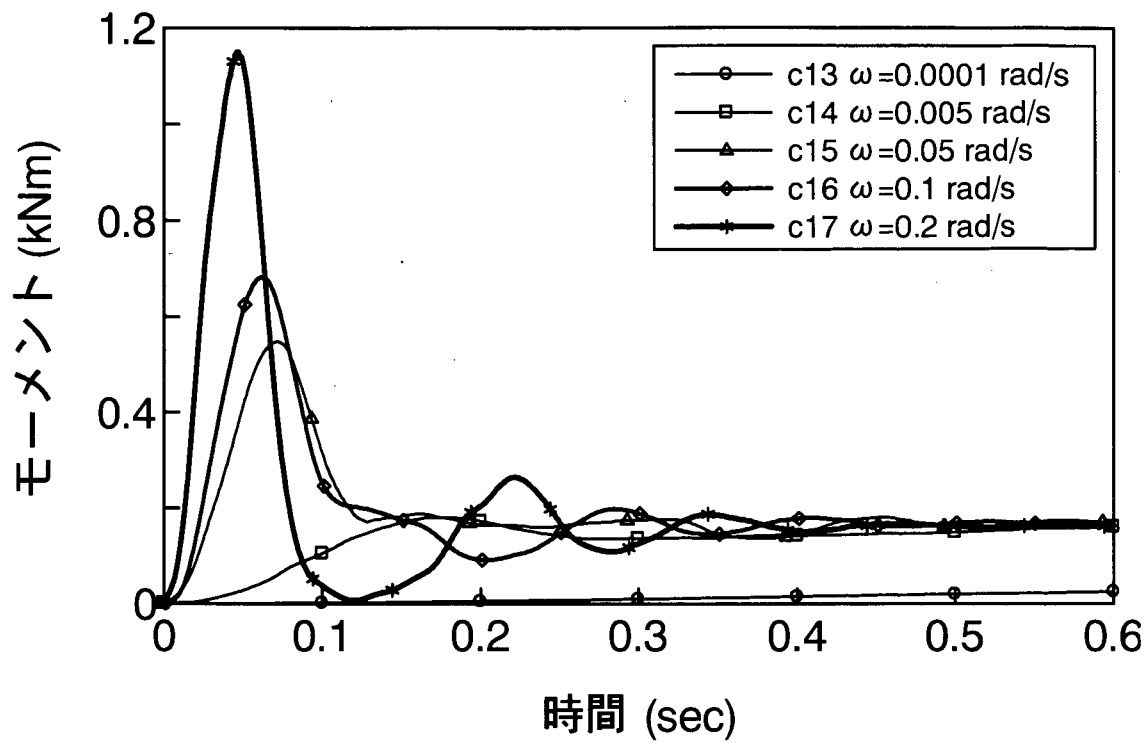


(a) モーメント～時間関係

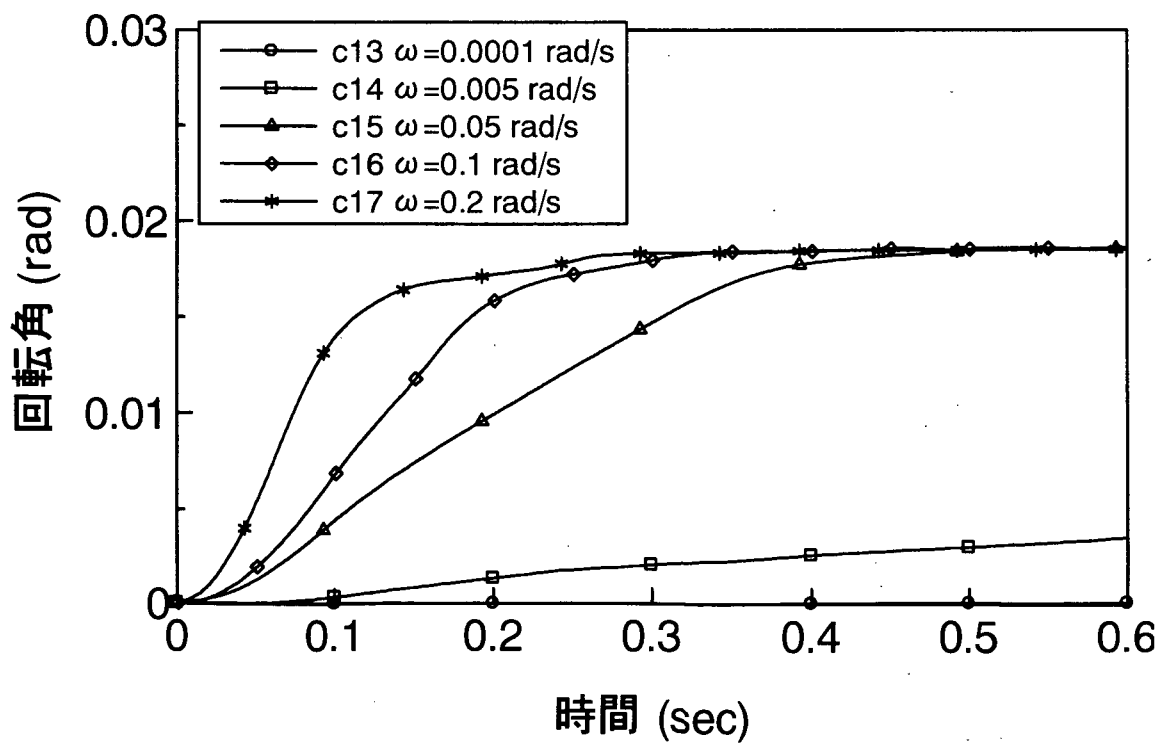


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.1 水深 $h=250$ mm, 弾性地盤

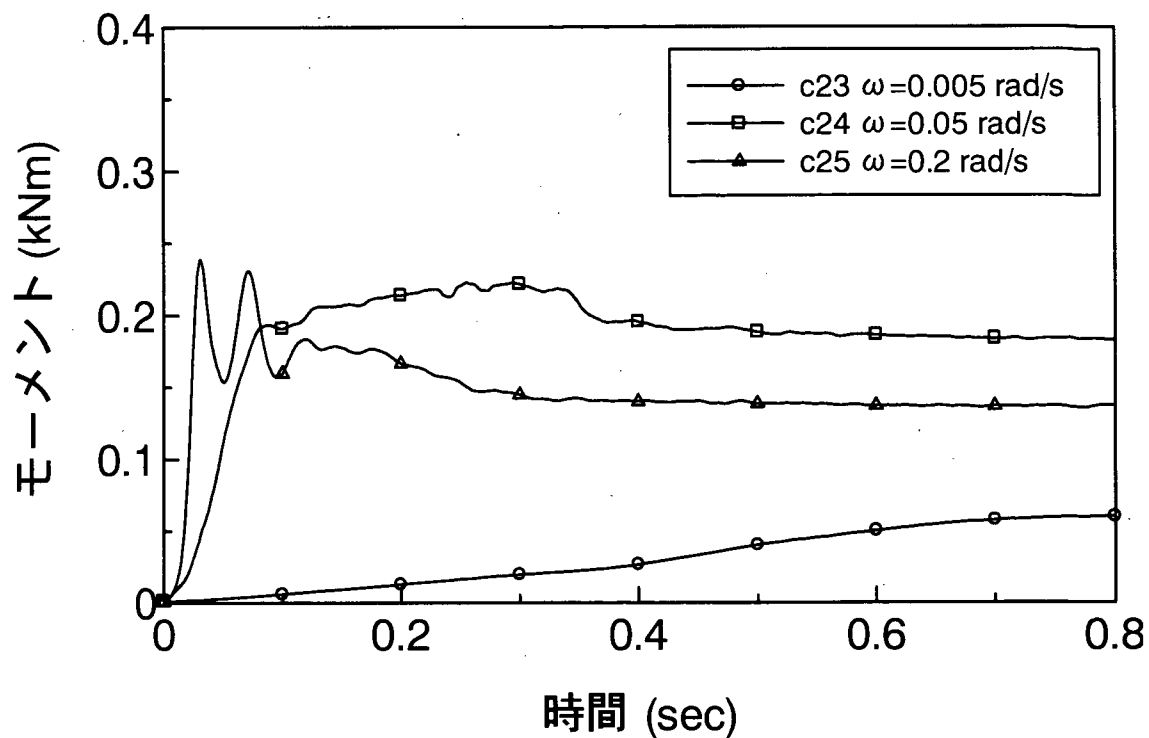


(a) モーメント～時間関係

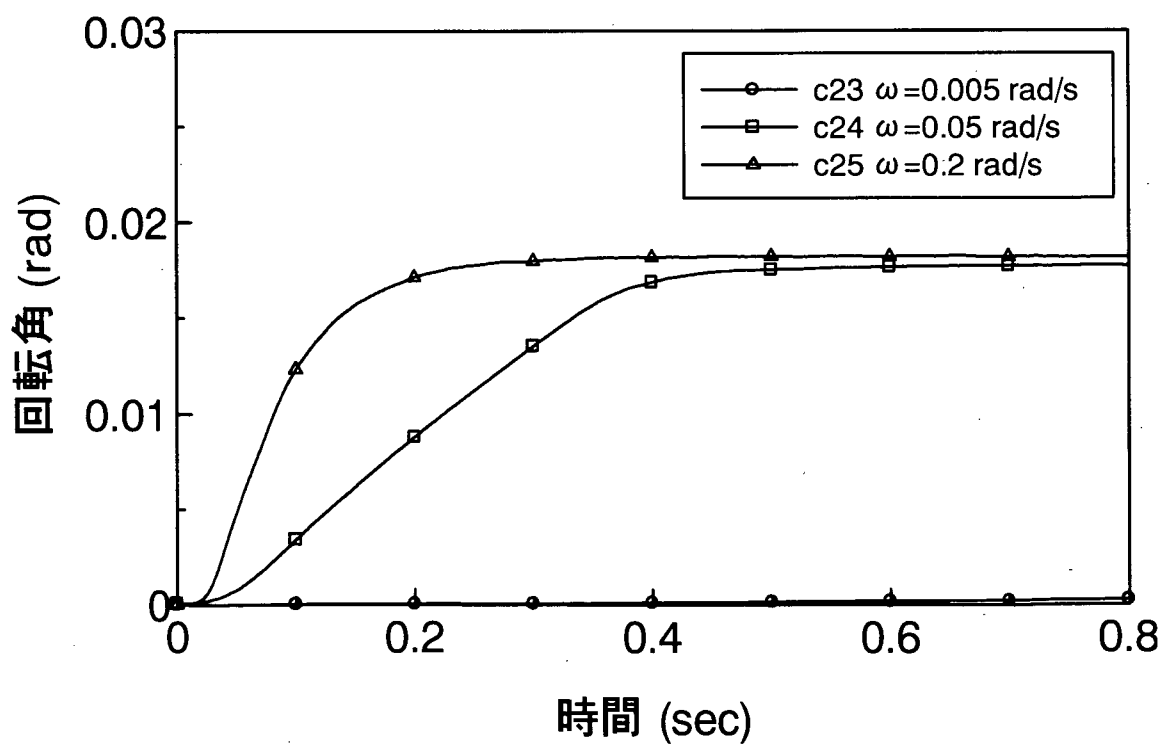


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.2 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤

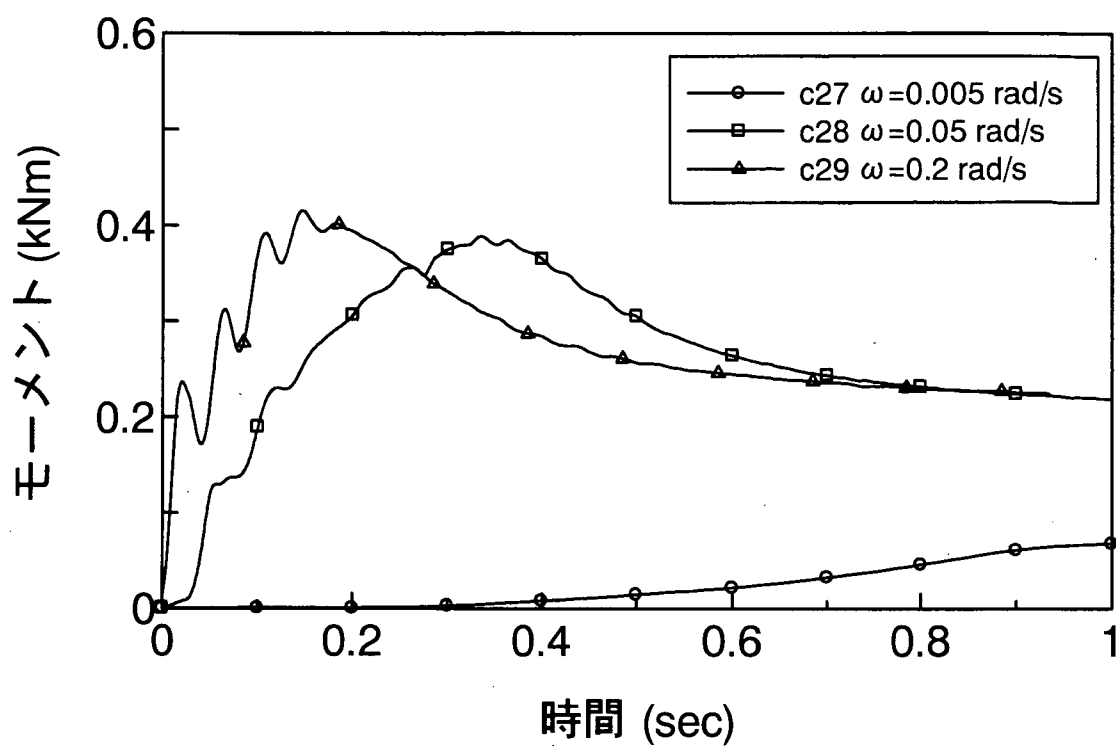


(a) モーメント～時間関係

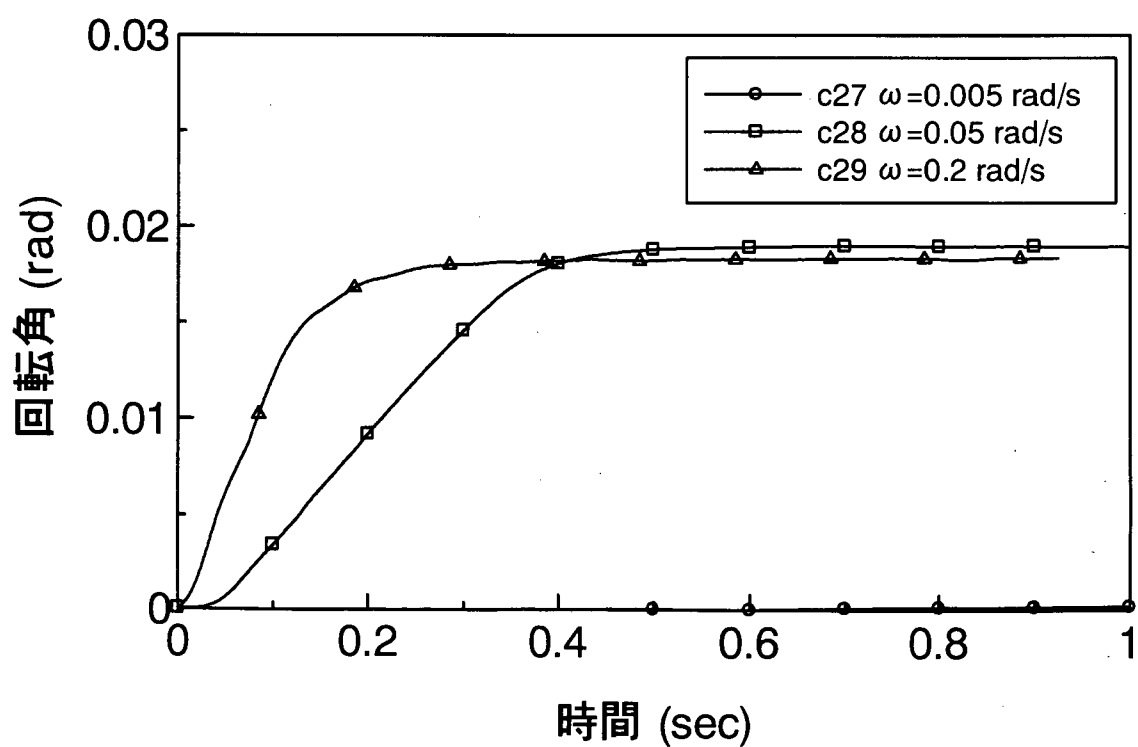


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.3 水深 $h=500$ mm, 砂地盤

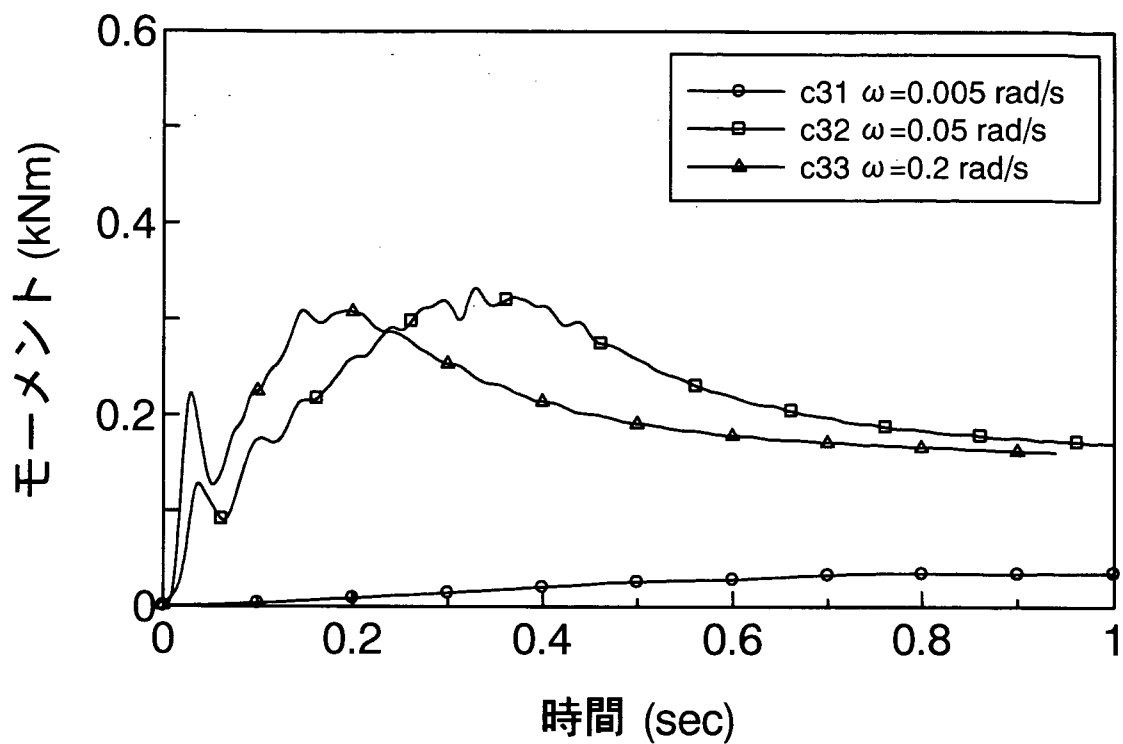


(a) モーメント～時間関係

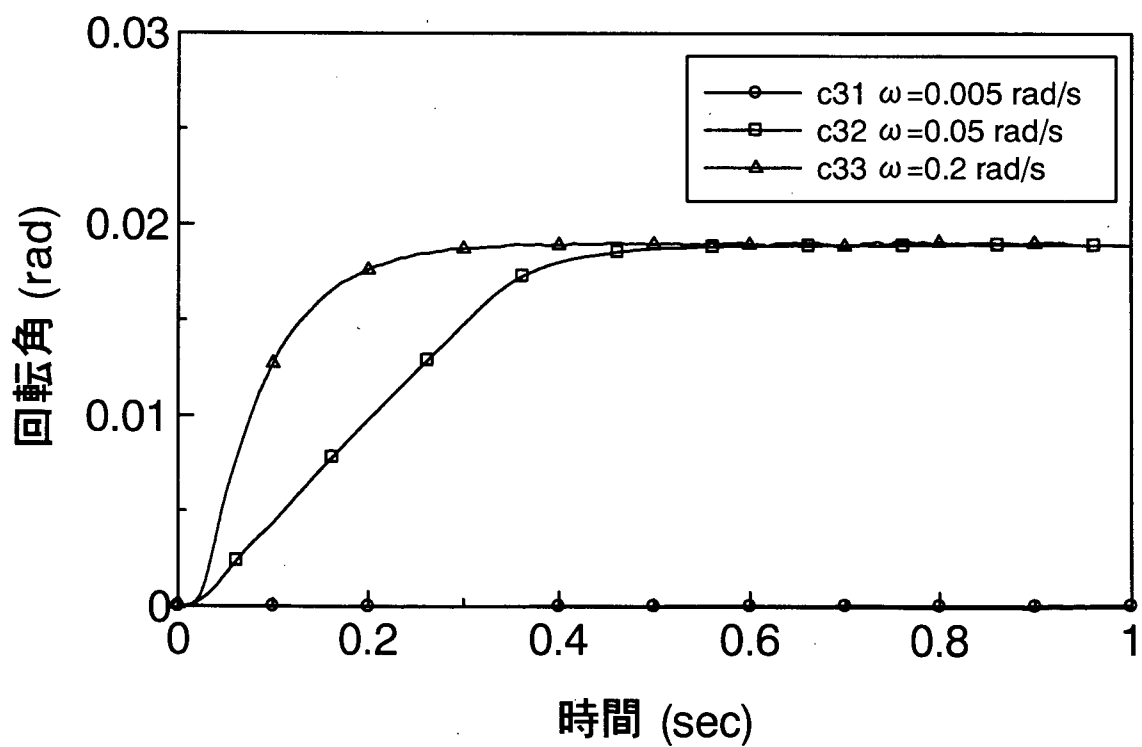


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.2.4 水深 $h=30$ mm, 砂地盤(止水板あり)

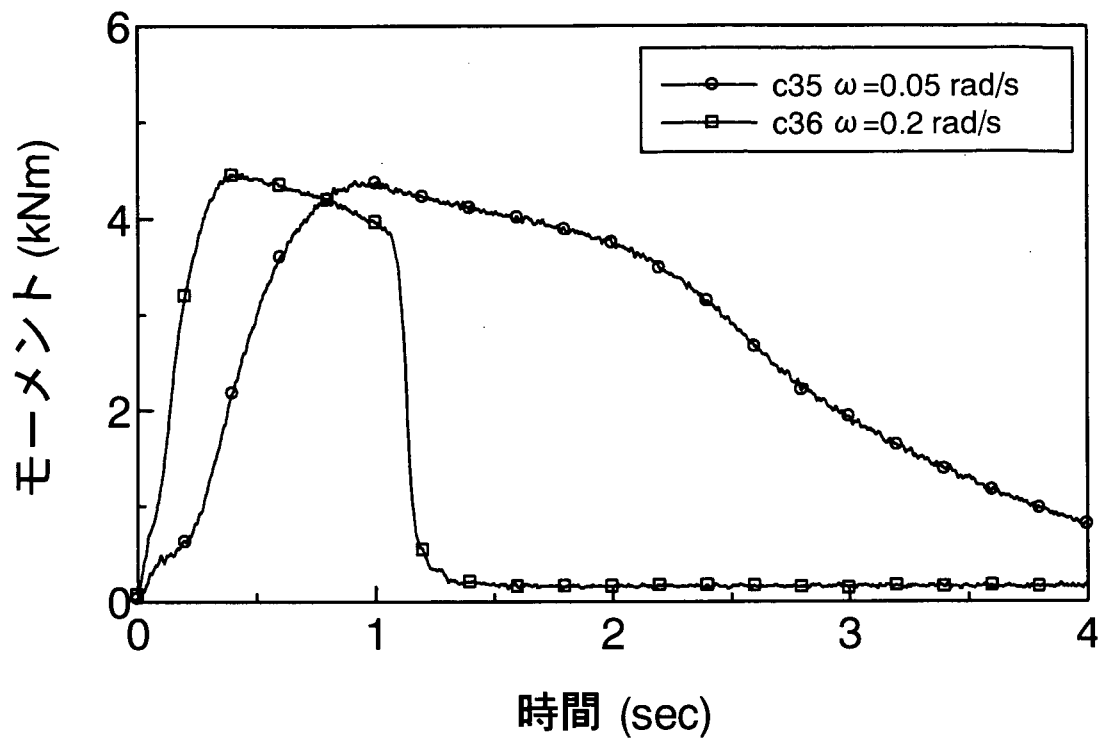


(a) モーメント～時間関係

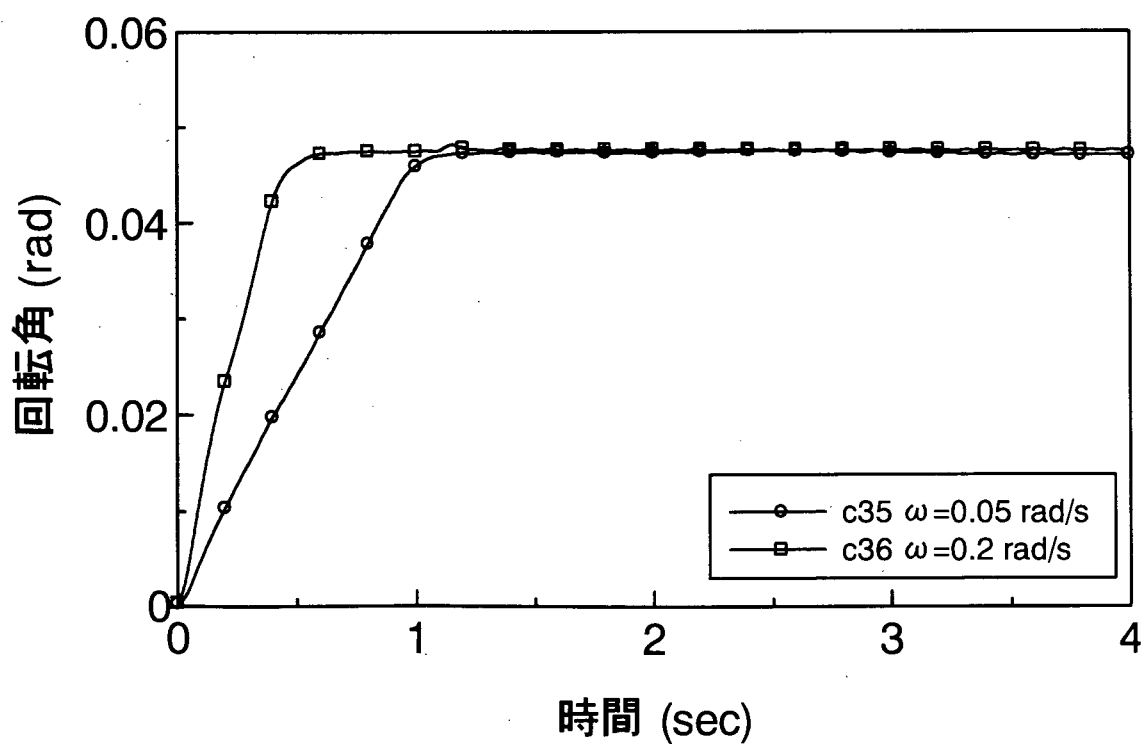


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.5 水深 $h=500$ mm, 砂地盤(止水板あり)

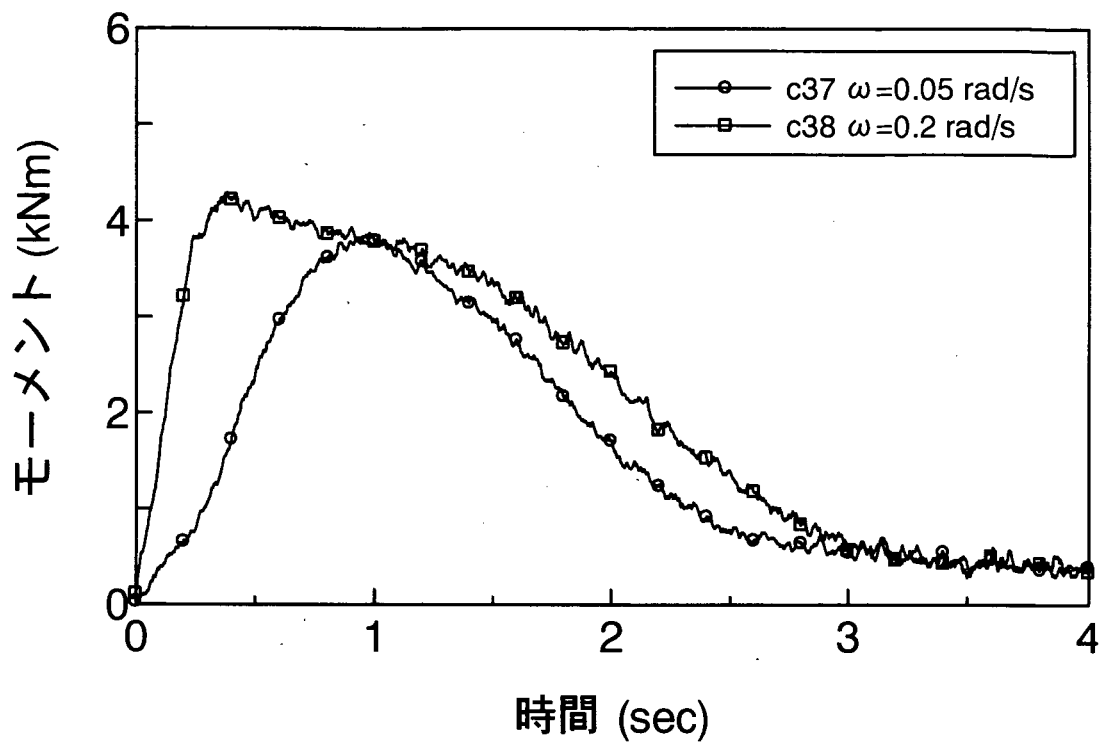


(a) モーメント～時間関係

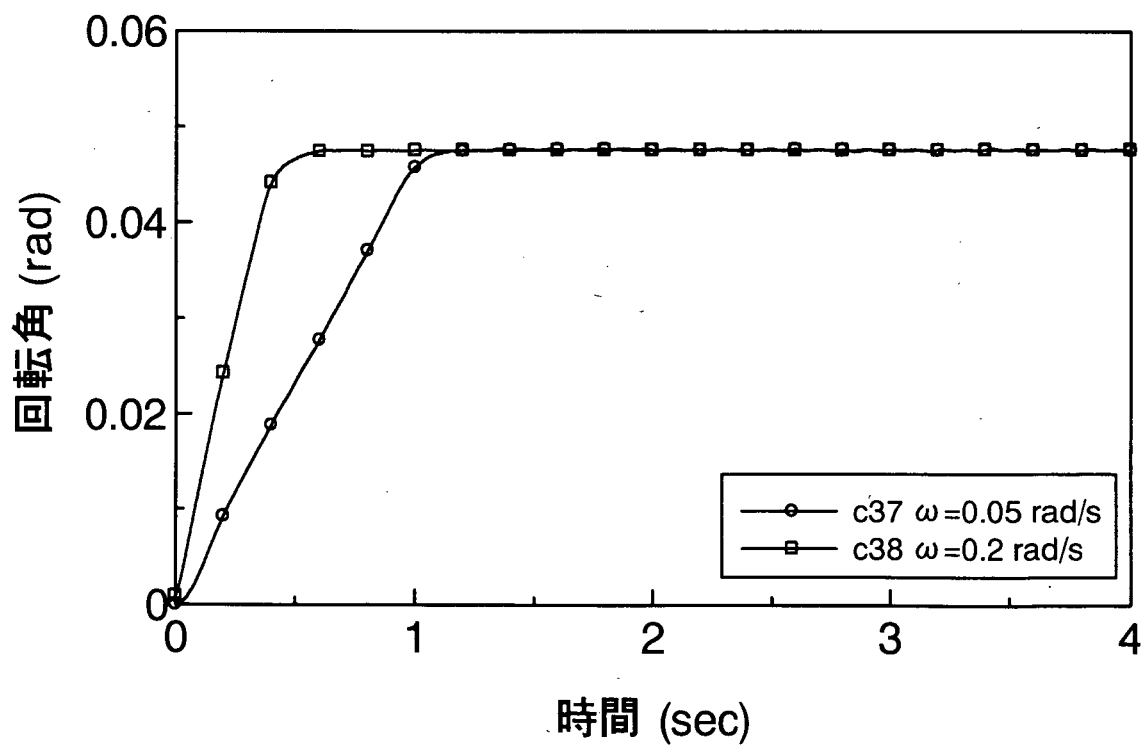


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.6 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤(止水ゴムあり)

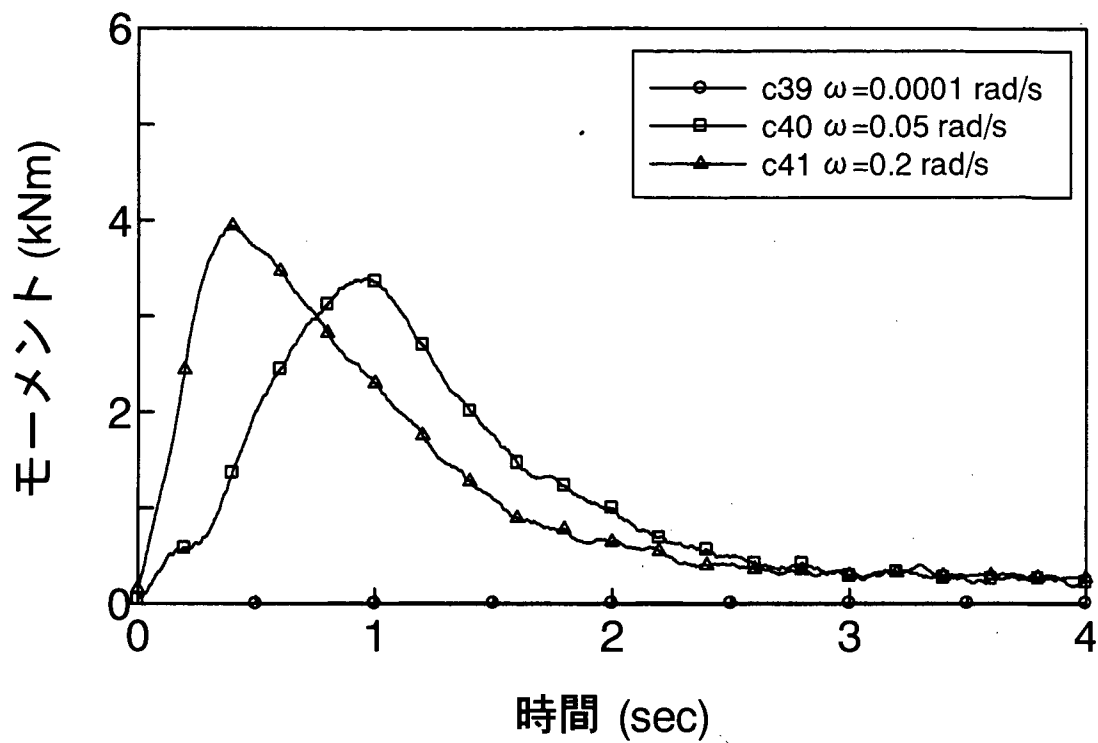


(a) モーメント～時間関係

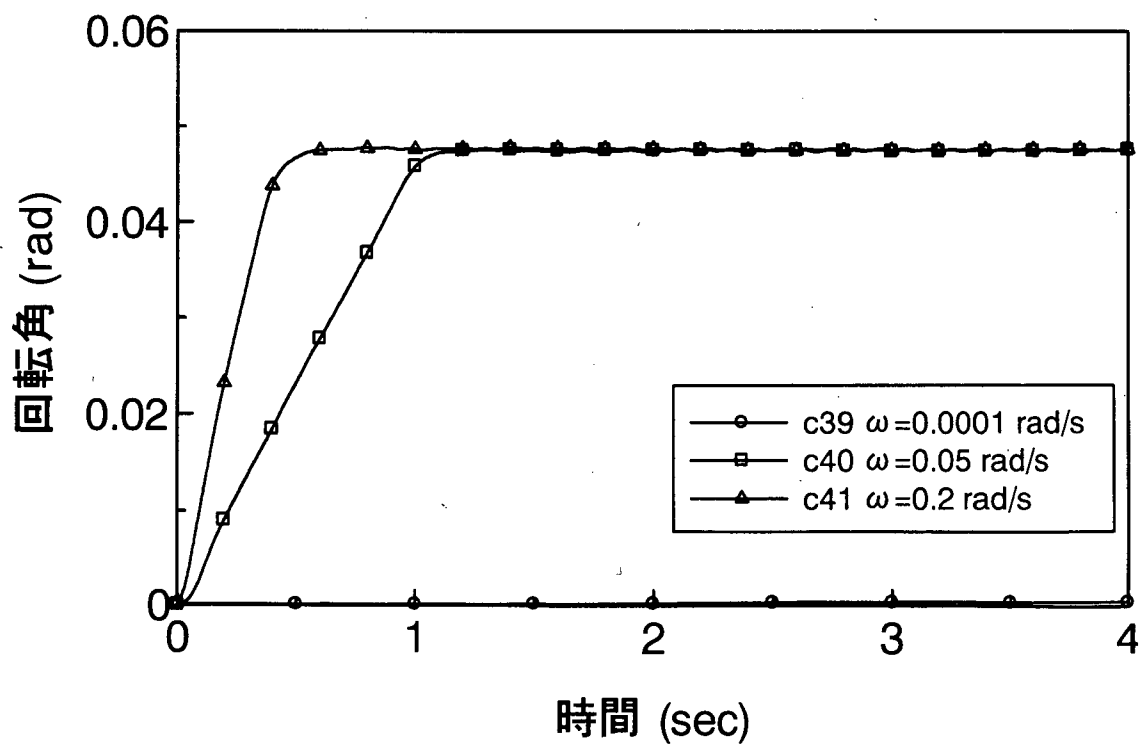


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.7 水深 $h=250$ mm, 弾性地盤(止水ゴムあり)



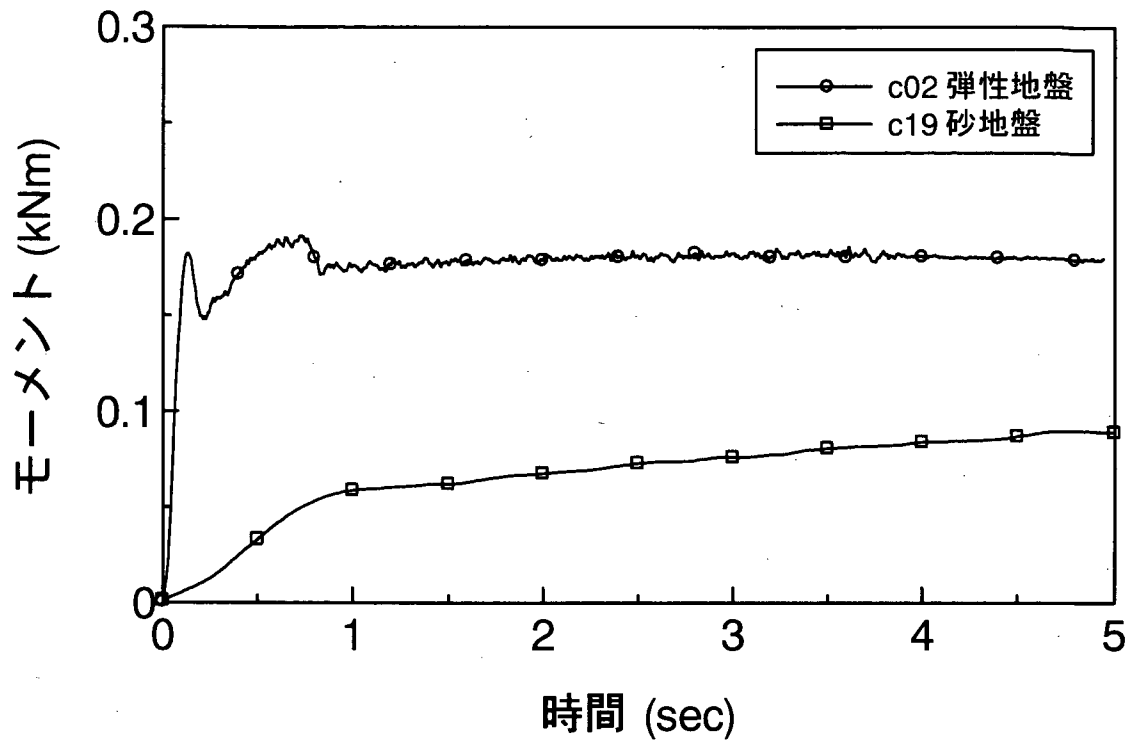
(a) モーメント～時間関係



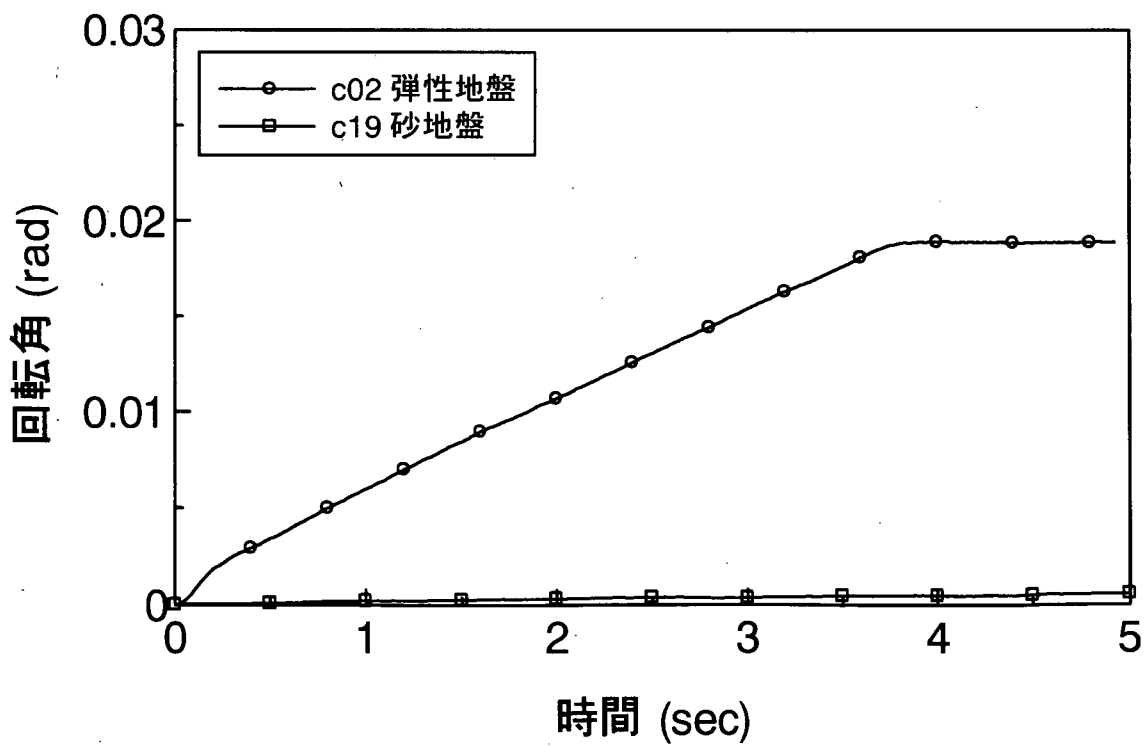
(b) 回転角～時間関係

図-付 1.2.8 水深 $h=150$ mm, 弾性地盤 (止水ゴムあり)

1.3 地盤条件の影響

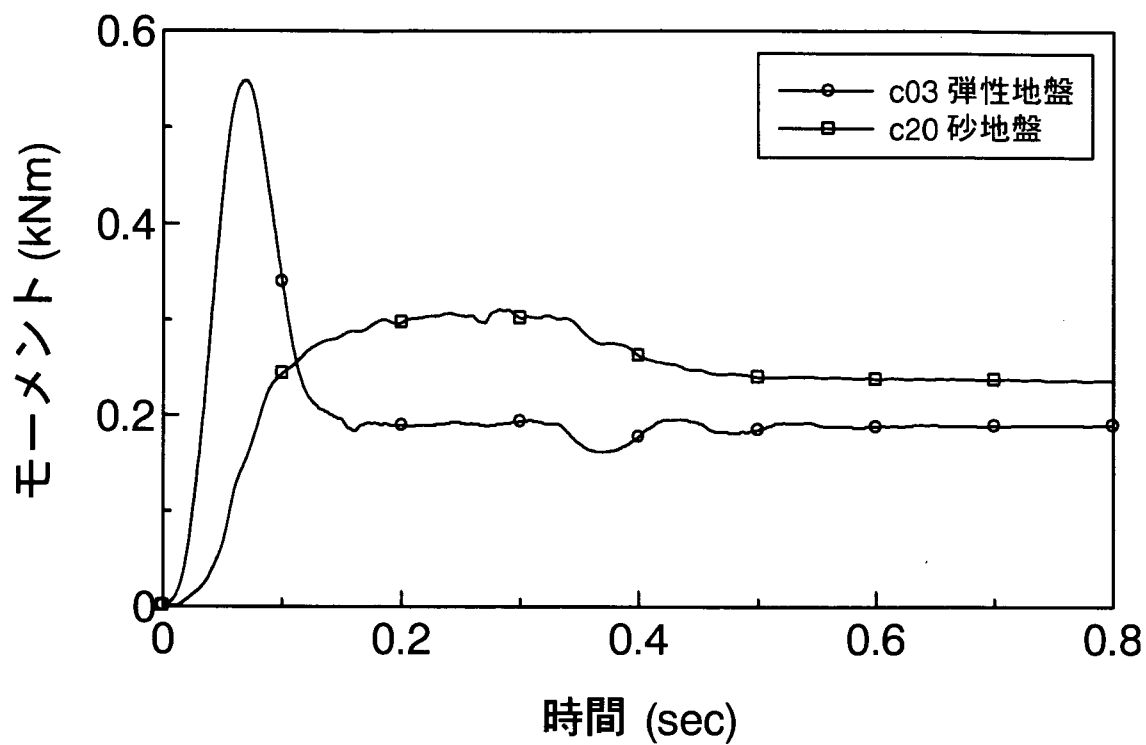


(a) モーメント～時間関係

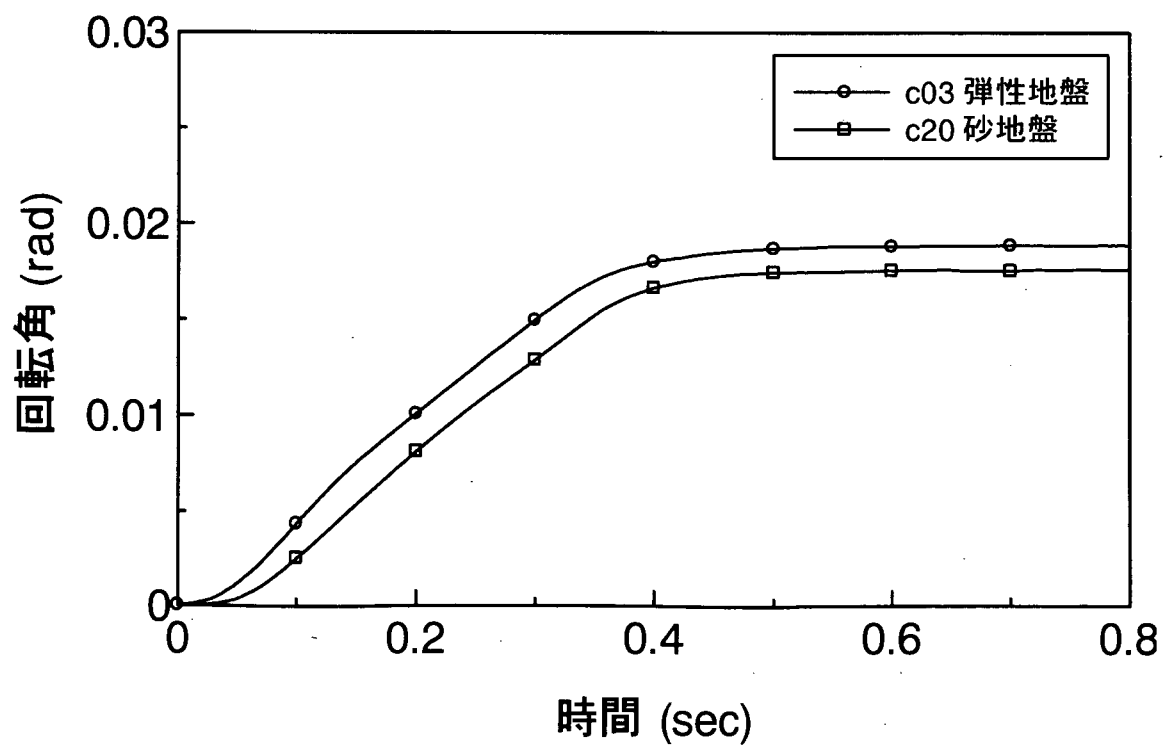


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.3.1 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$

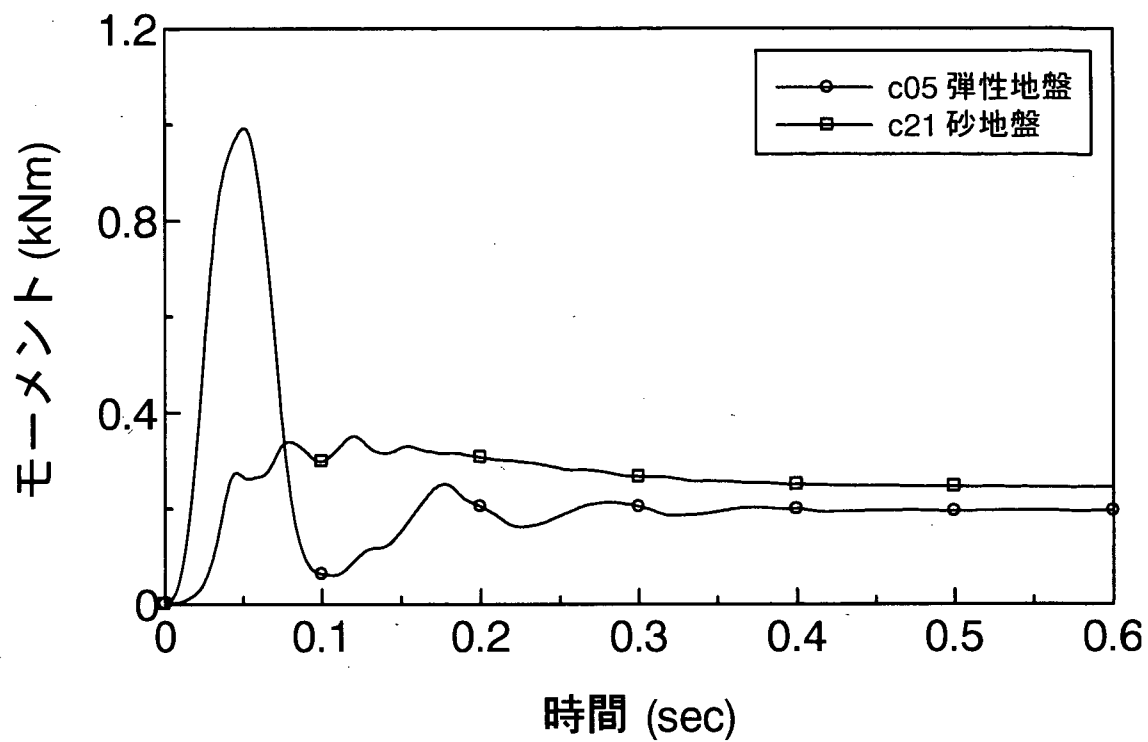


(a) モーメント～時間関係

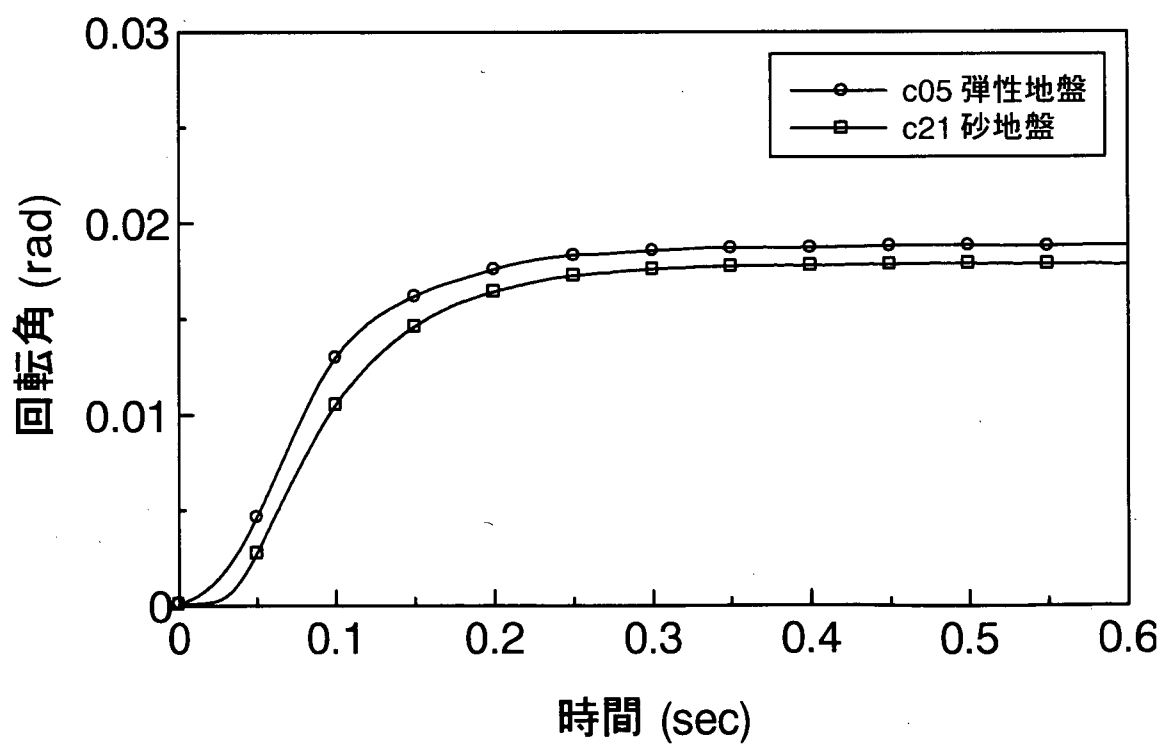


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.3.2 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

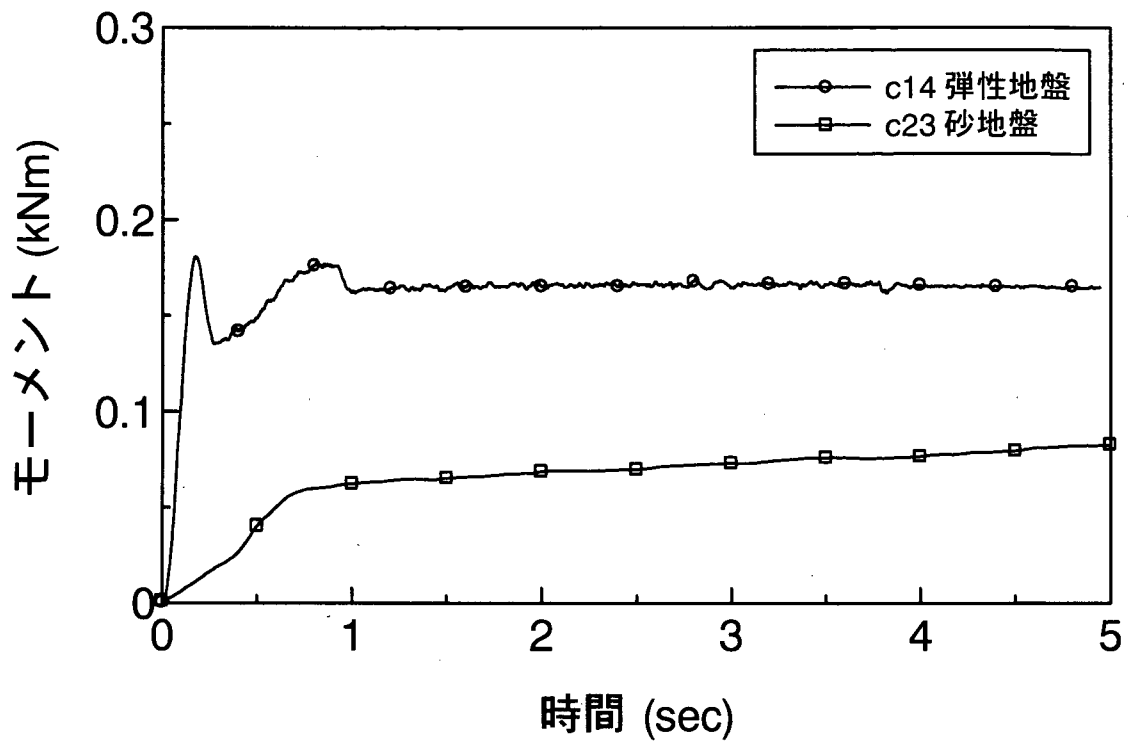


(a) モーメント～時間関係

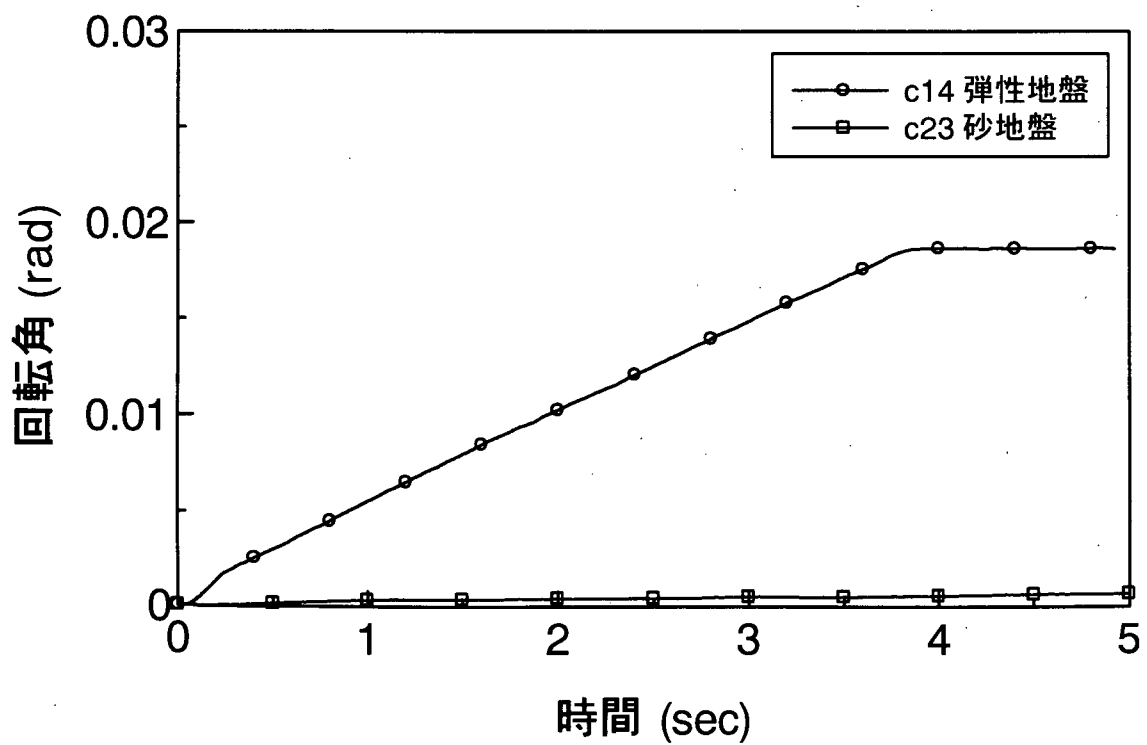


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.3.3 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

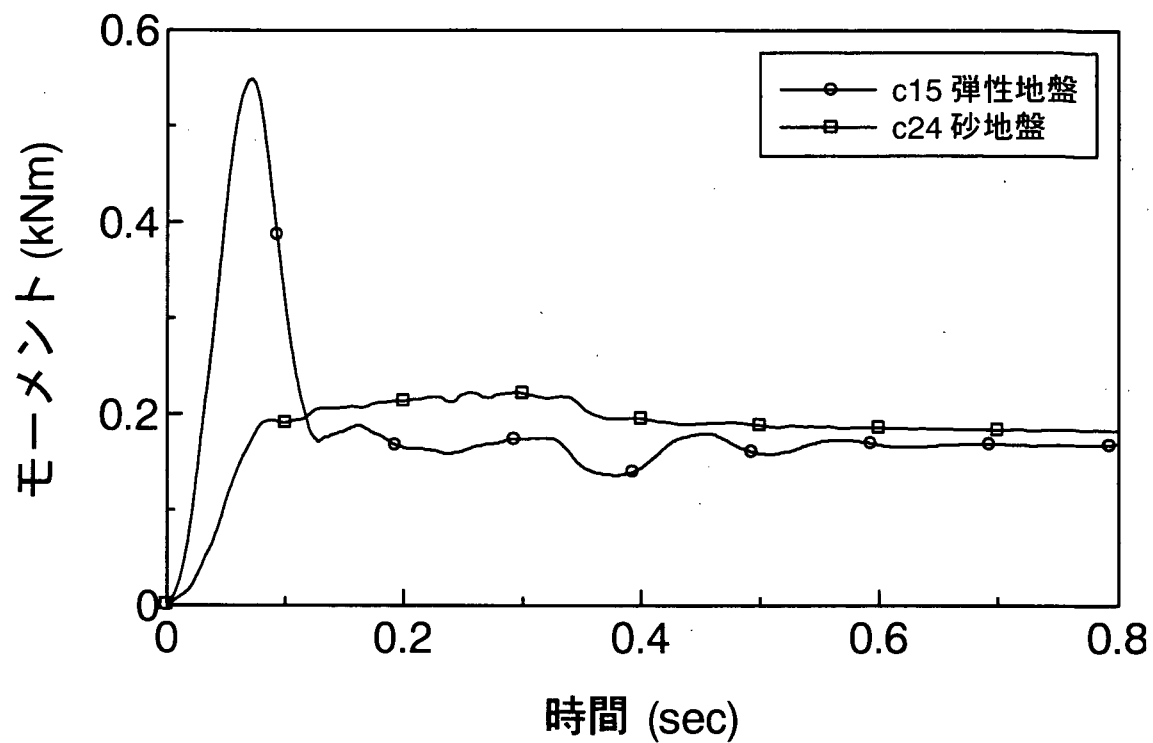


(a) モーメント～時間関係

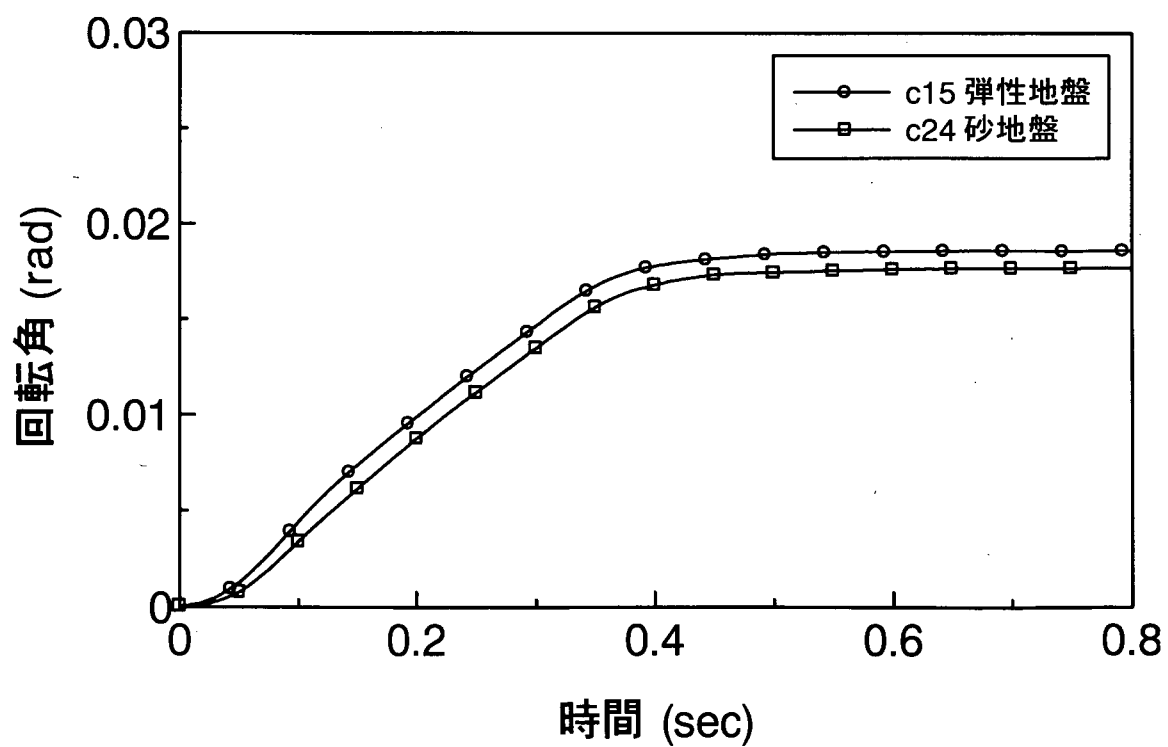


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.3.4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$

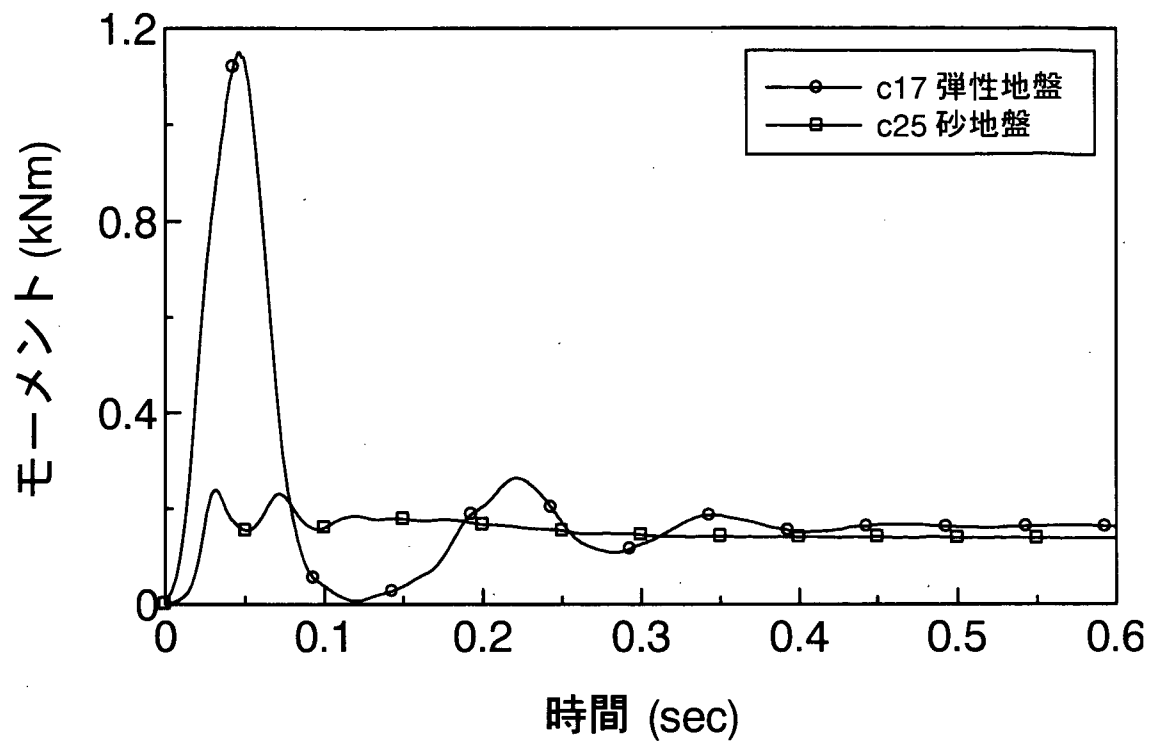


(a) モーメント～時間関係

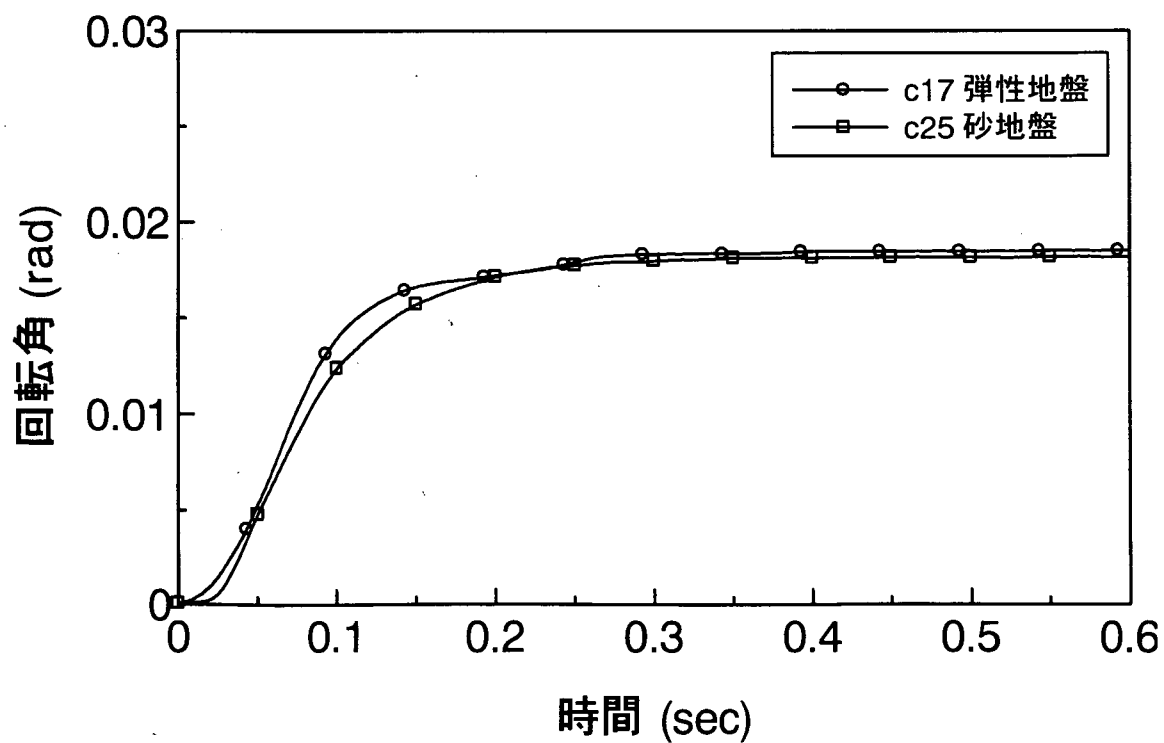


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.3.5 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$



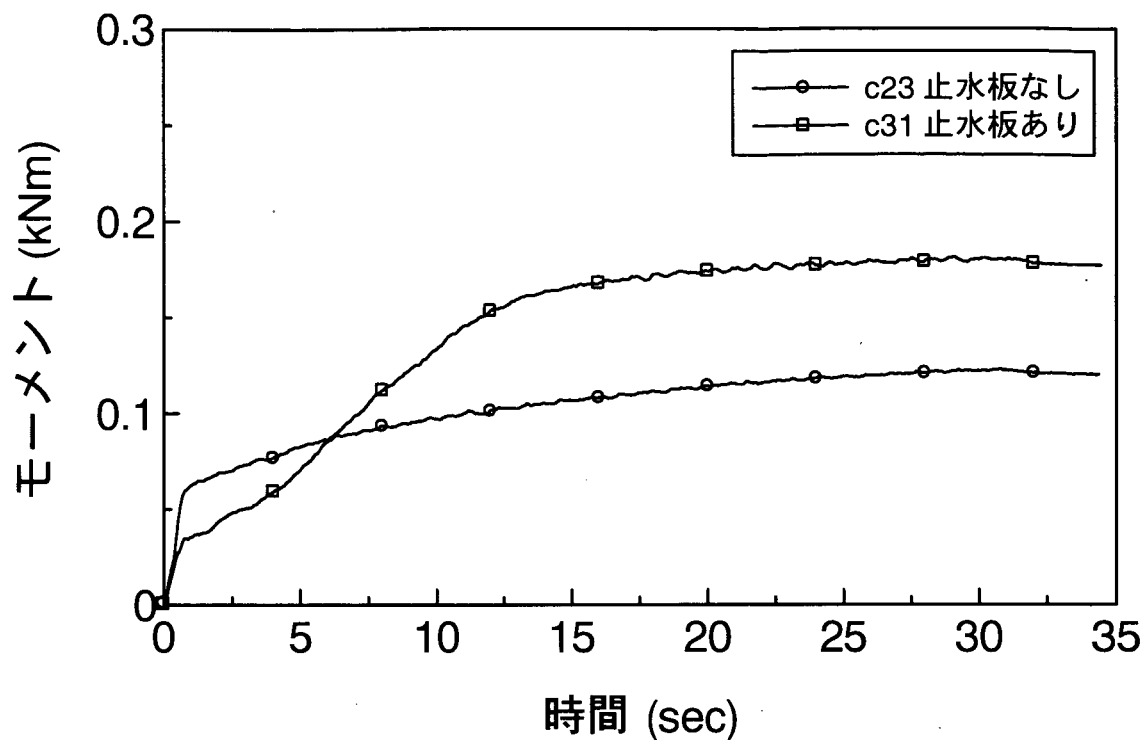
(a) モーメント～時間関係



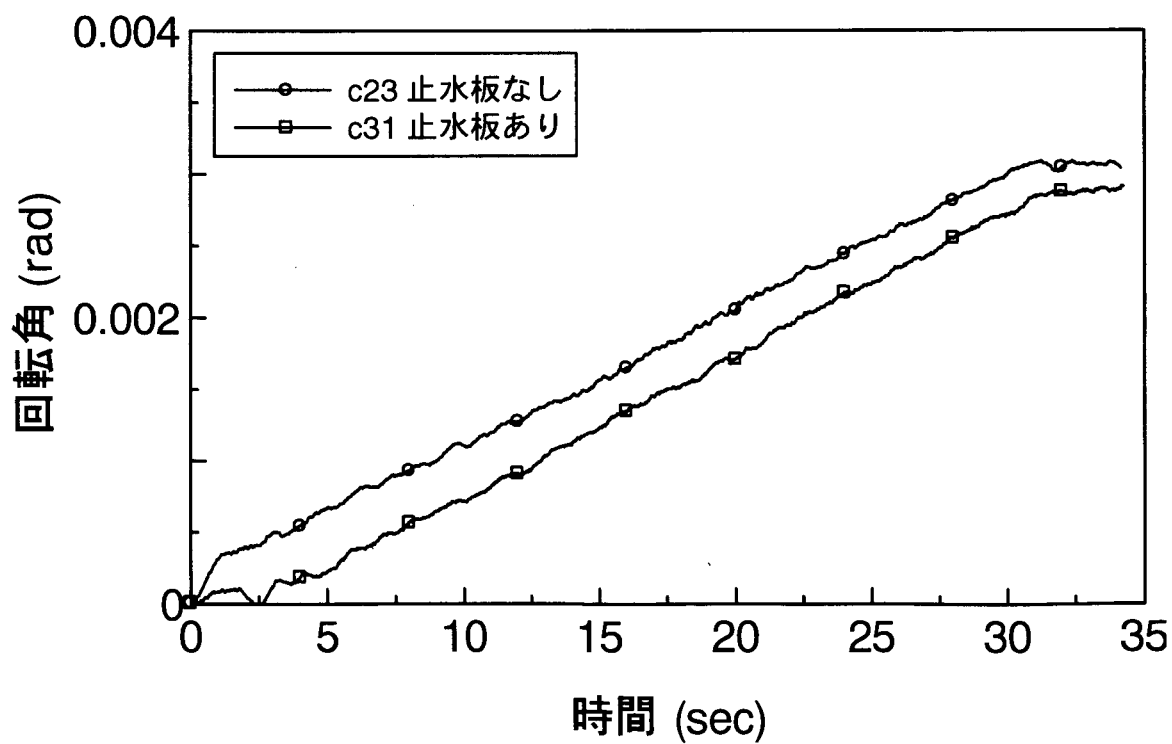
(b) 回転角～時間関係

図-付 1.3.6 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

1.4 止水条件の影響(砂地盤)

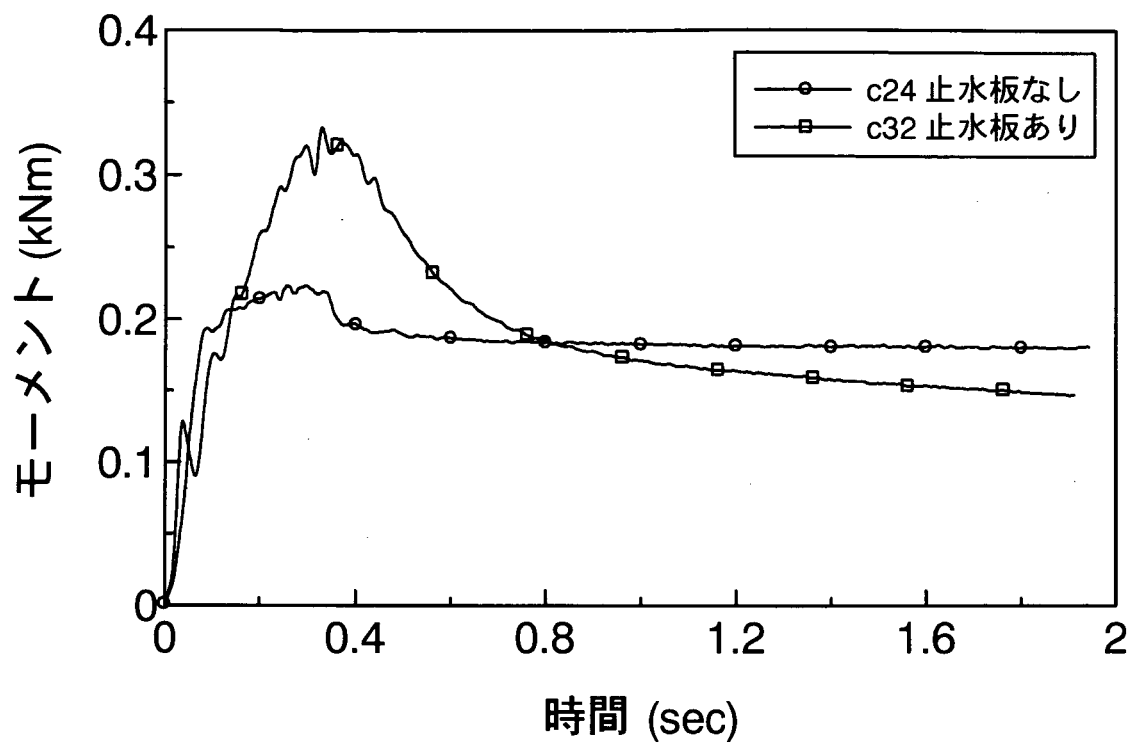


(a) モーメント～時間関係

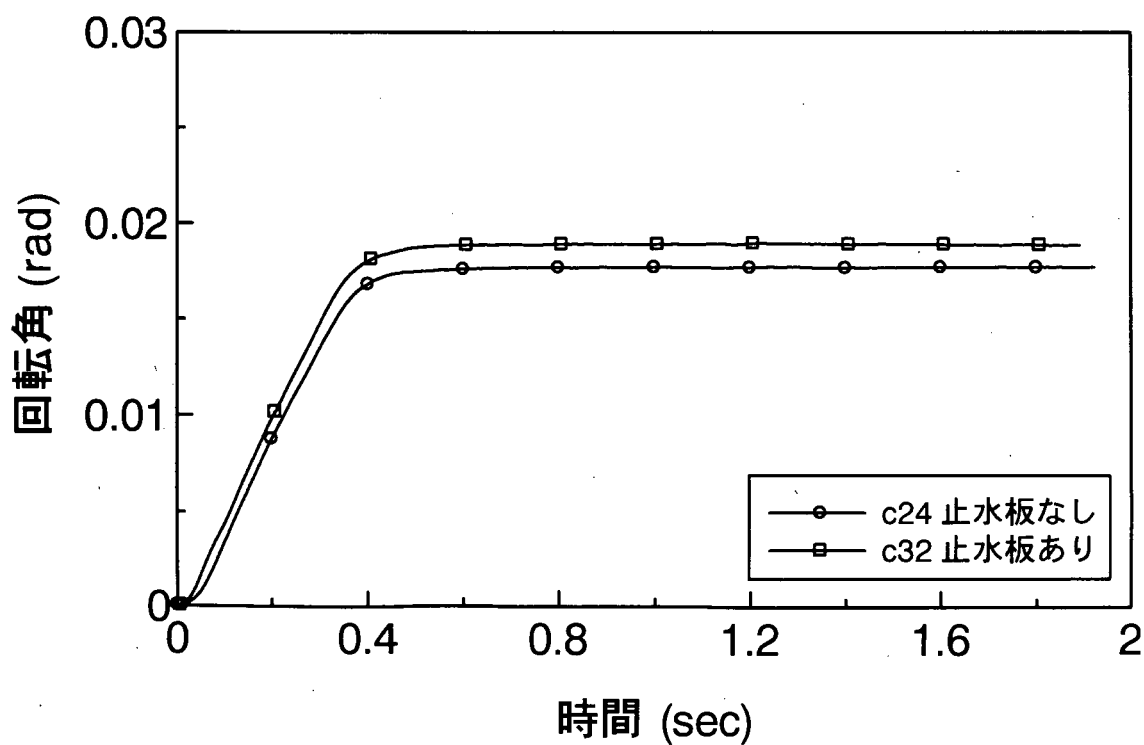


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.4.1 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$

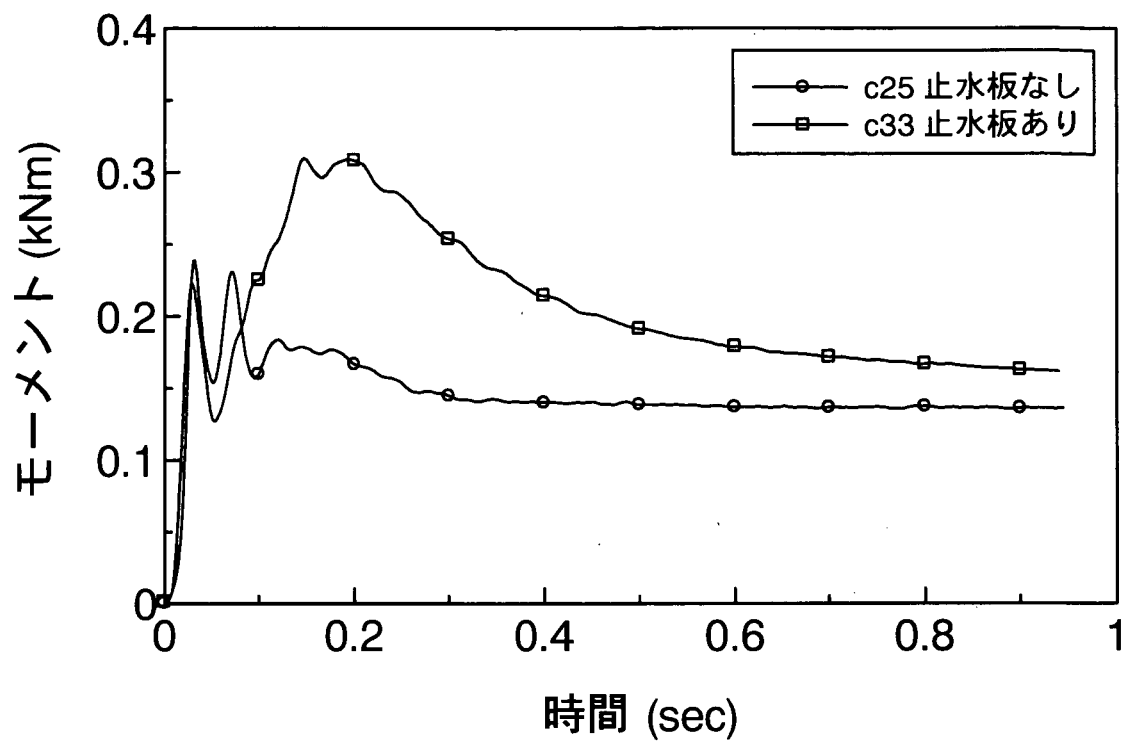


(a) モーメント～時間関係

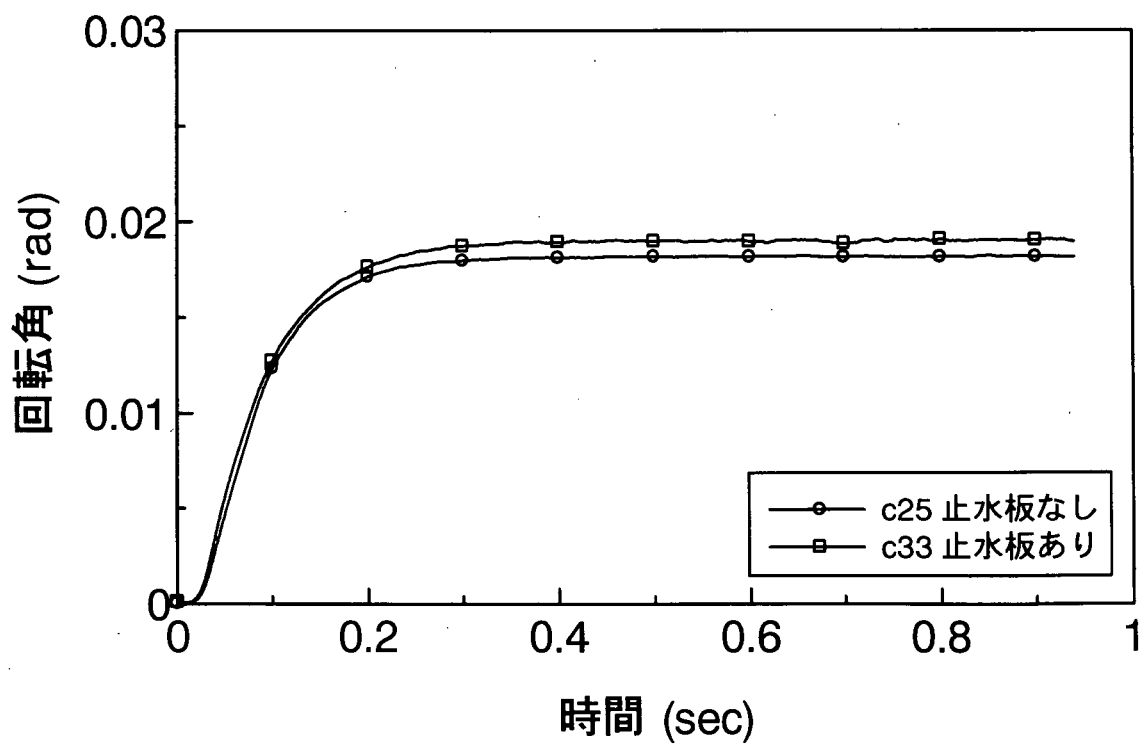


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.4.2 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$



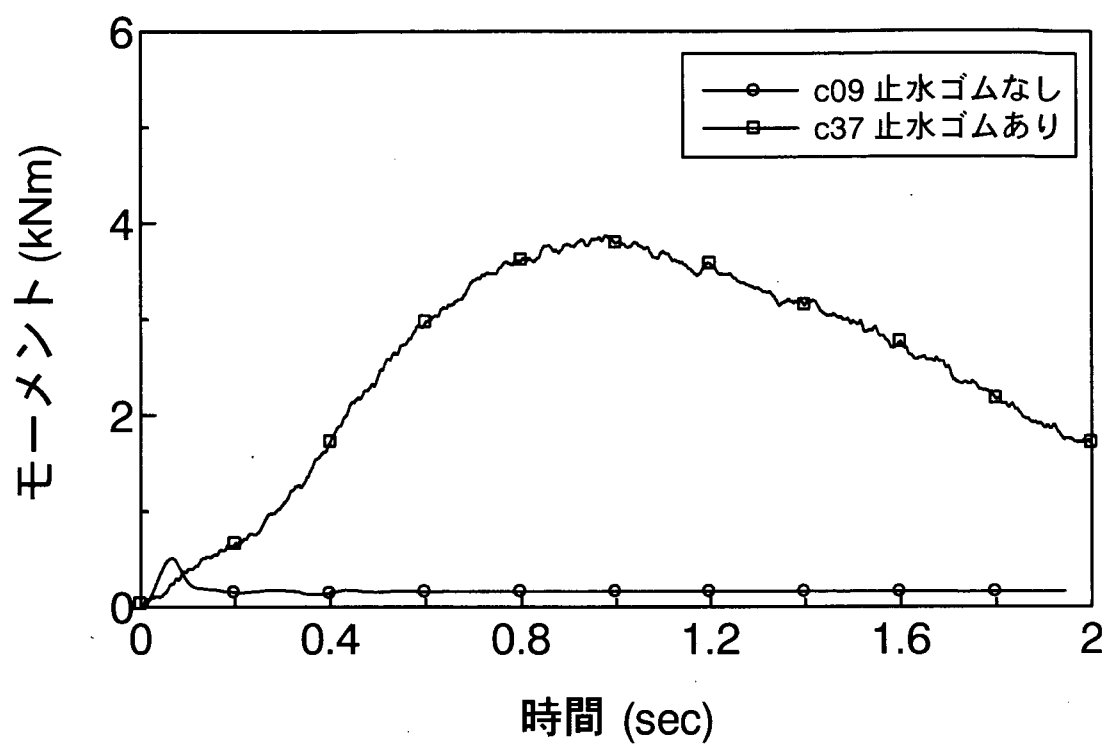
(a) モーメント～時間関係



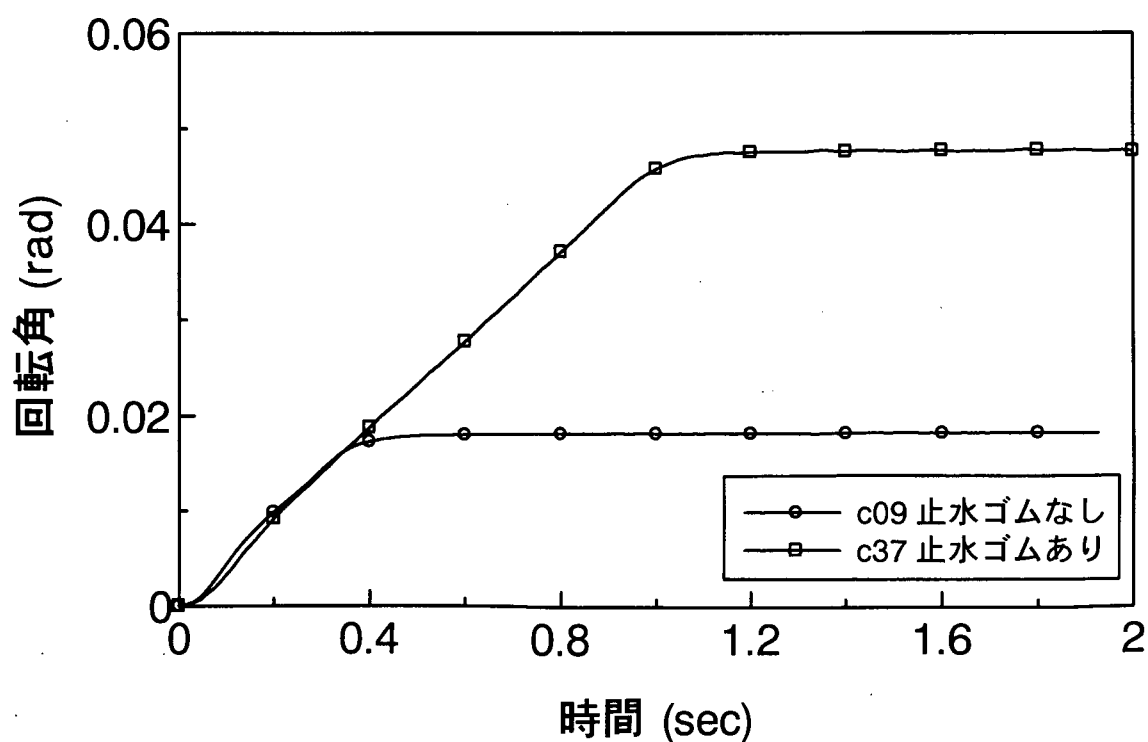
(b) 回転角～時間関係

図-付 1.4.3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

1.5 止水条件の影響(弾性地盤)

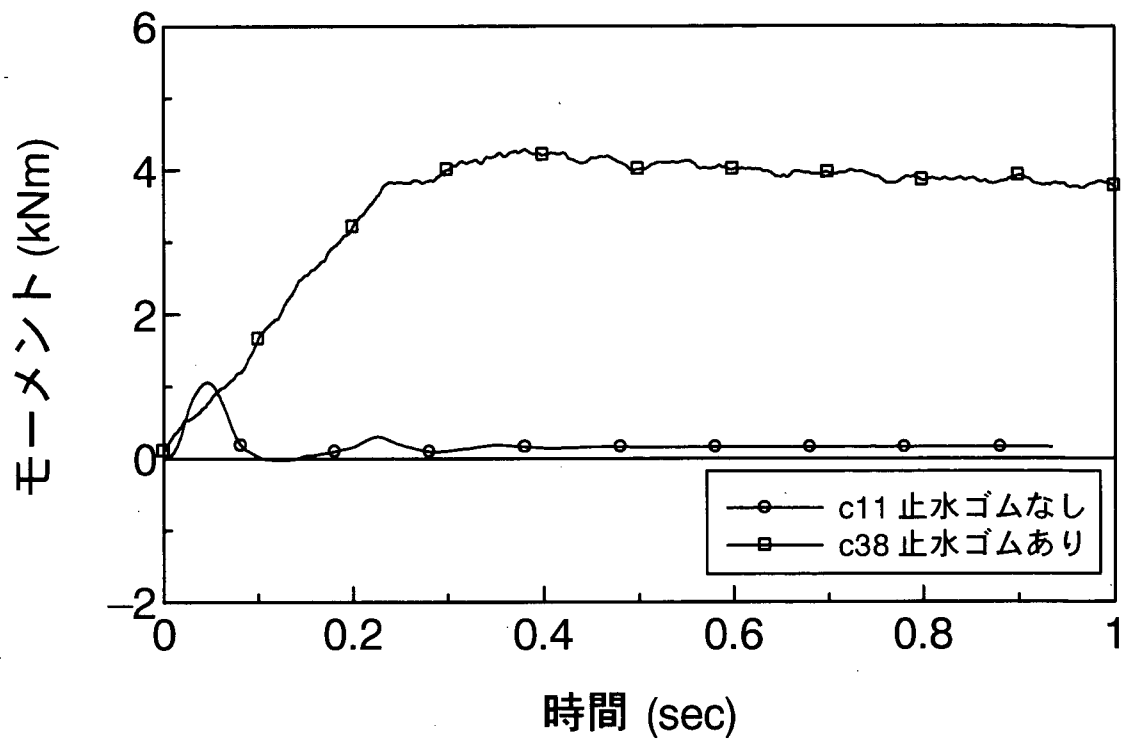


(a) モーメント～時間関係

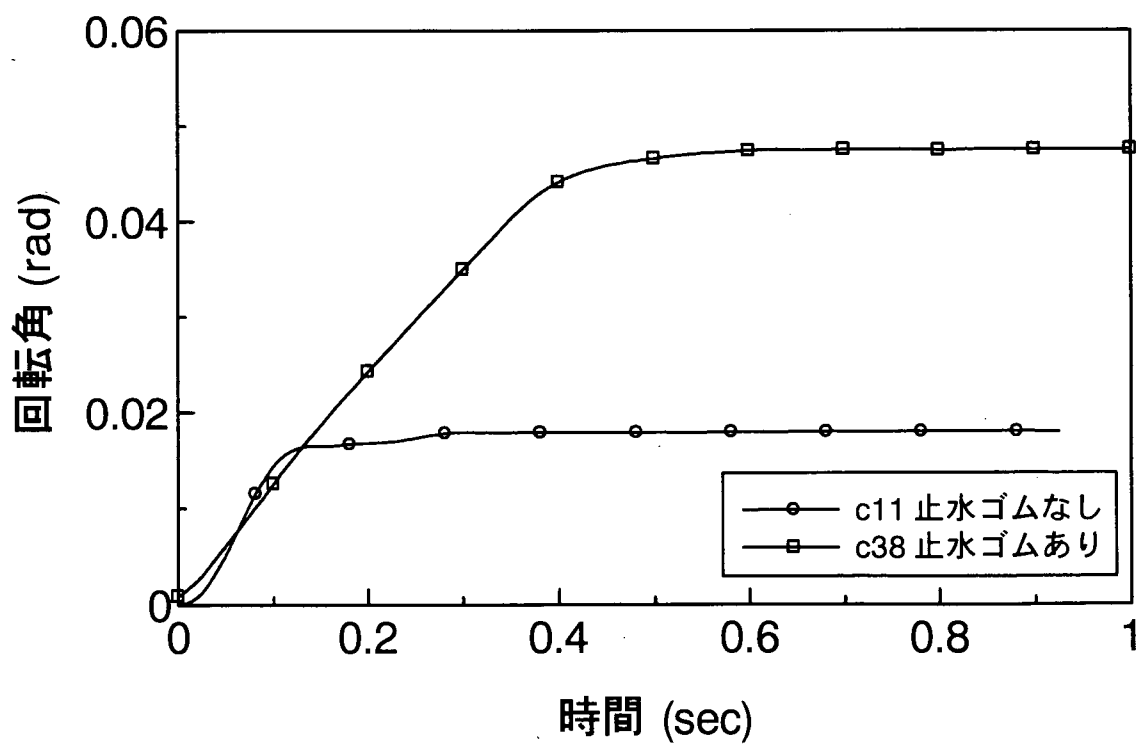


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.5.1 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

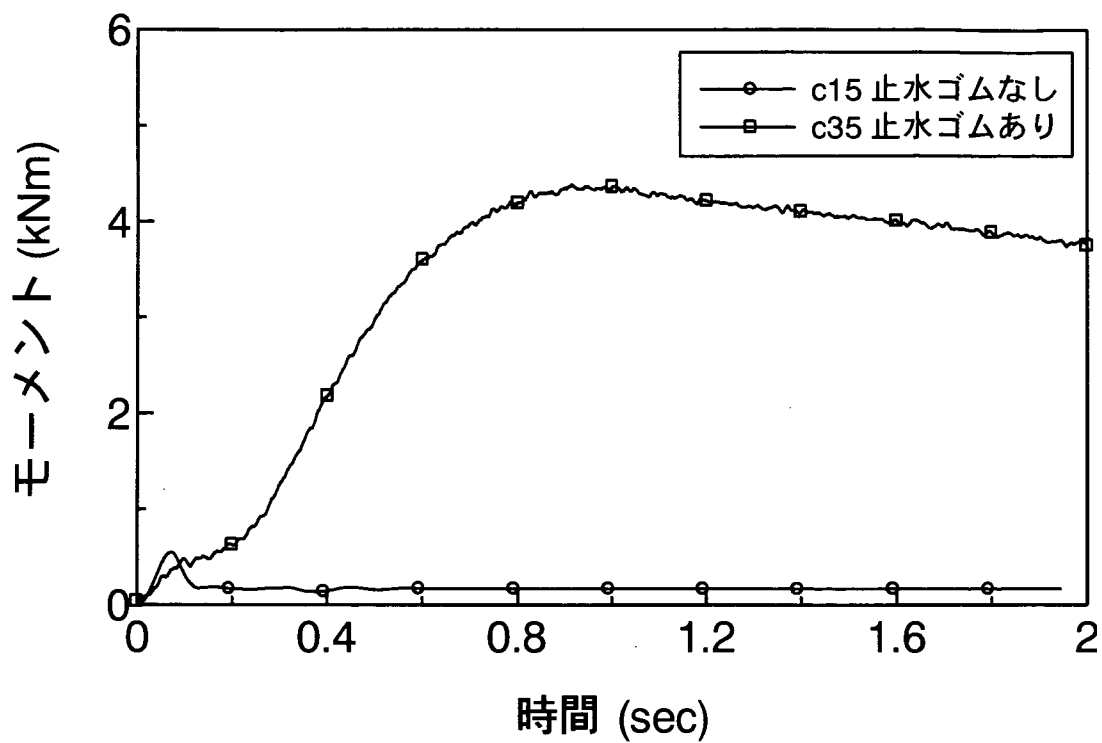


(a) モーメント～時間関係

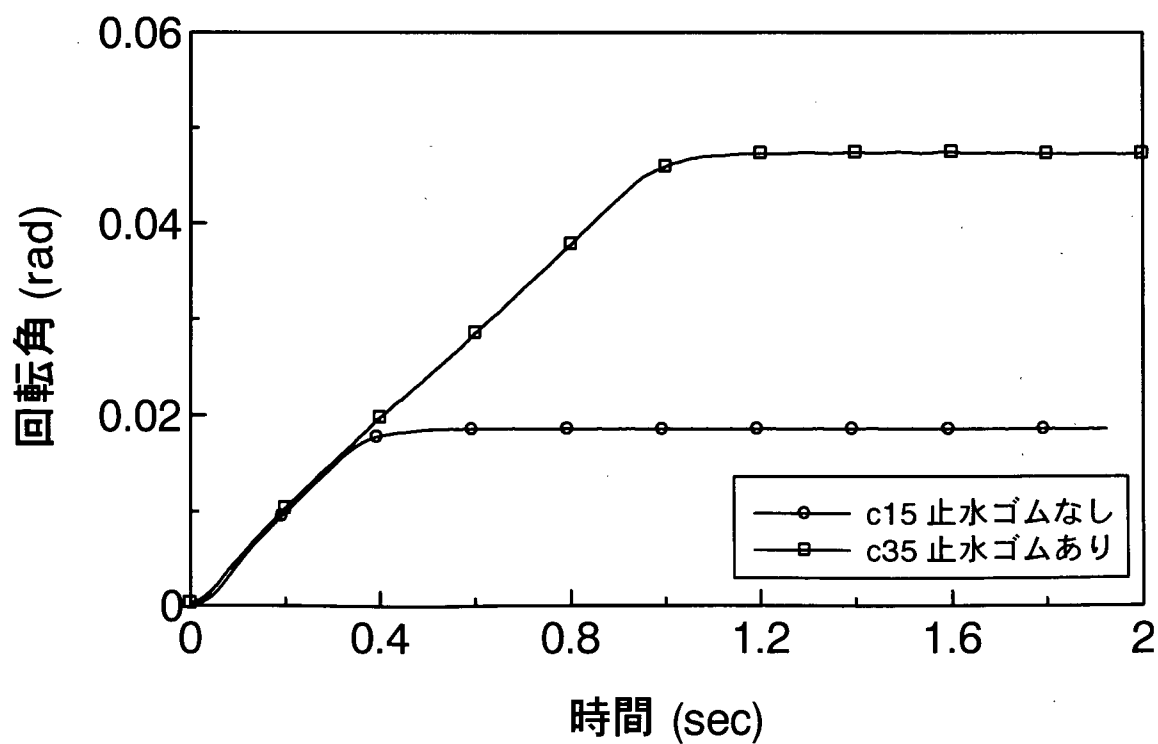


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.5.2 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

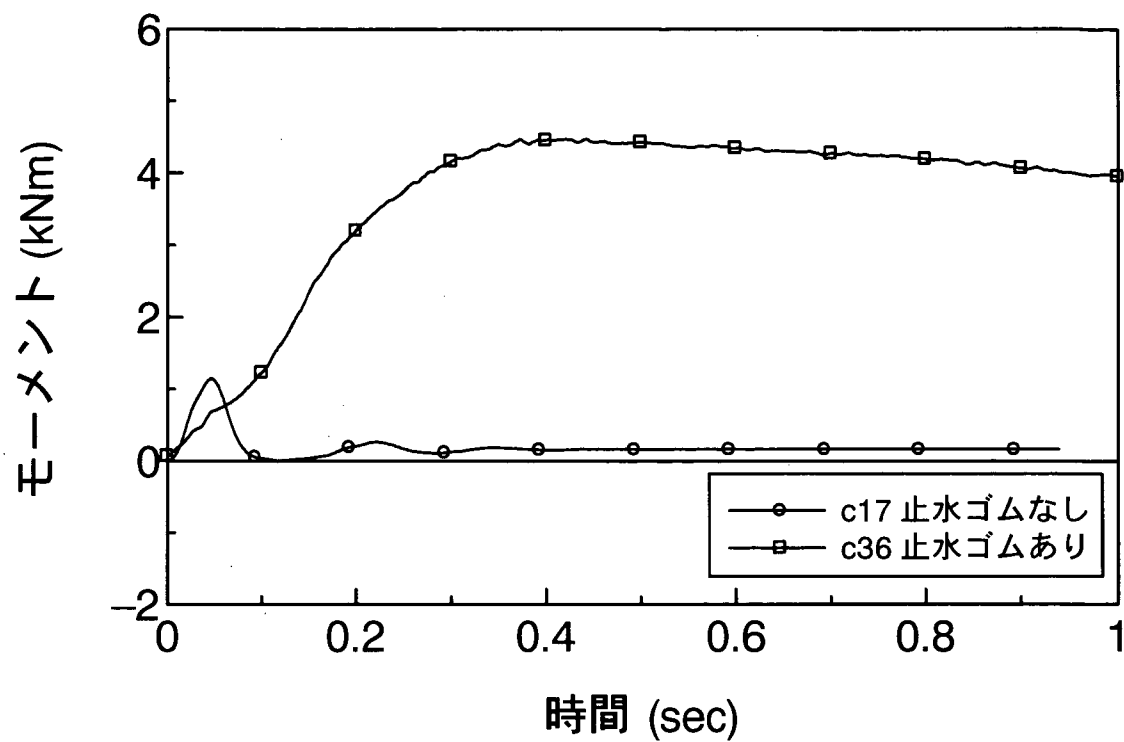


(a) モーメント～時間関係

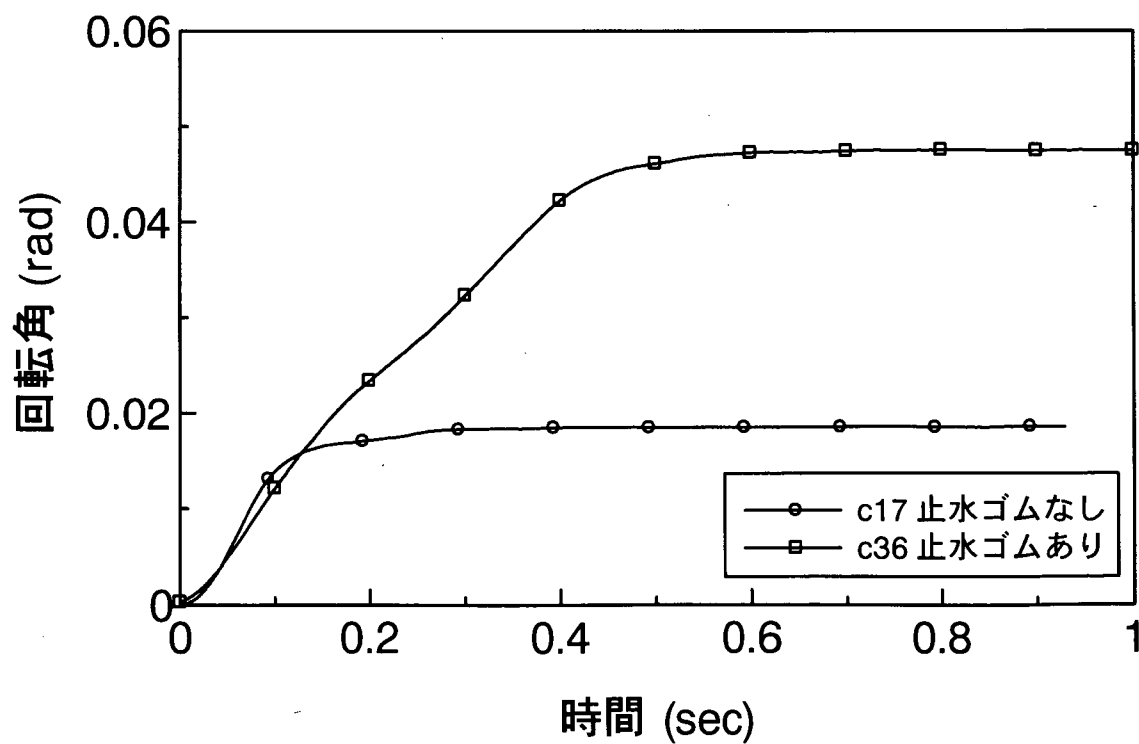


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.5.3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$



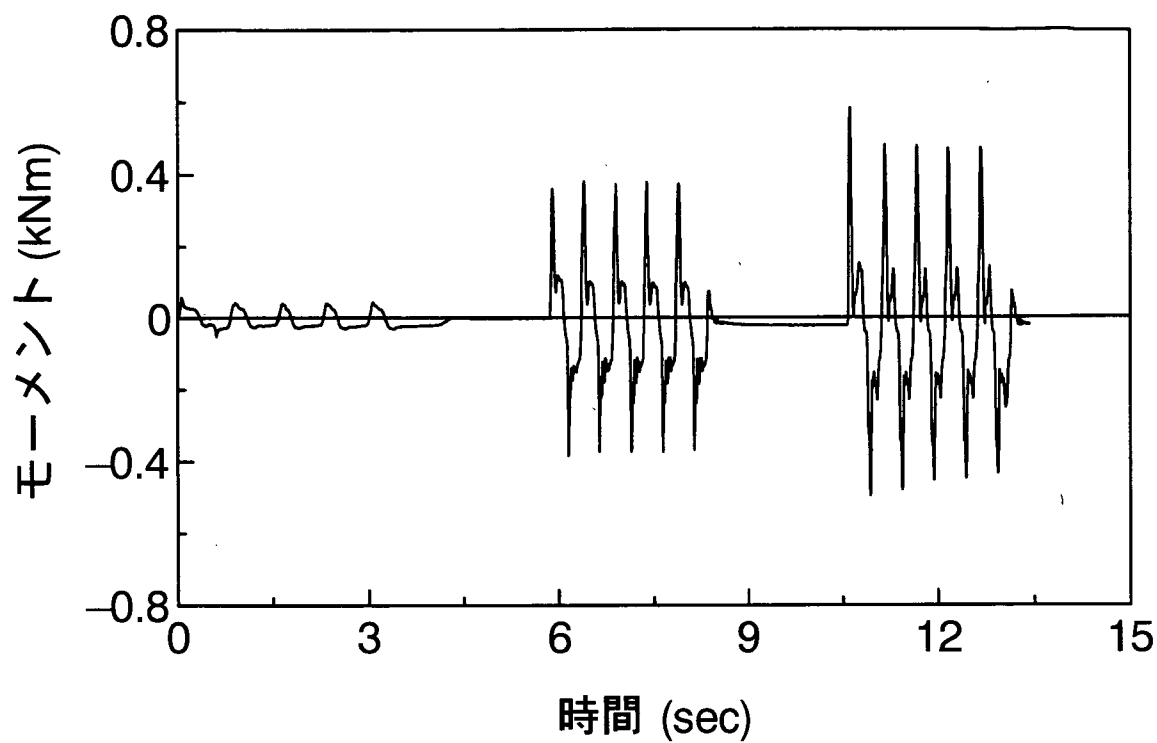
(a) モーメント～時間関係



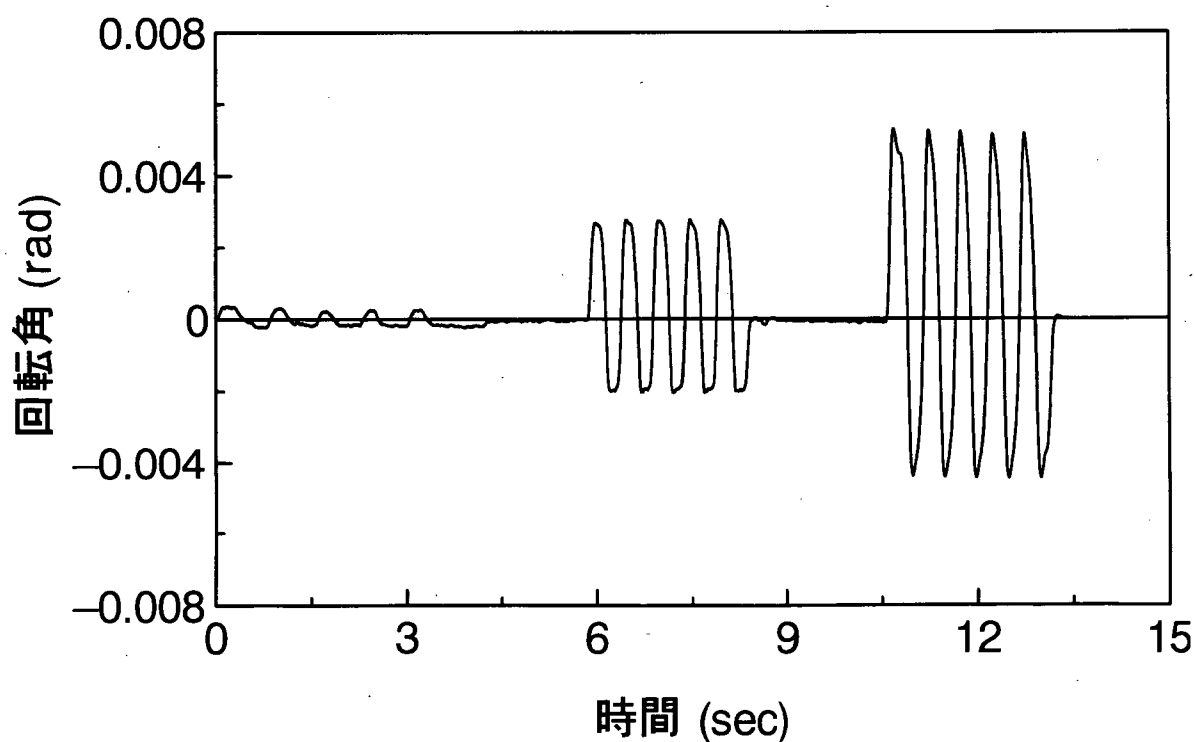
(b) 回転角～時間関係

図-付 1.5.4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

1.6 繰返し载荷の影響

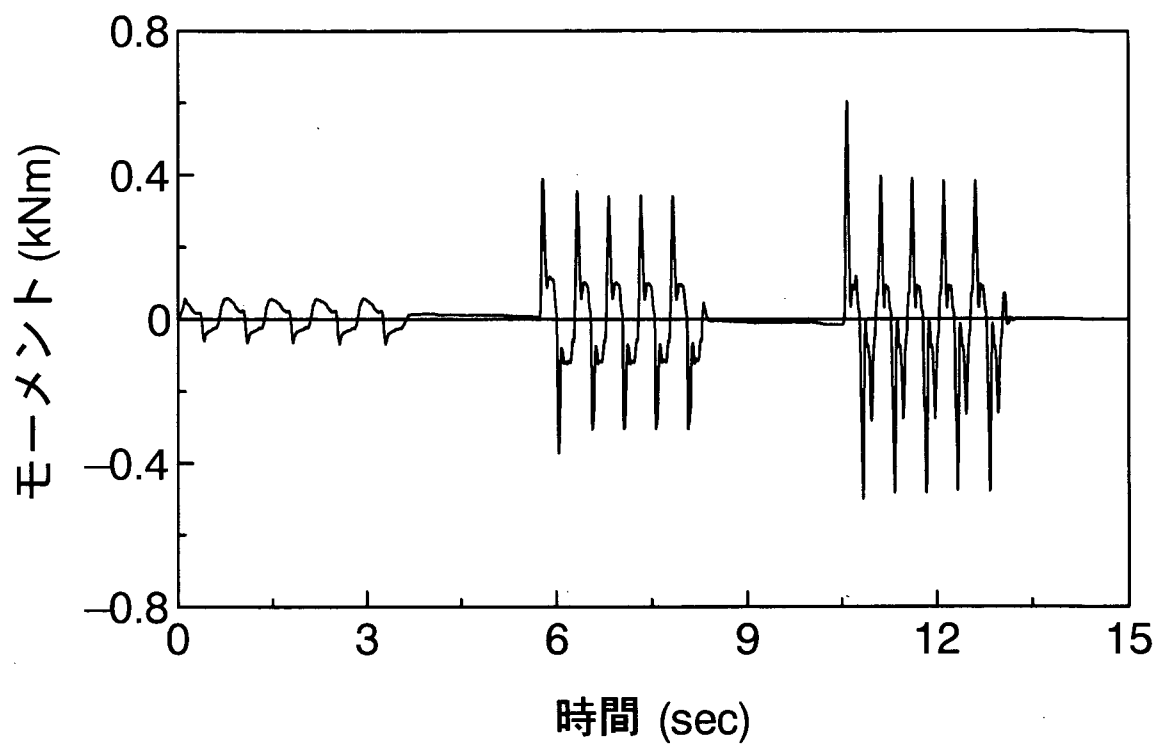


(a) モーメント～時間関係

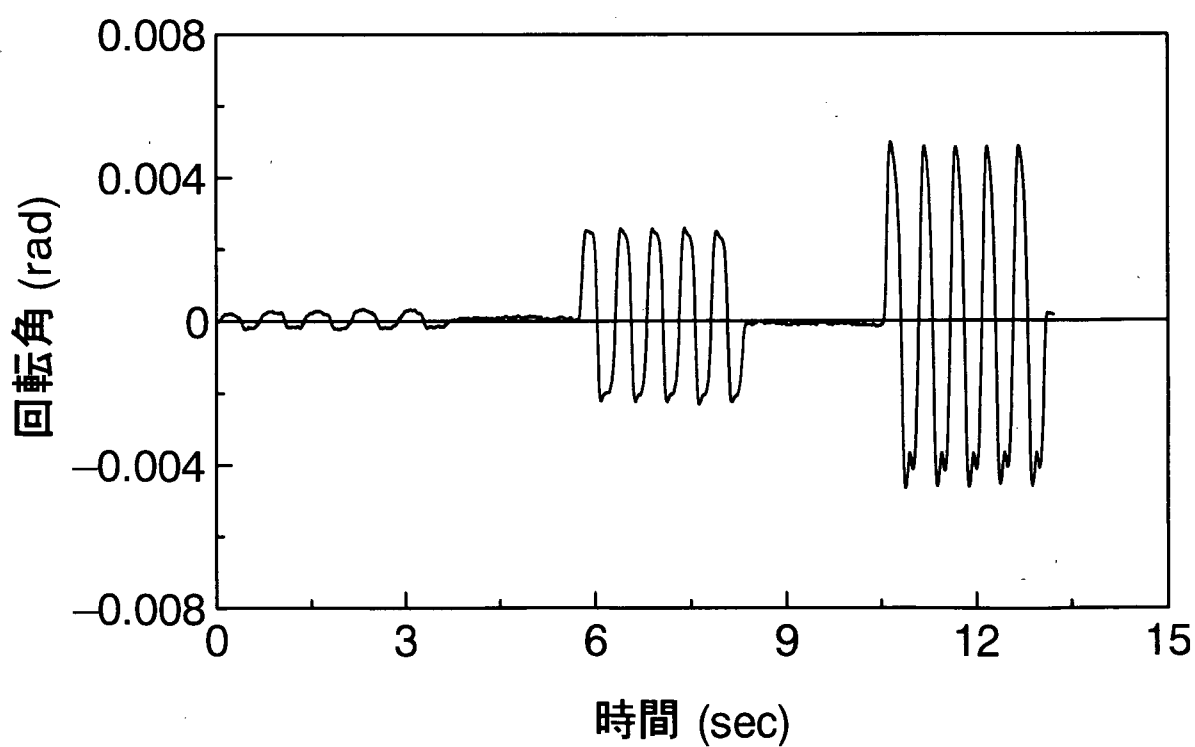


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.6.1 c06: 水深 $h=30\text{mm}$, 弾性地盤

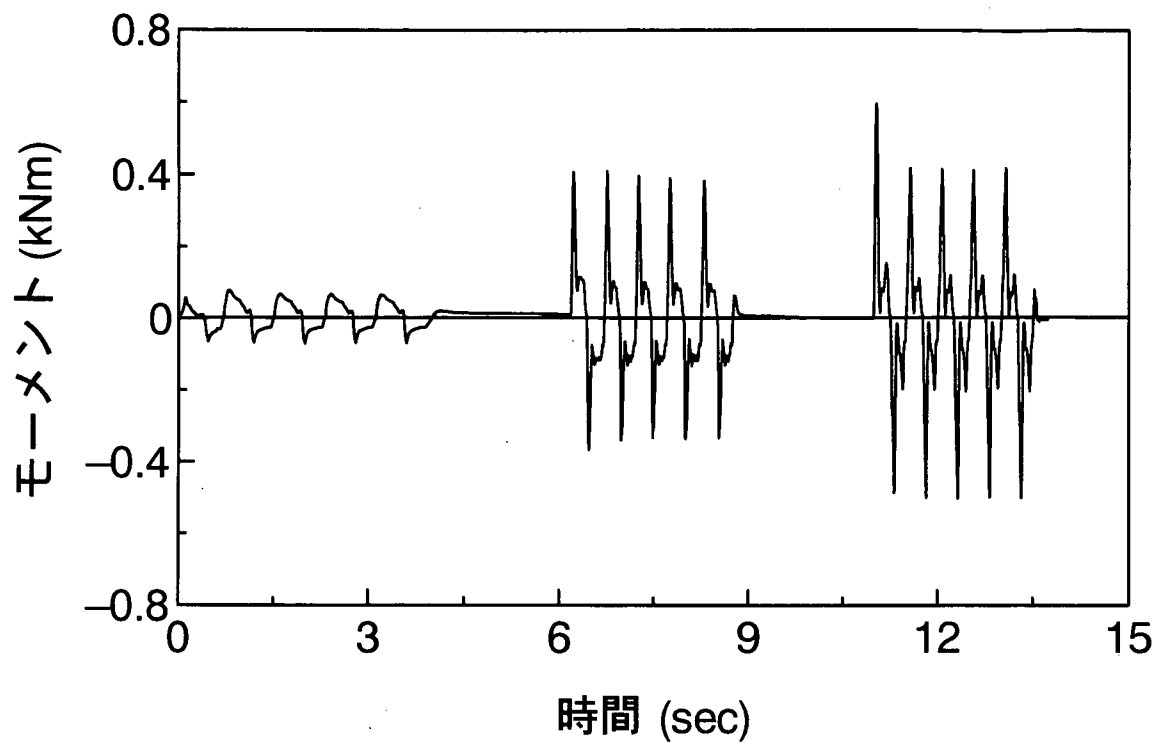


(a) モーメント～時間関係

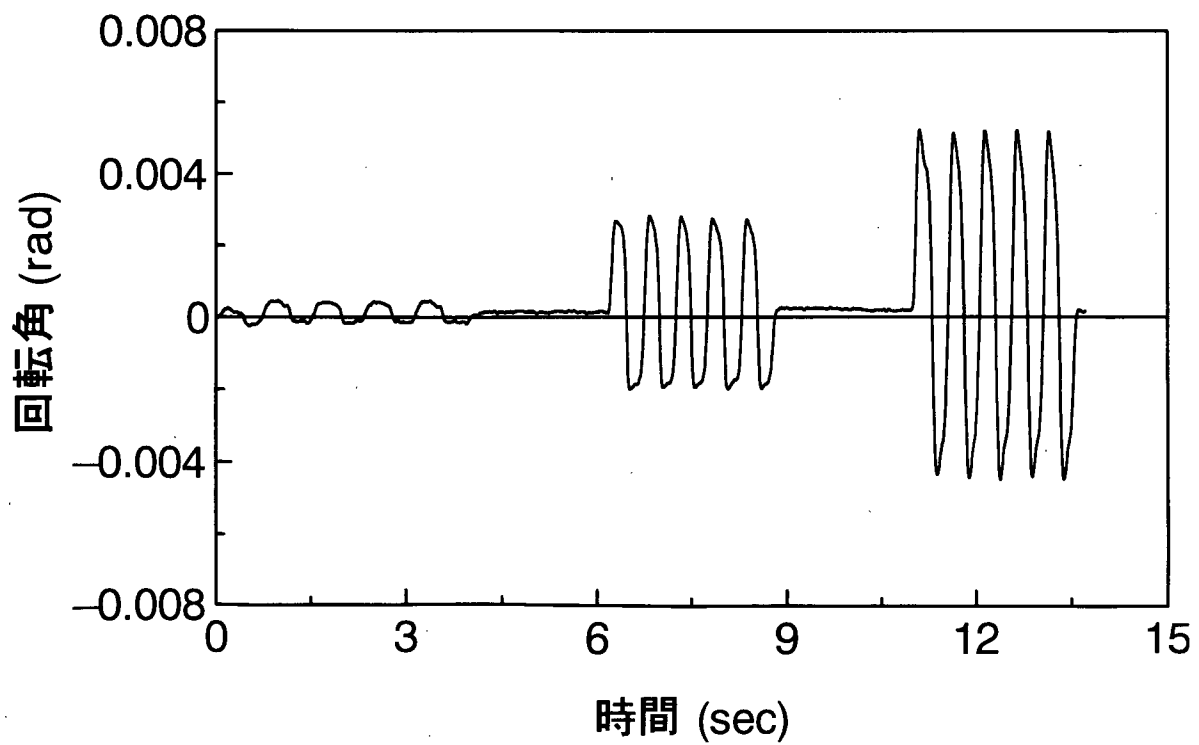


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.6.2 c12: 水深 $h=250\text{mm}$, 弾性地盤

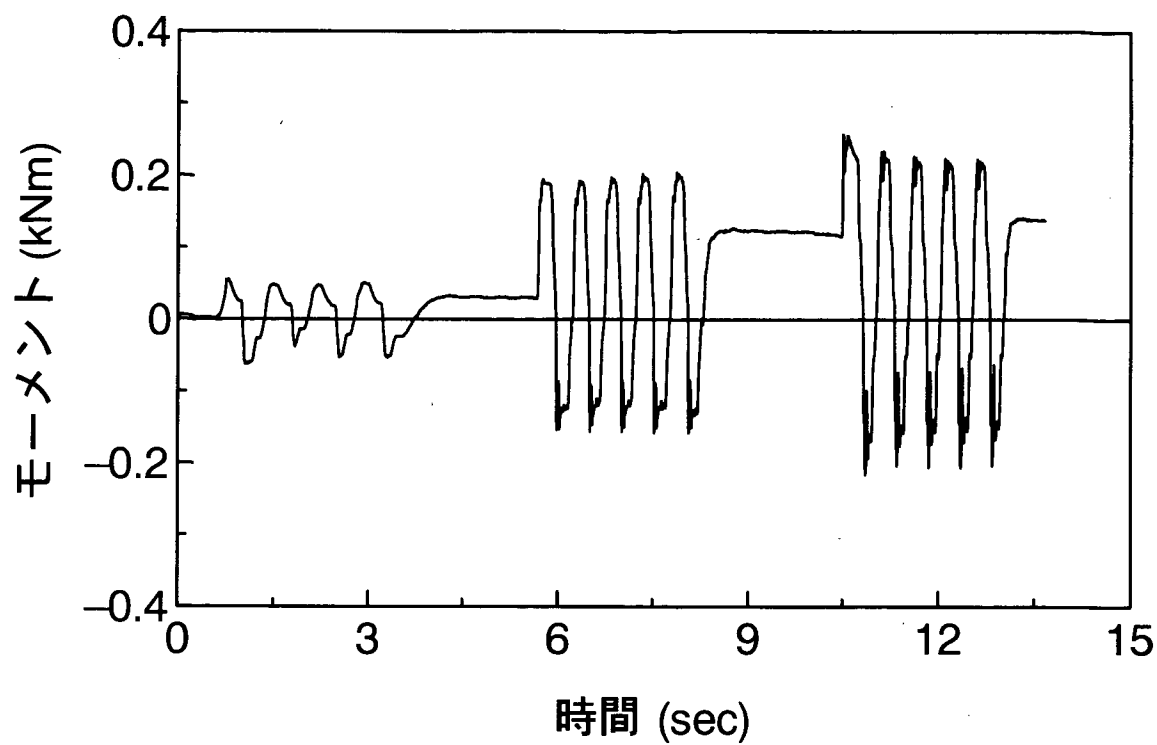


(a) モーメント～時間関係

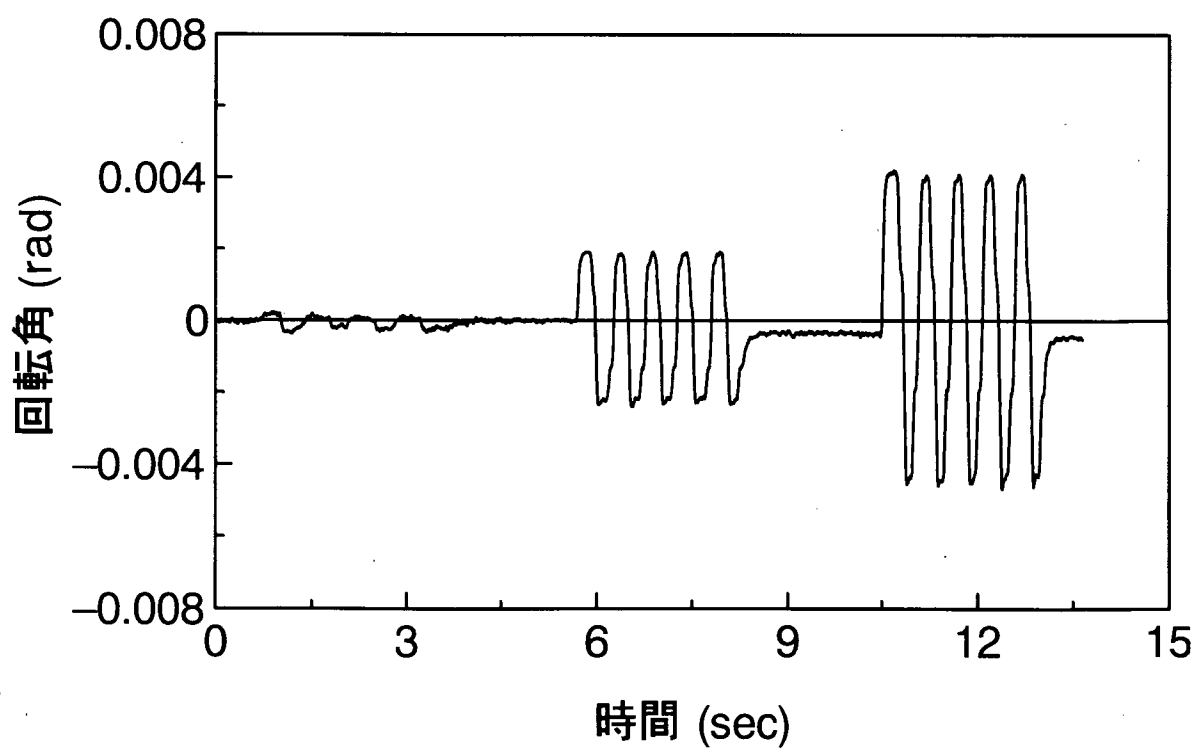


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.6.3 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

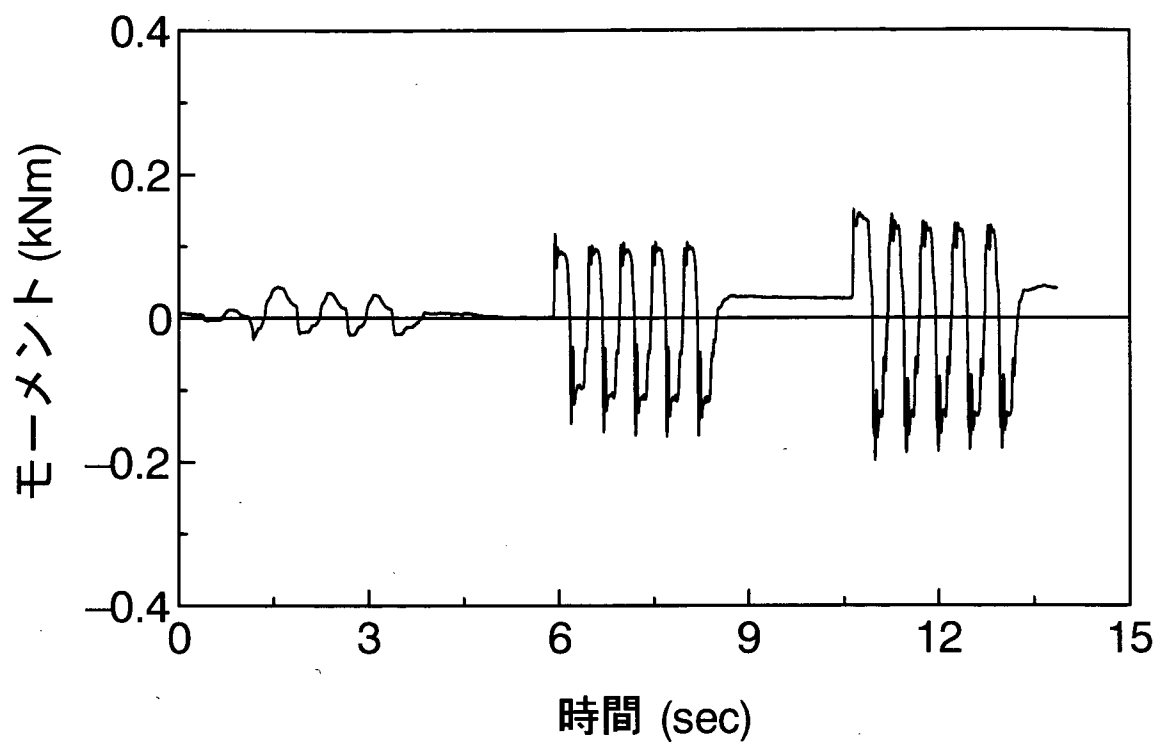


(a) モーメント～時間関係

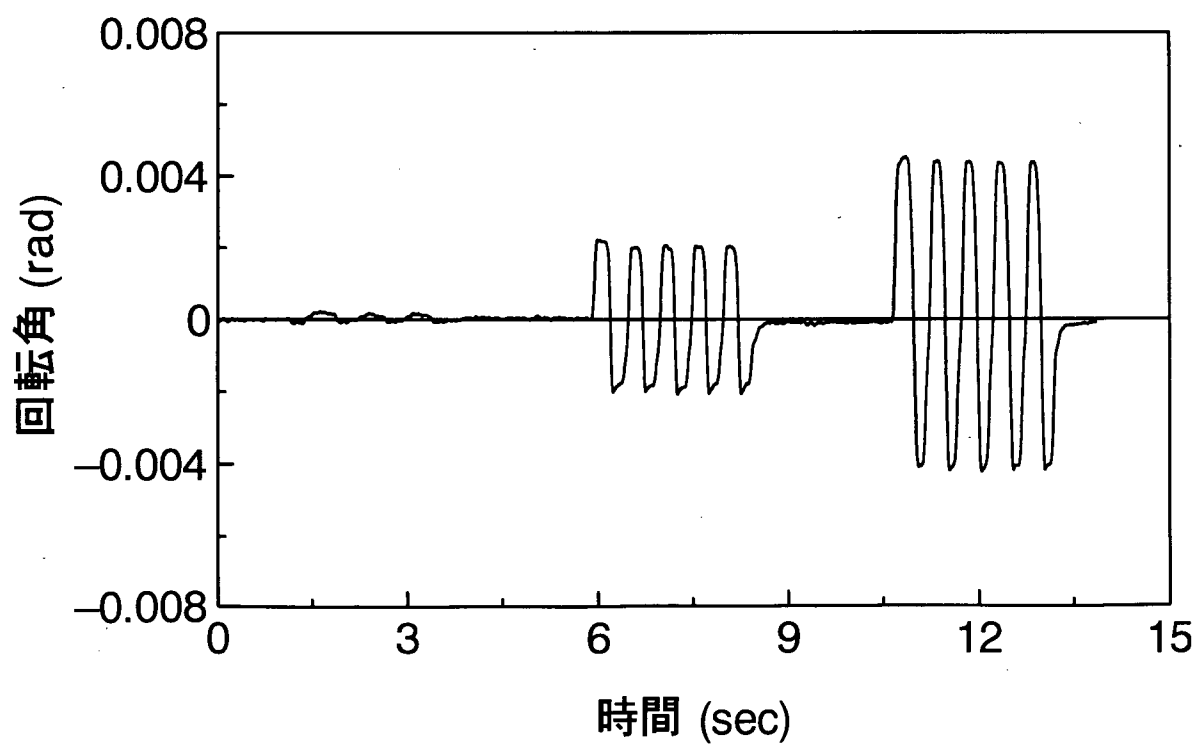


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.6.4 c22: 水深 $h=30\text{mm}$, 砂地盤

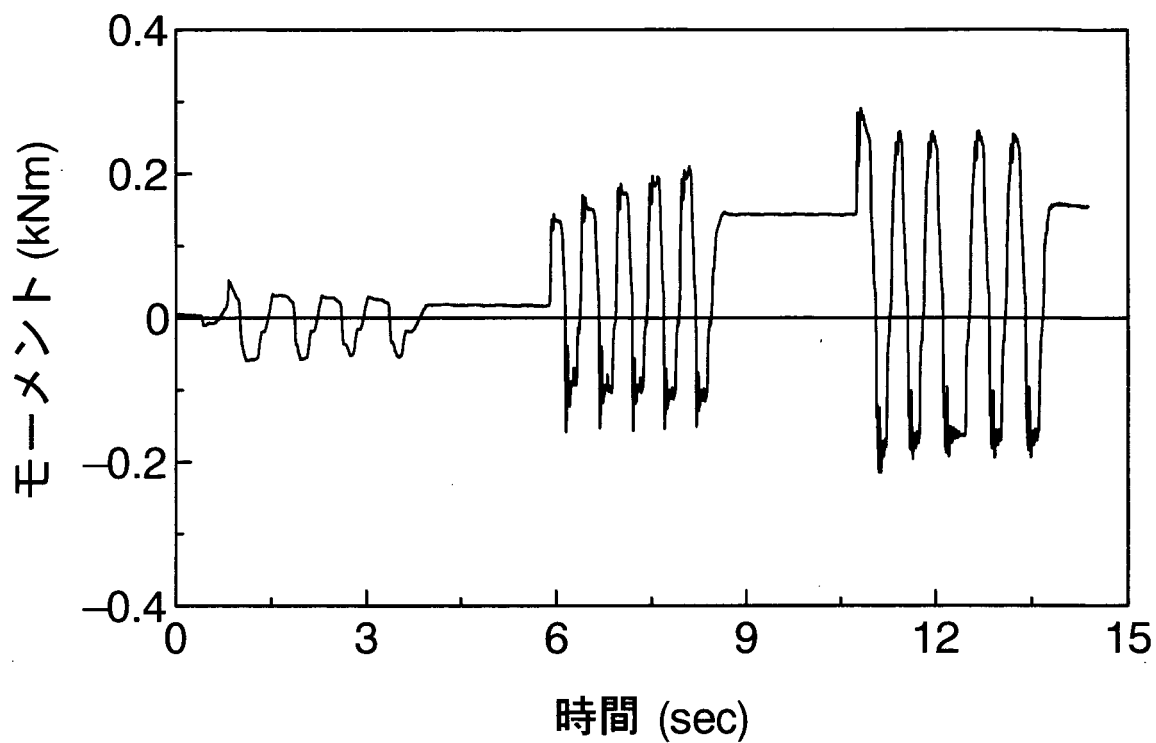


(a) モーメント～時間関係

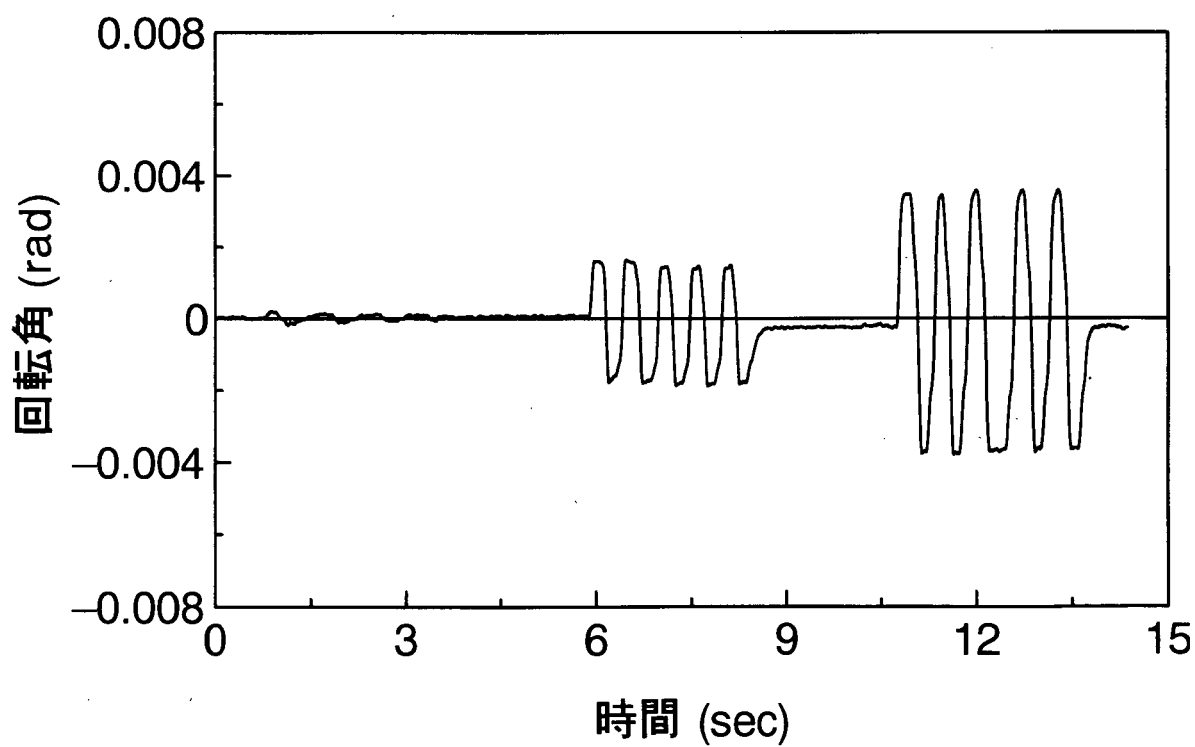


(b) 回転角～時間関係

図-付 1.6.5 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

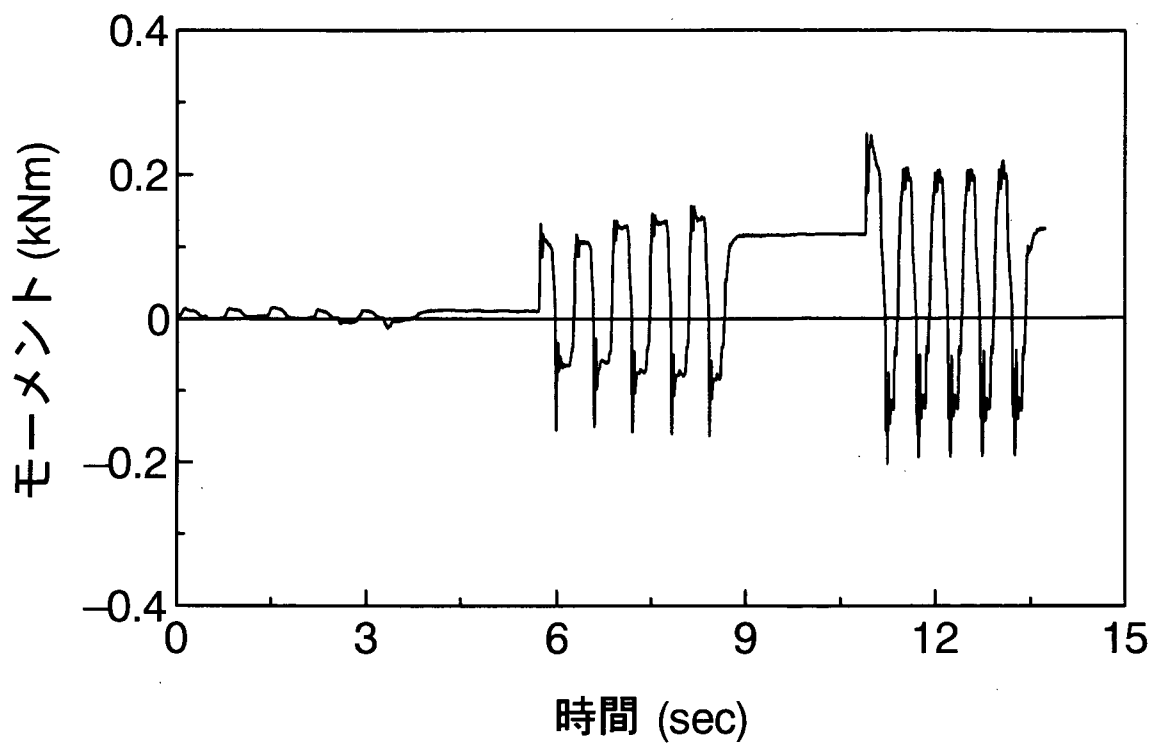


(a) モーメント～時間関係

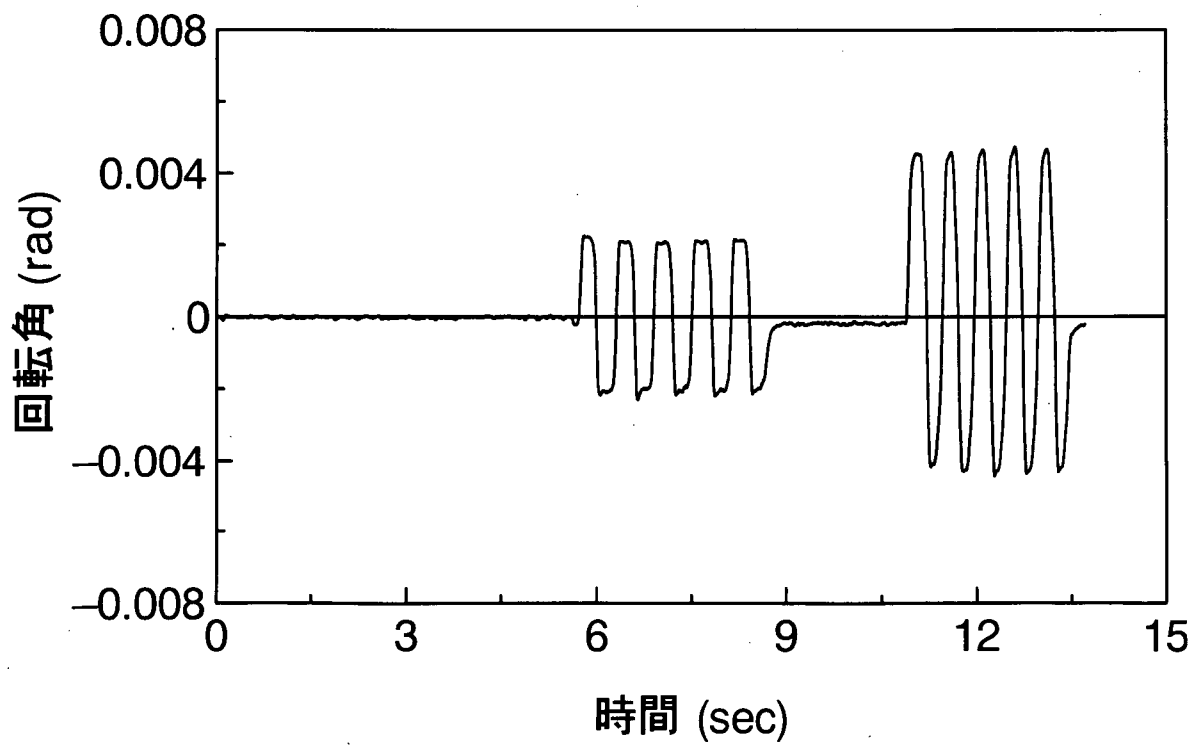


(b) 回転角～時間関係

図一付 1.6.6 c30: 水深 $h=30\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)



(a) モーメント～時間関係



(b) 回転角～時間関係

図-付 1.6.7 水深 c34: $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

2. 回転角速度の時刻歴

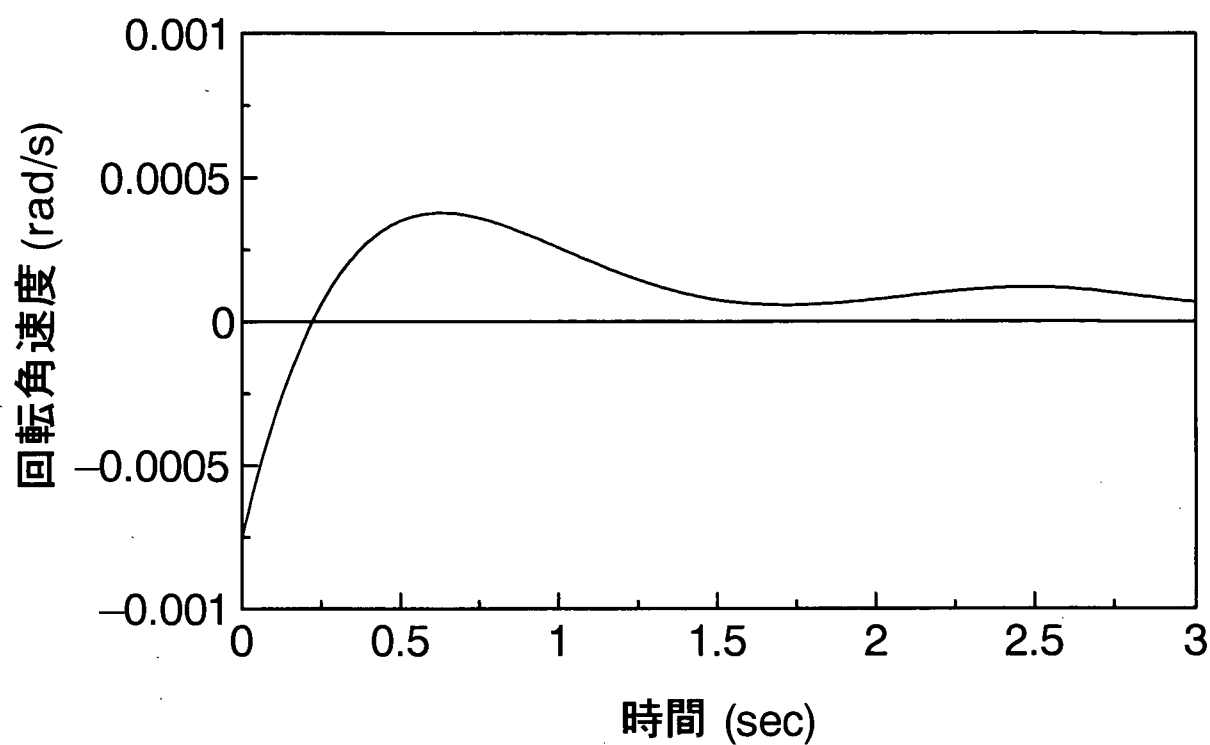


図-付 2.1 c13: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤

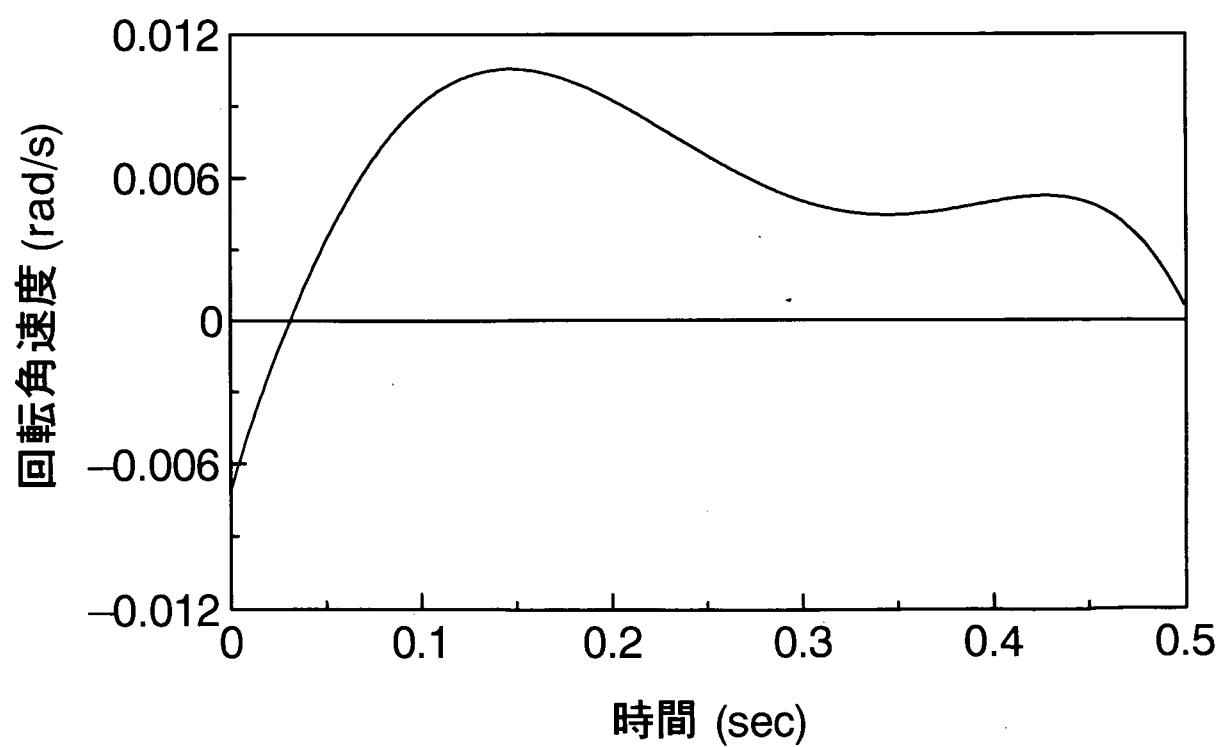
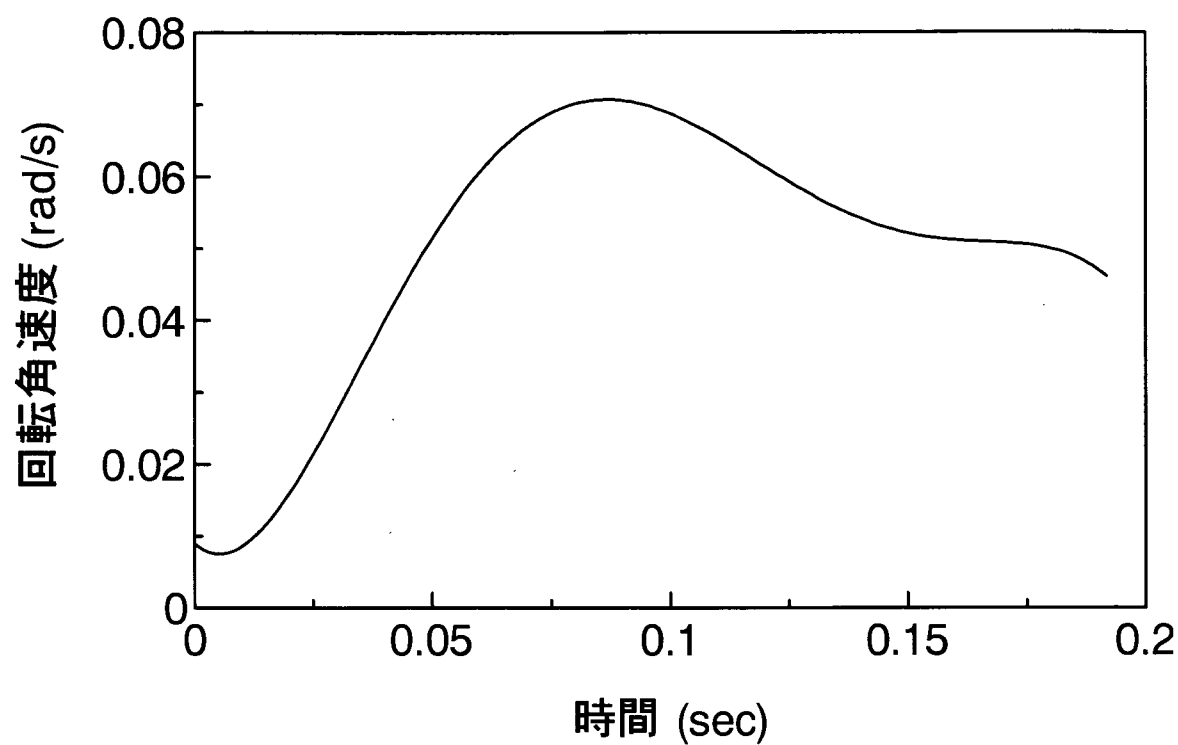
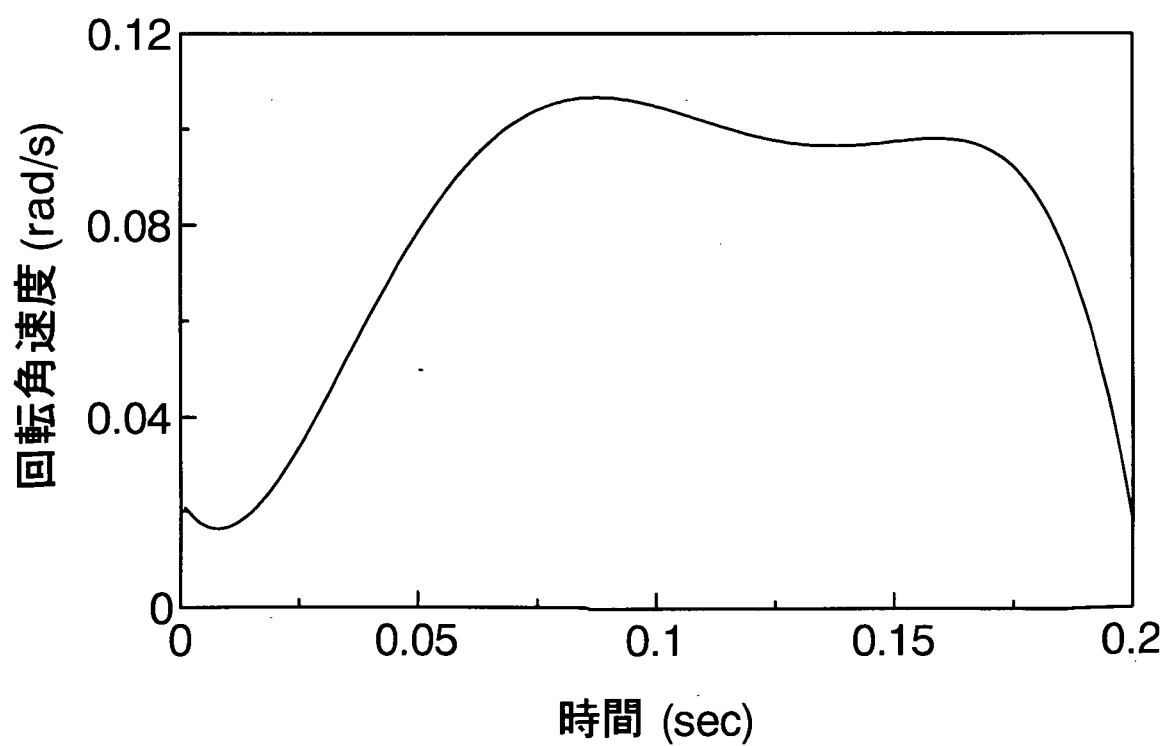


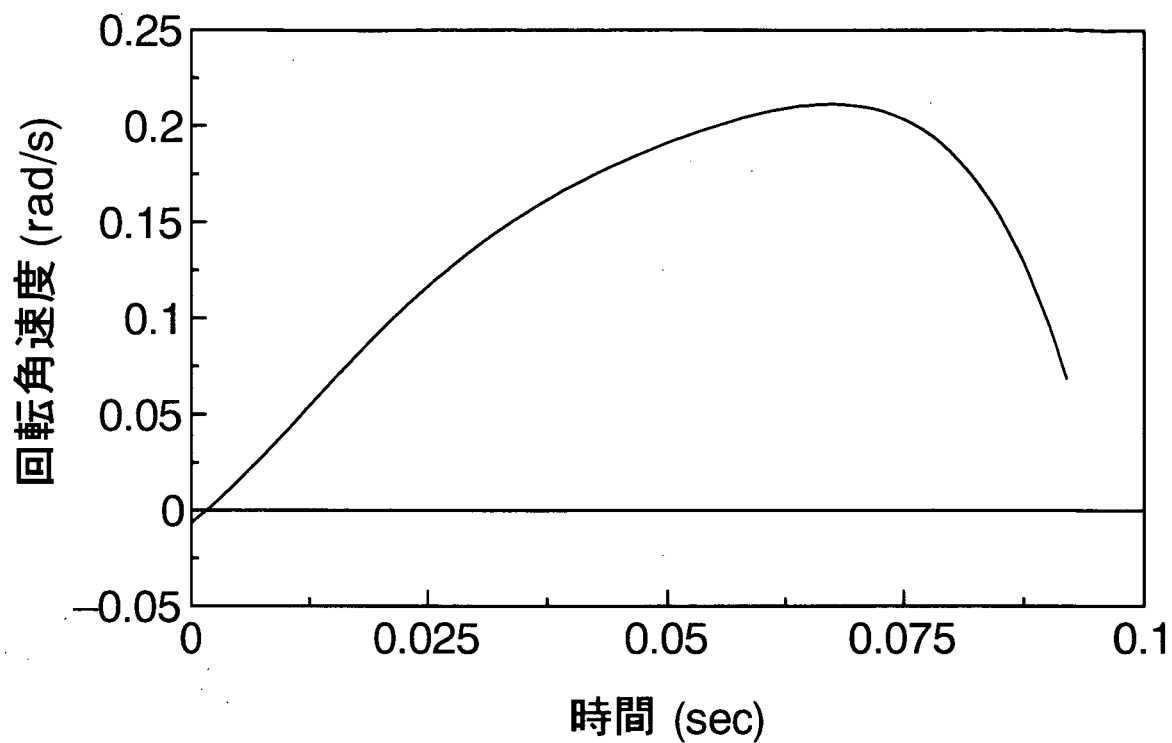
図-付 2.2 c14: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤



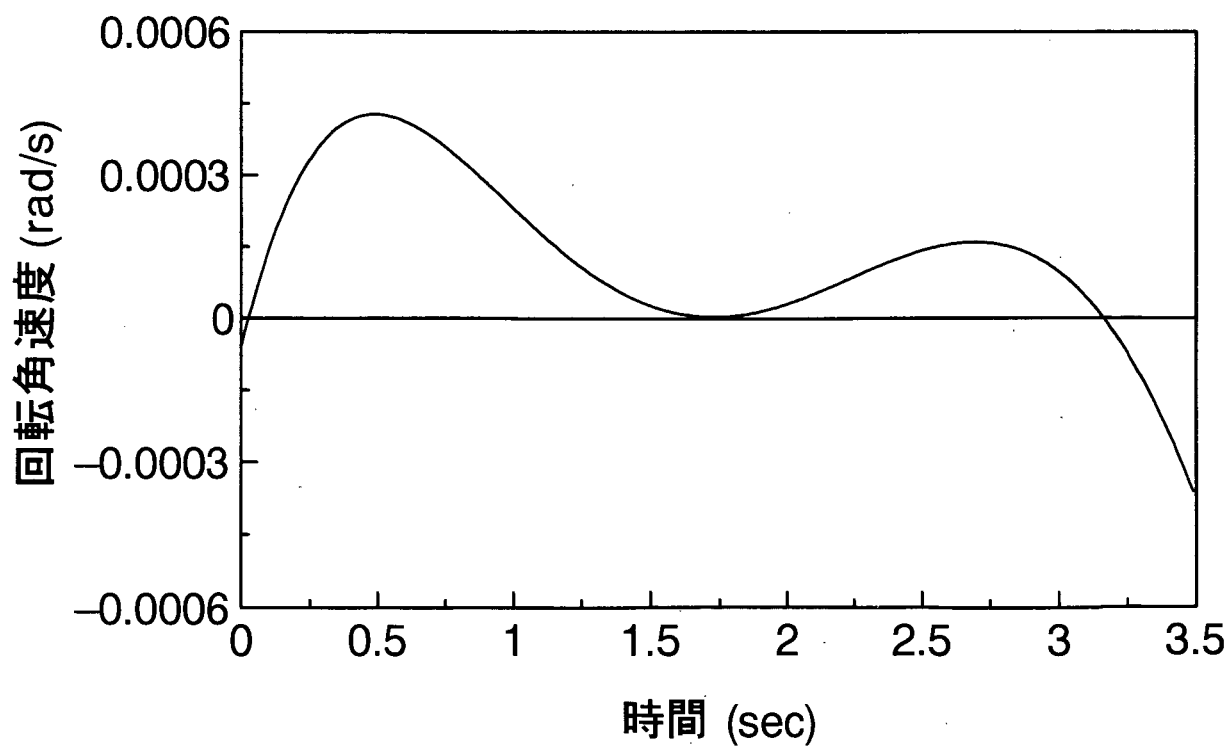
圖一付 2.3 c15: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 彈性地盤



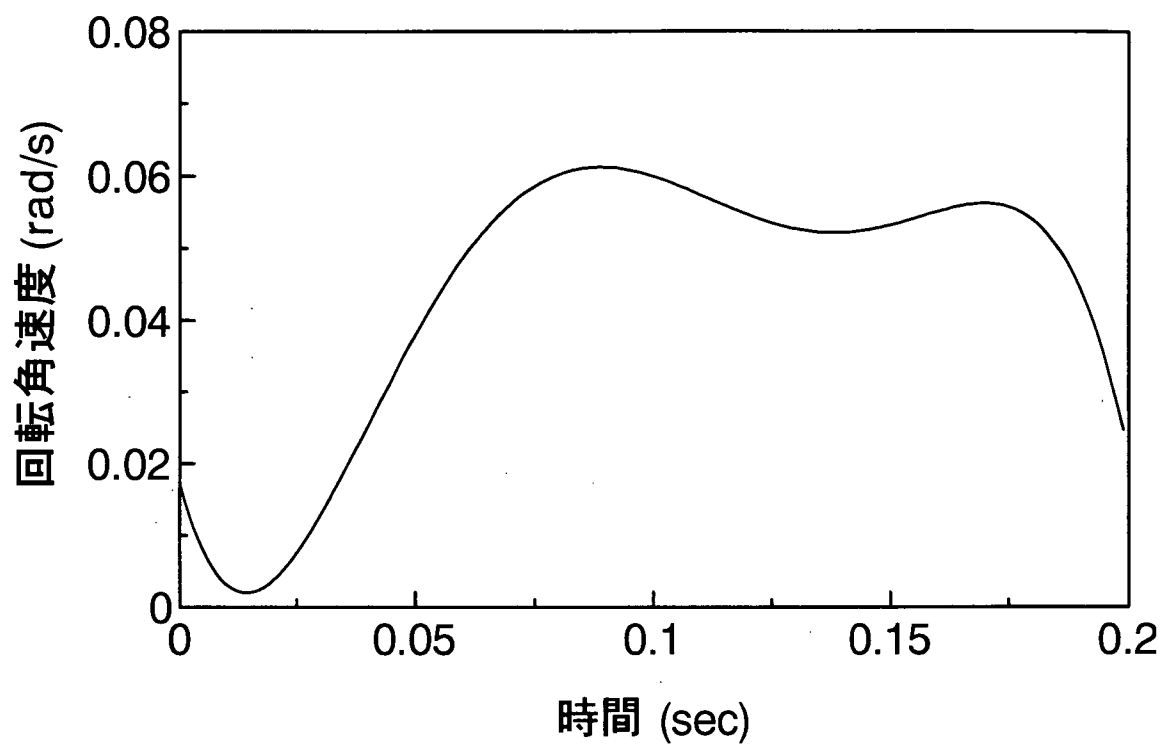
圖一付 2.4 c16: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 彈性地盤



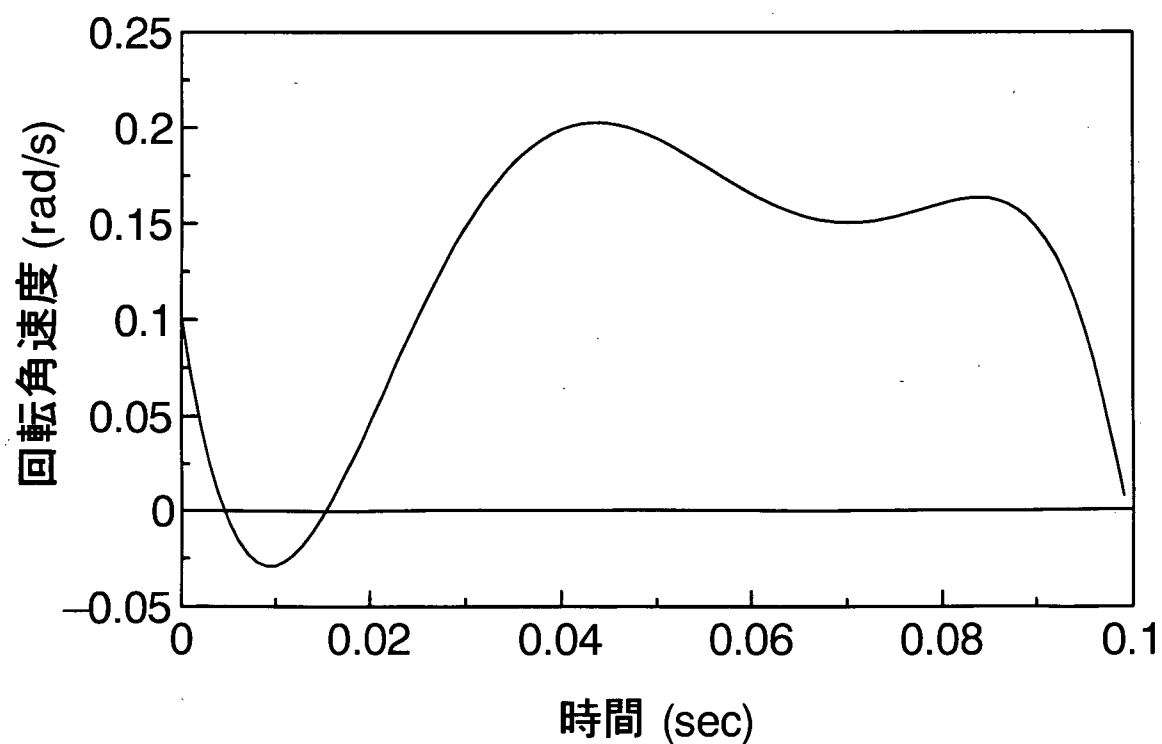
圖一付 2.5 c17: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 彈性地盤



圖一付 2.6 c23: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤



圖一付 2.7 c24: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤



圖一付 2.8 c25: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

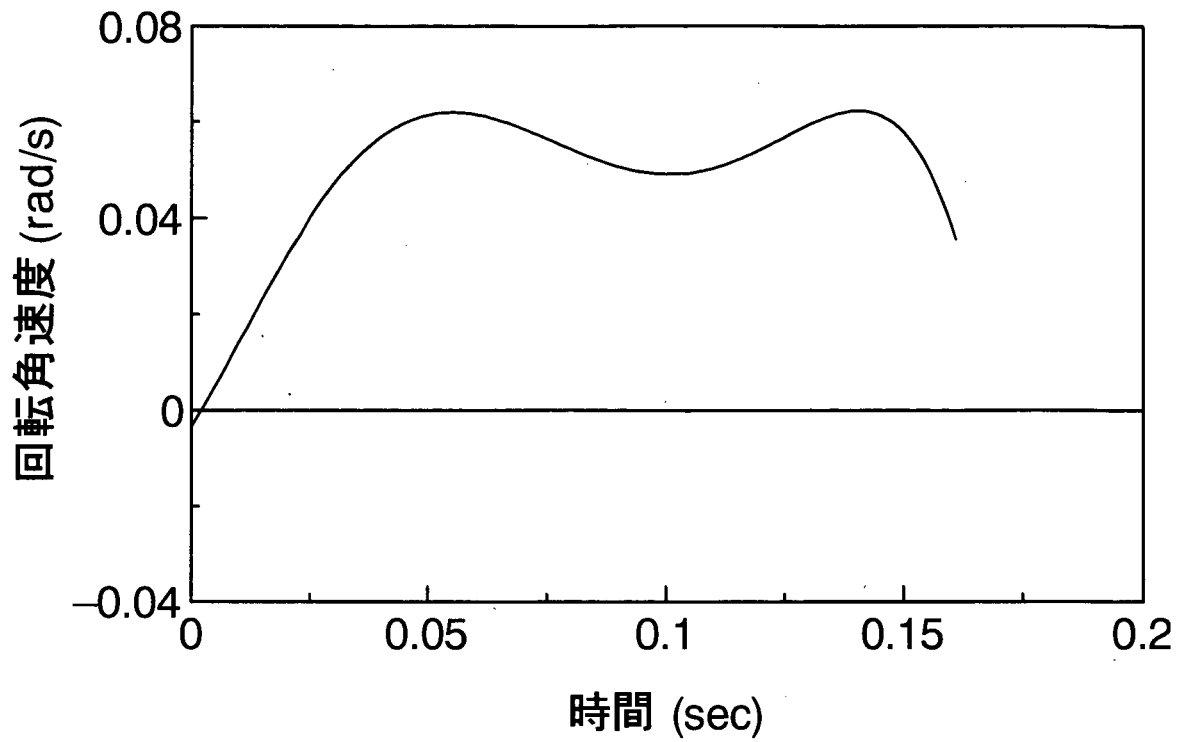


図-付 2.9 c32: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

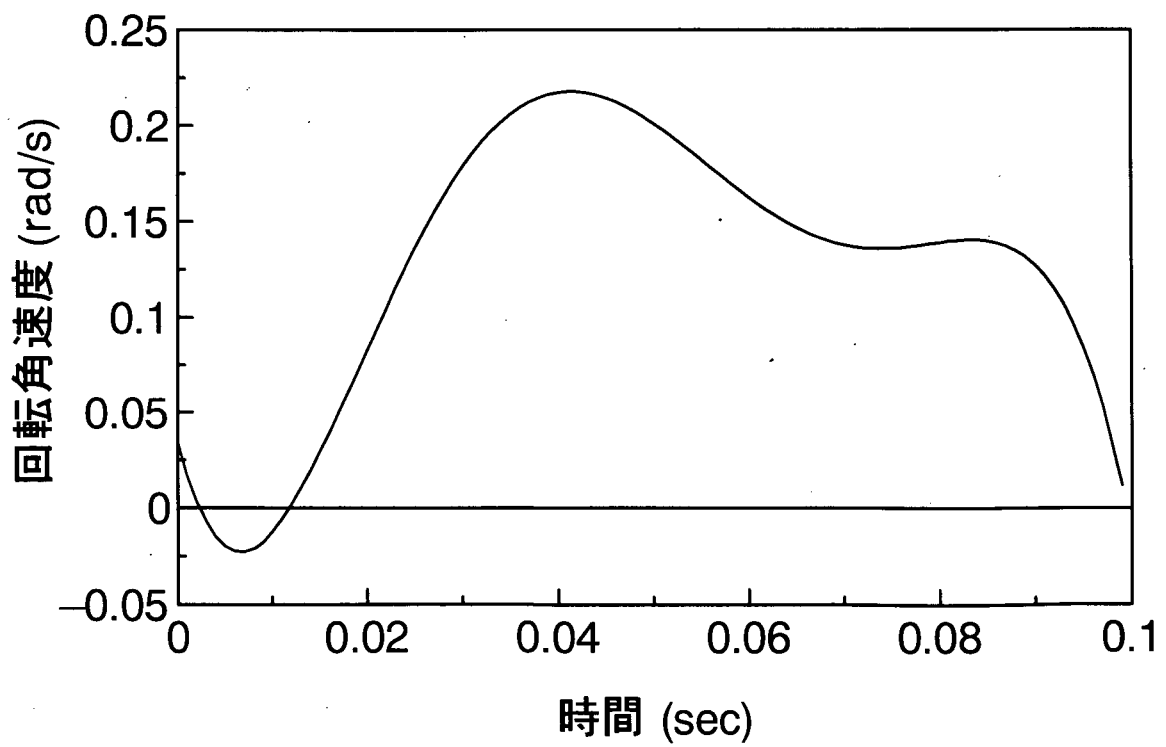
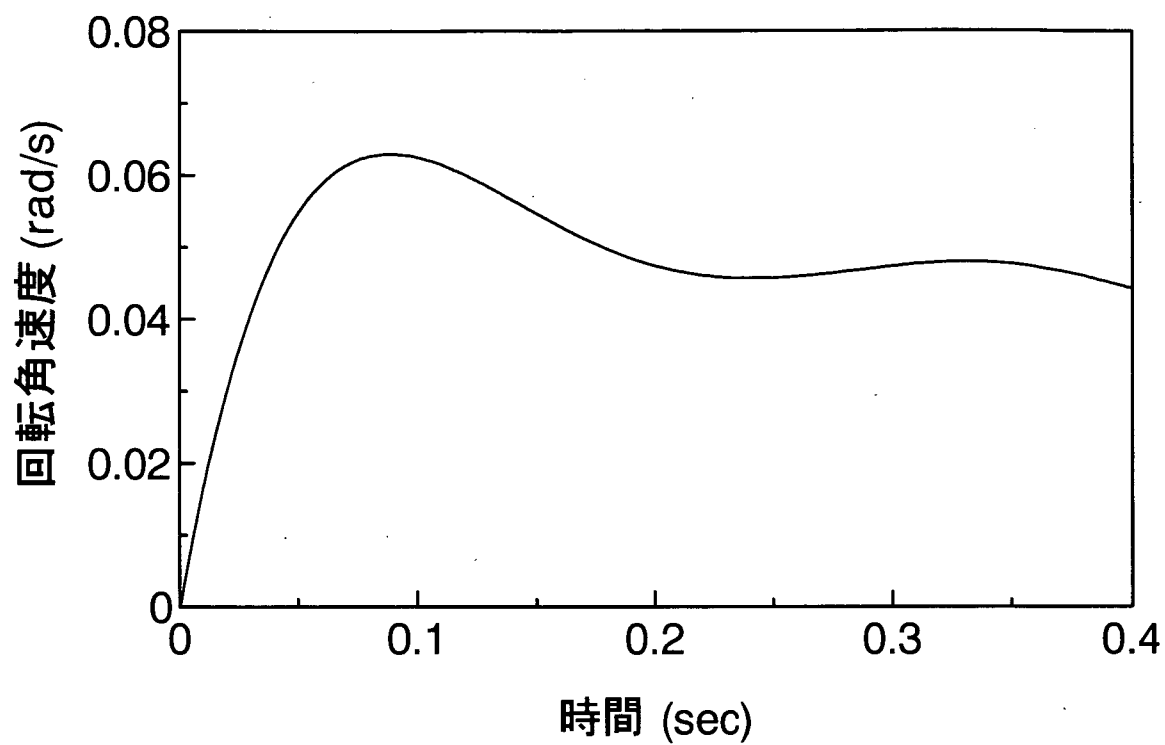
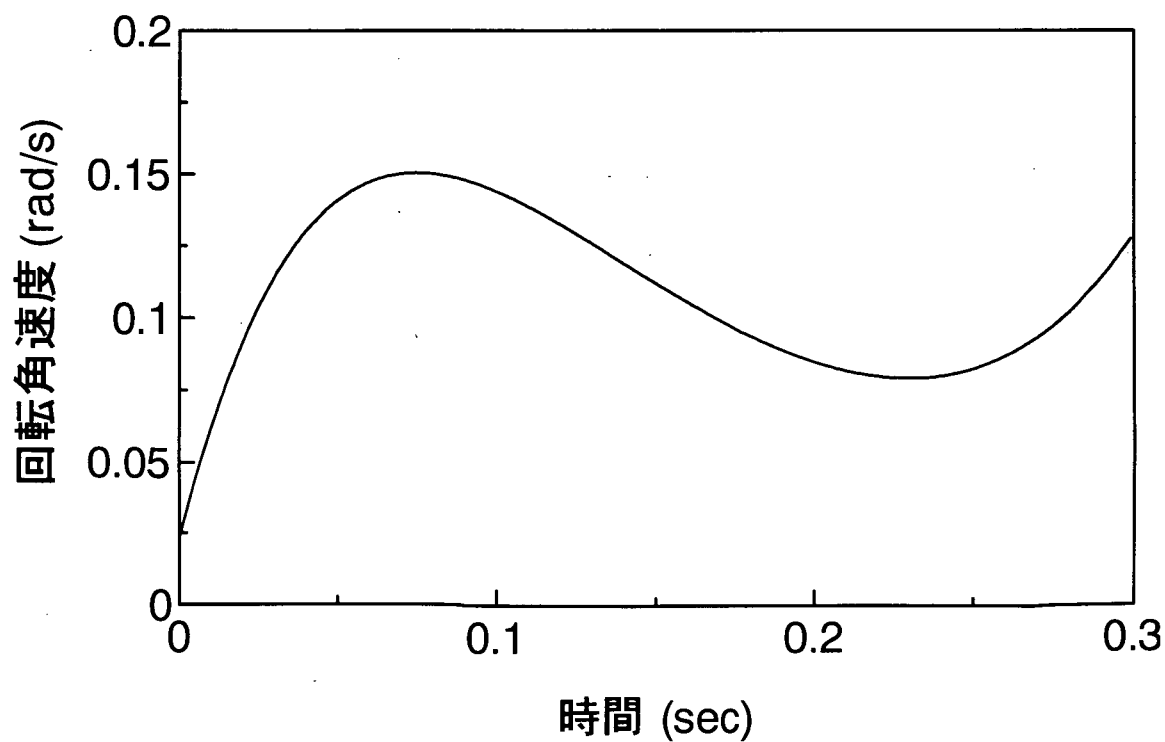


図-付 2.10 c33: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)



図一付 2.11 c35: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



図一付 2.12 c36: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

3. 基礎底面下水圧の時刻歴

3.1 ケース別

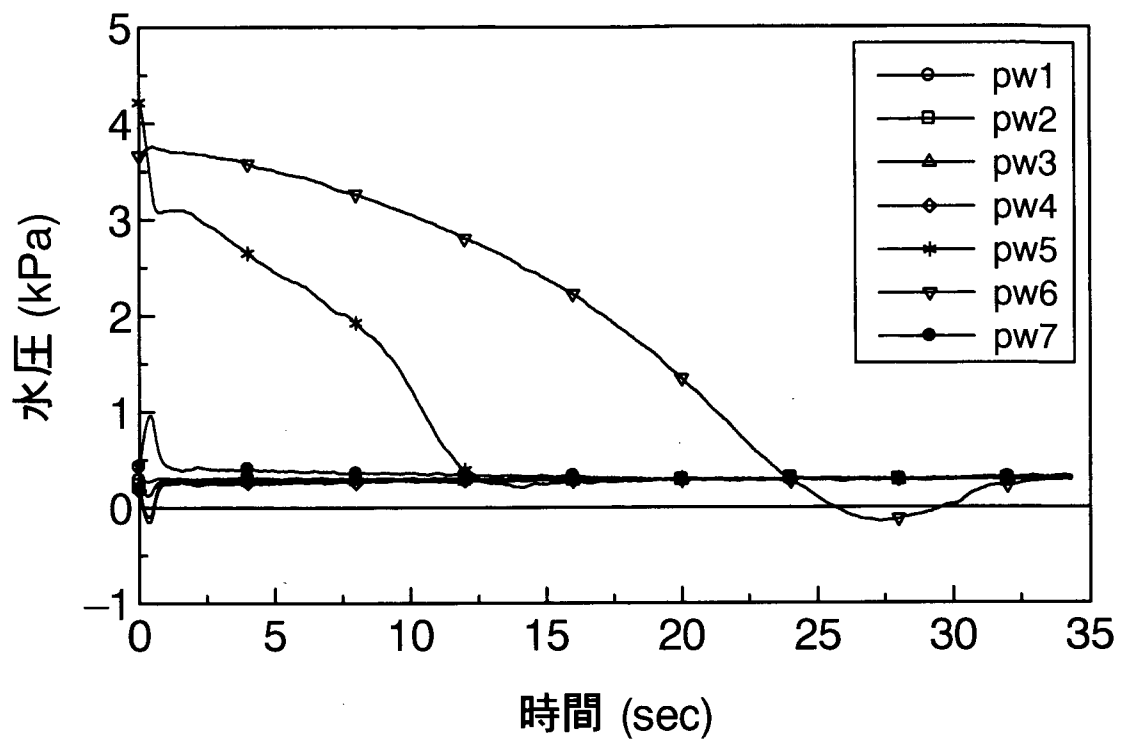


図-付 3.1.1 c01: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤

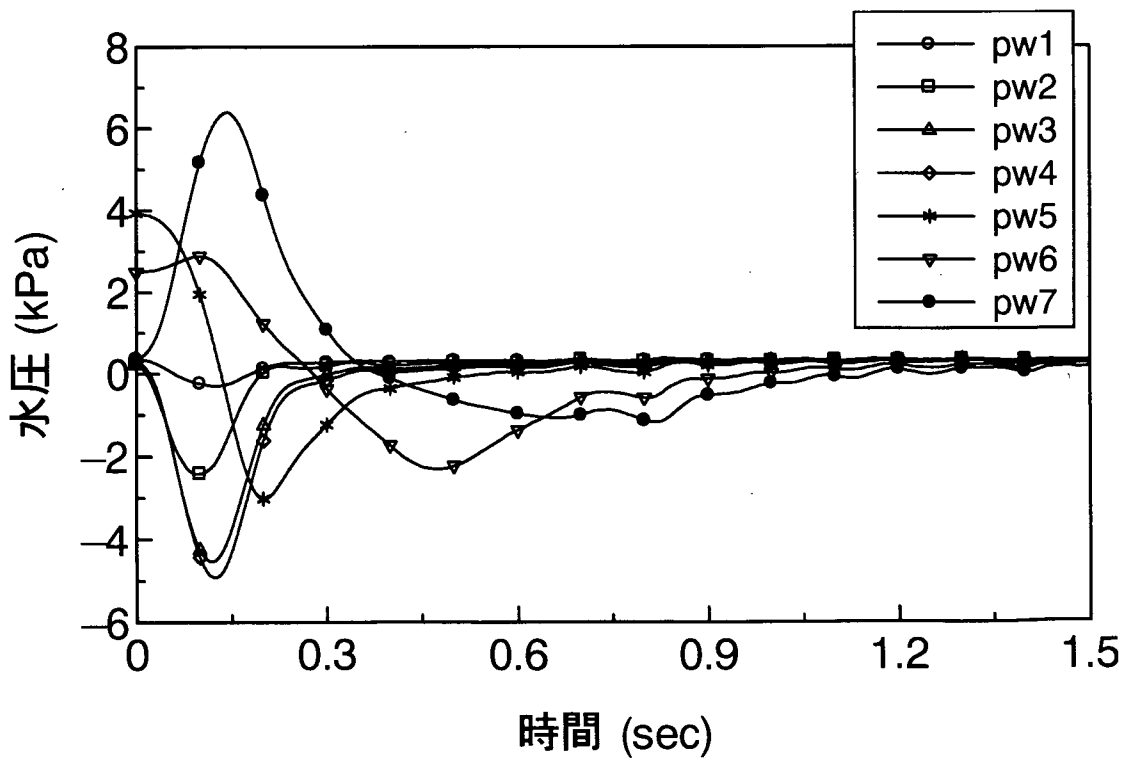


図-付 3.1.2 c02: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤

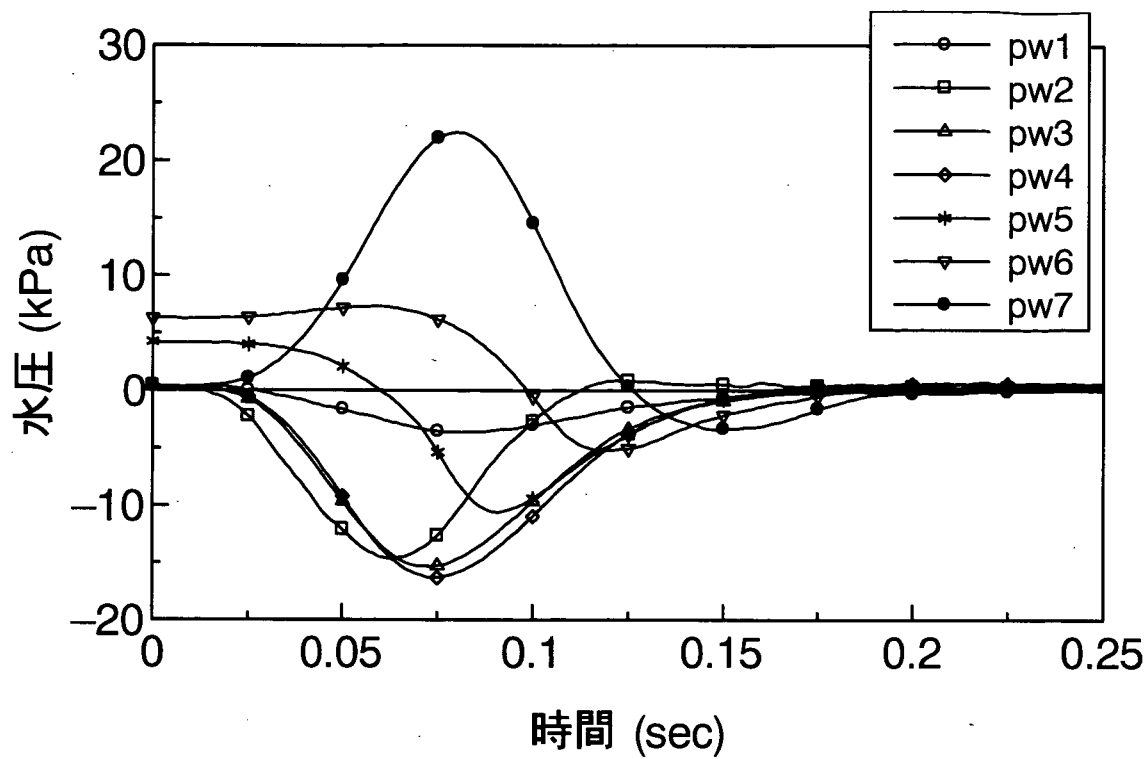


圖-付 3.1.3 c03: 水深 $h=30\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 彈性地盤

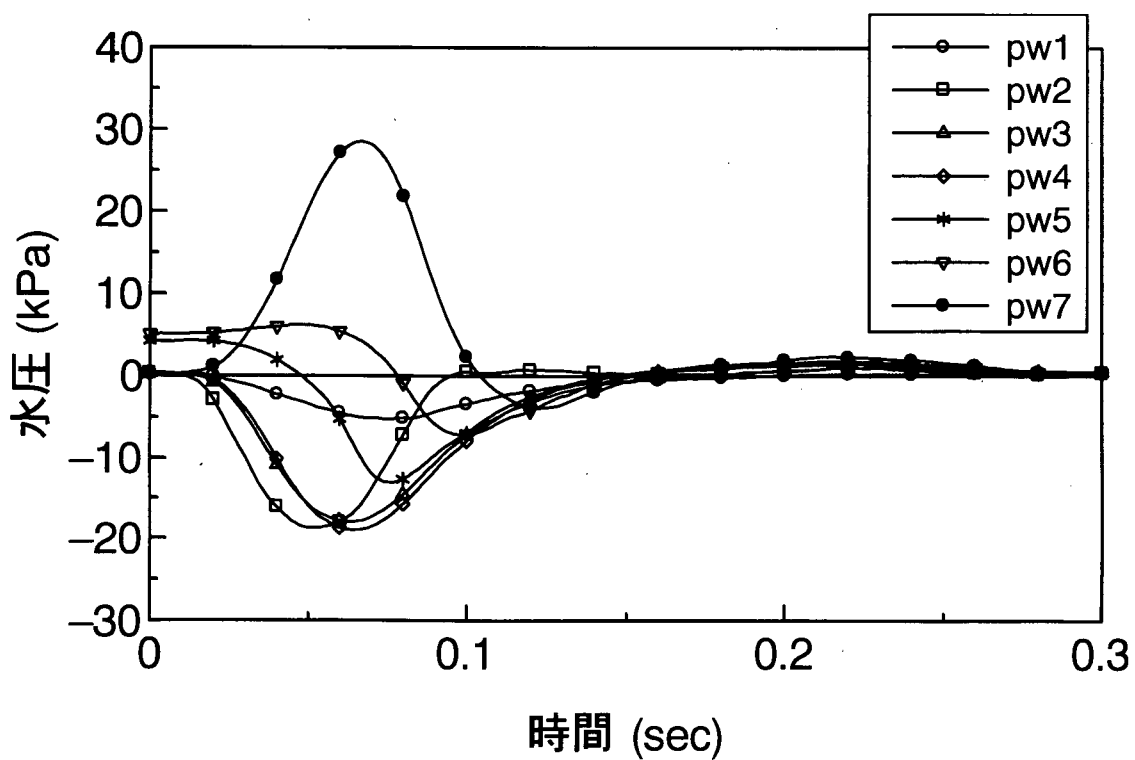
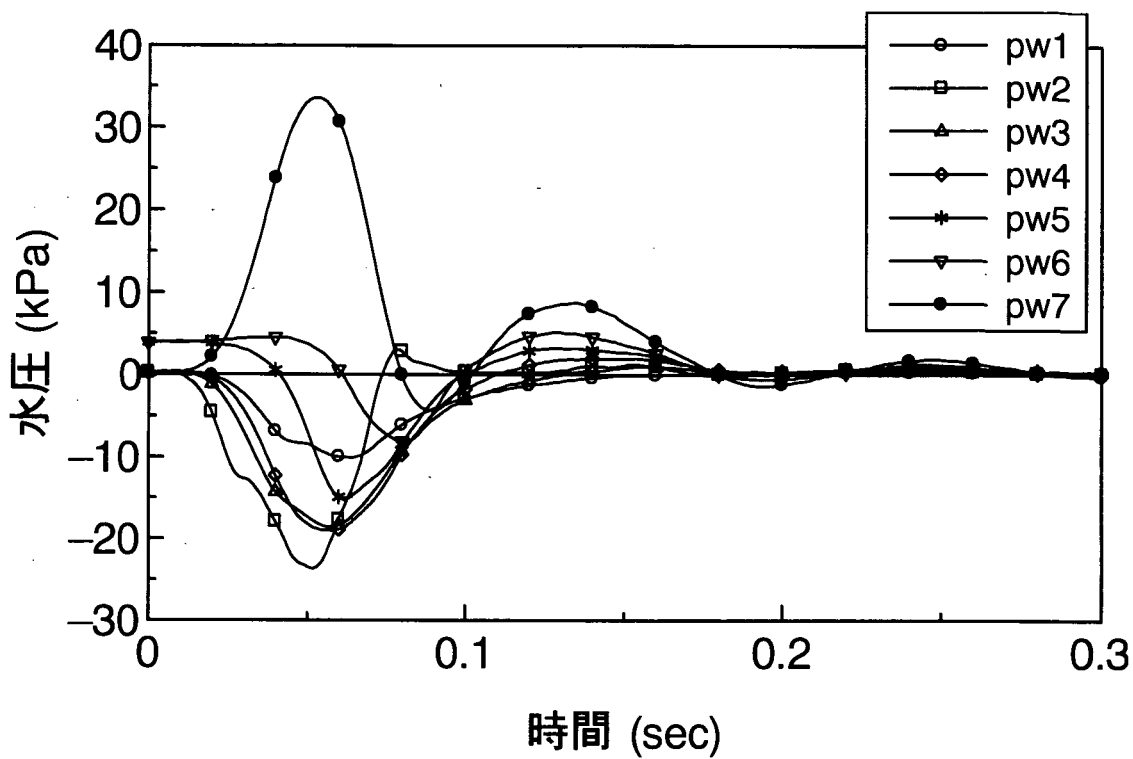
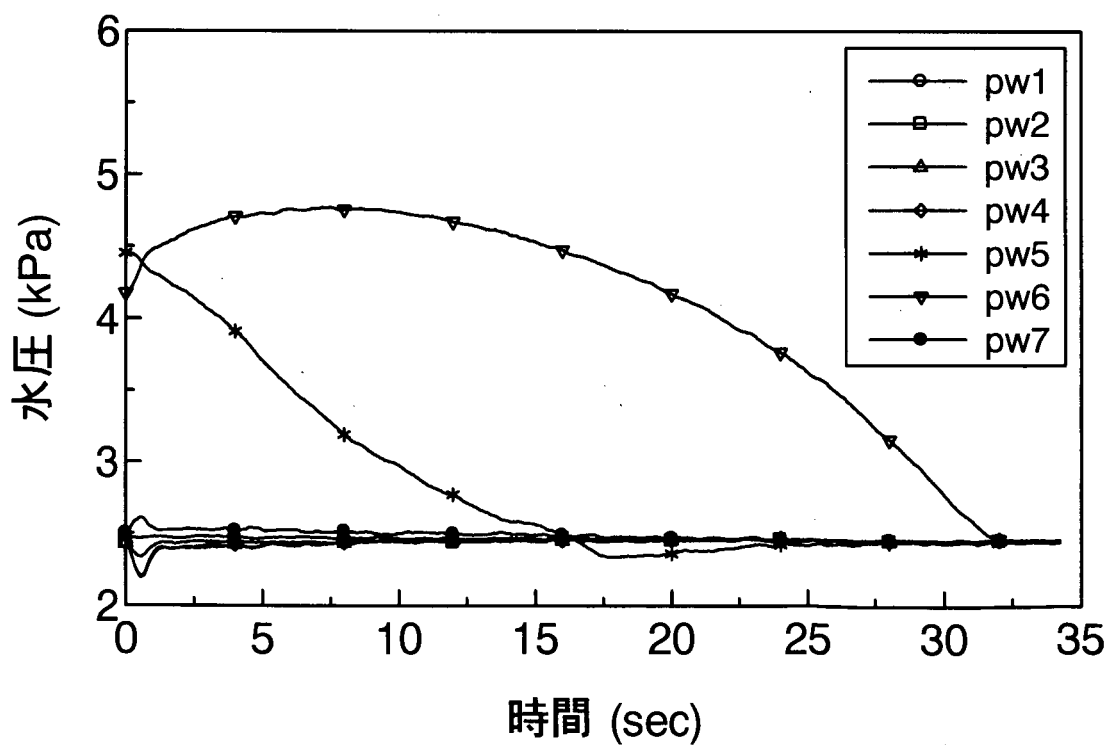


圖-付 3.1.4 c04: 水深 $h=30\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 彈性地盤



図一付 3.1.5 c05: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 3.1.6 c07: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤

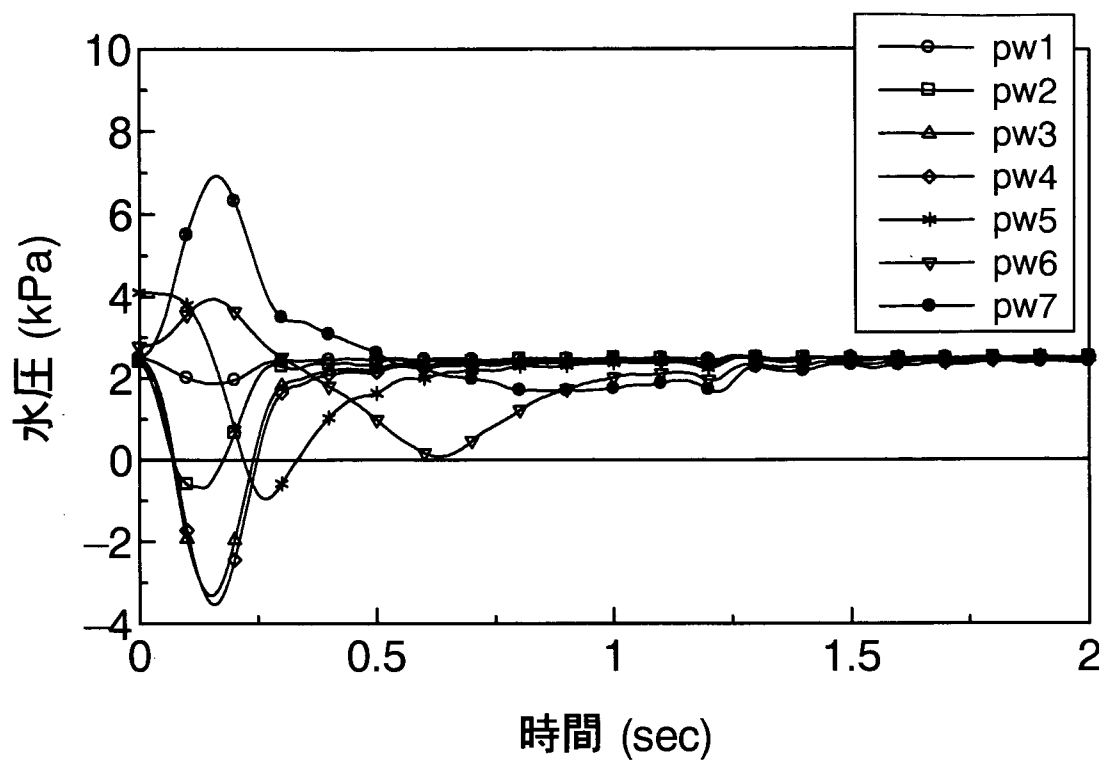


図-付 3.1.7 c08: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤

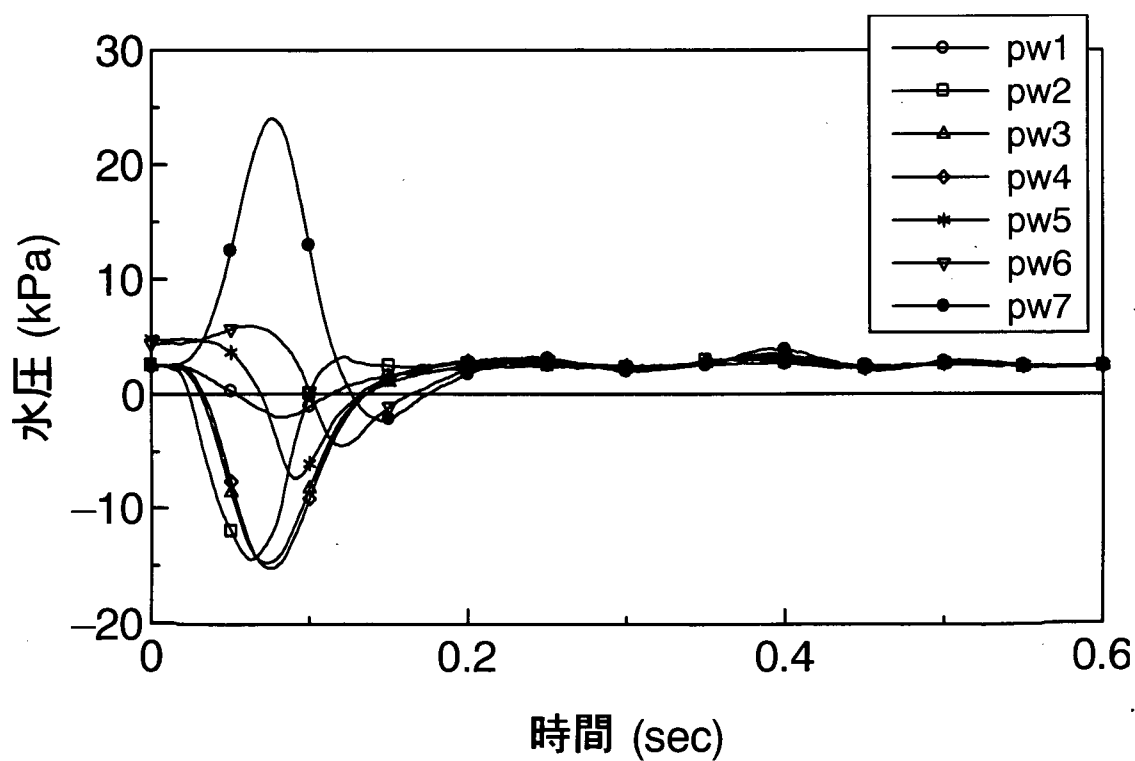
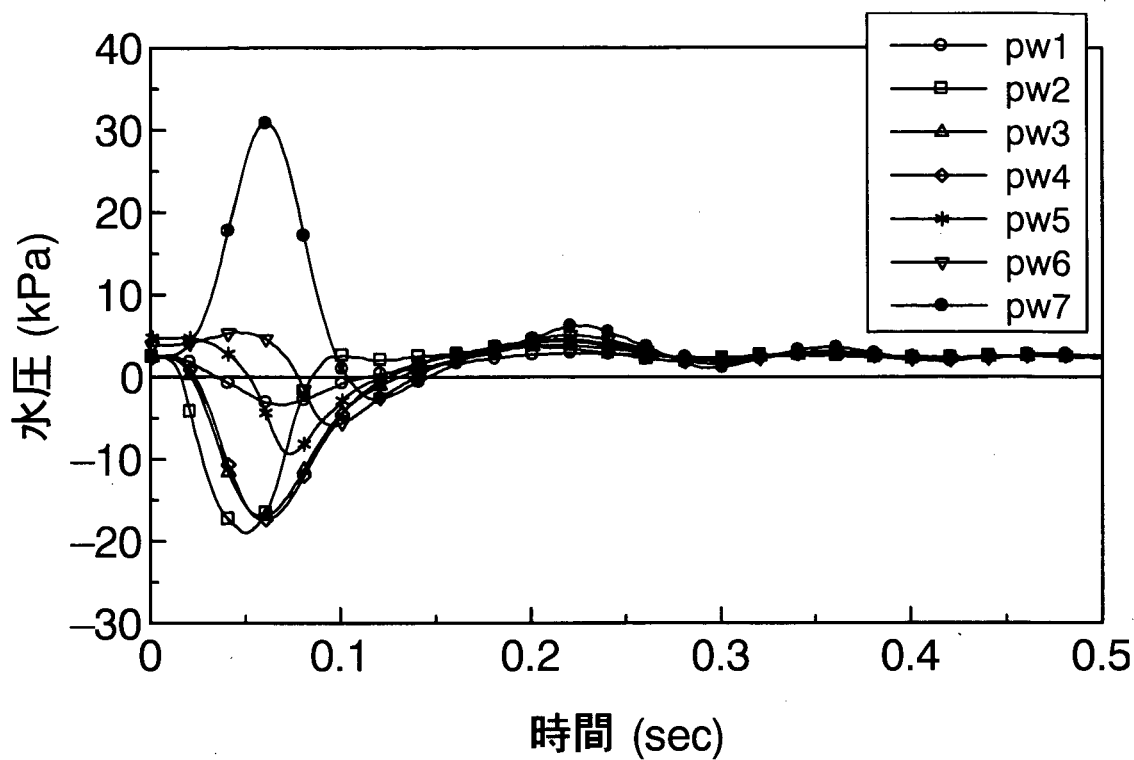
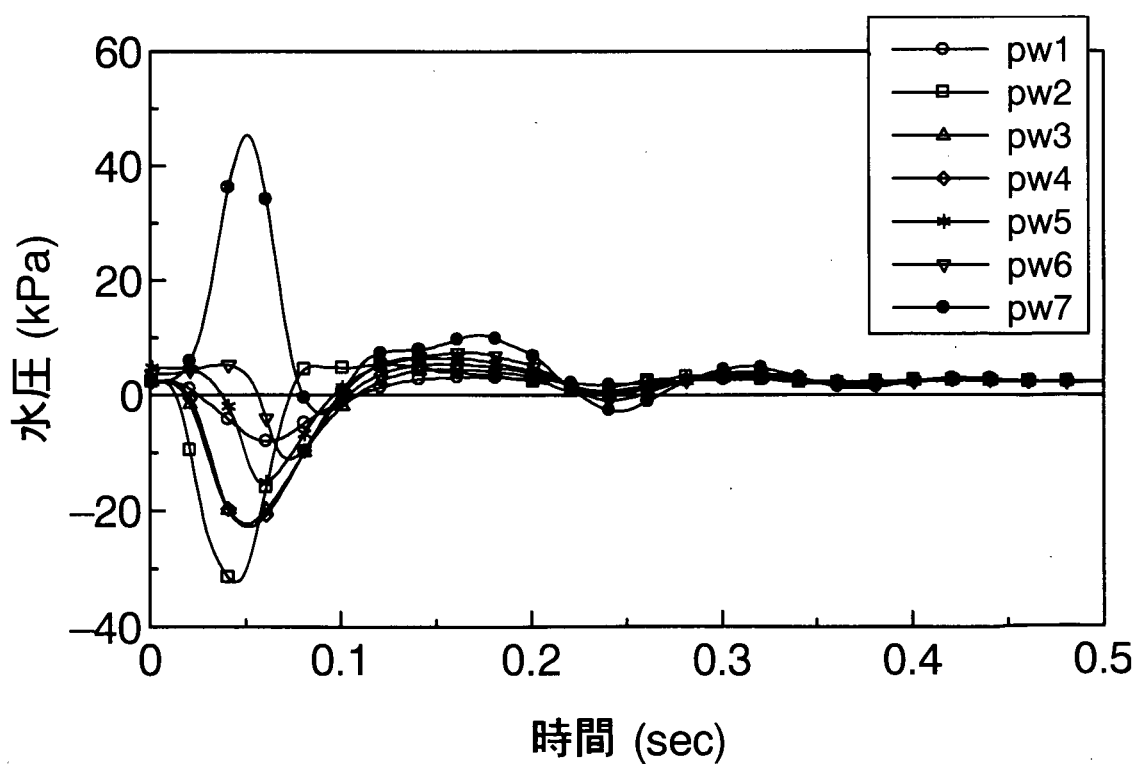


図-付 3.1.8 c09: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 3.1.9 c10: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 3.1.10 c11: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤

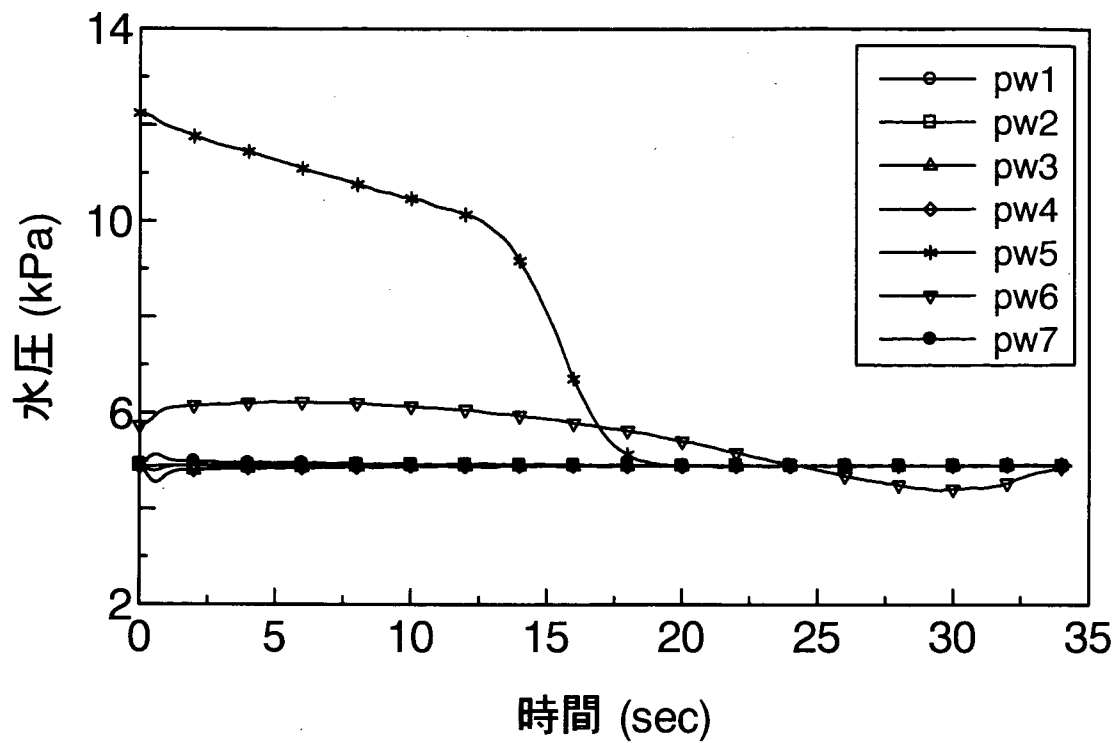


図-付 3.1.11 c13: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤

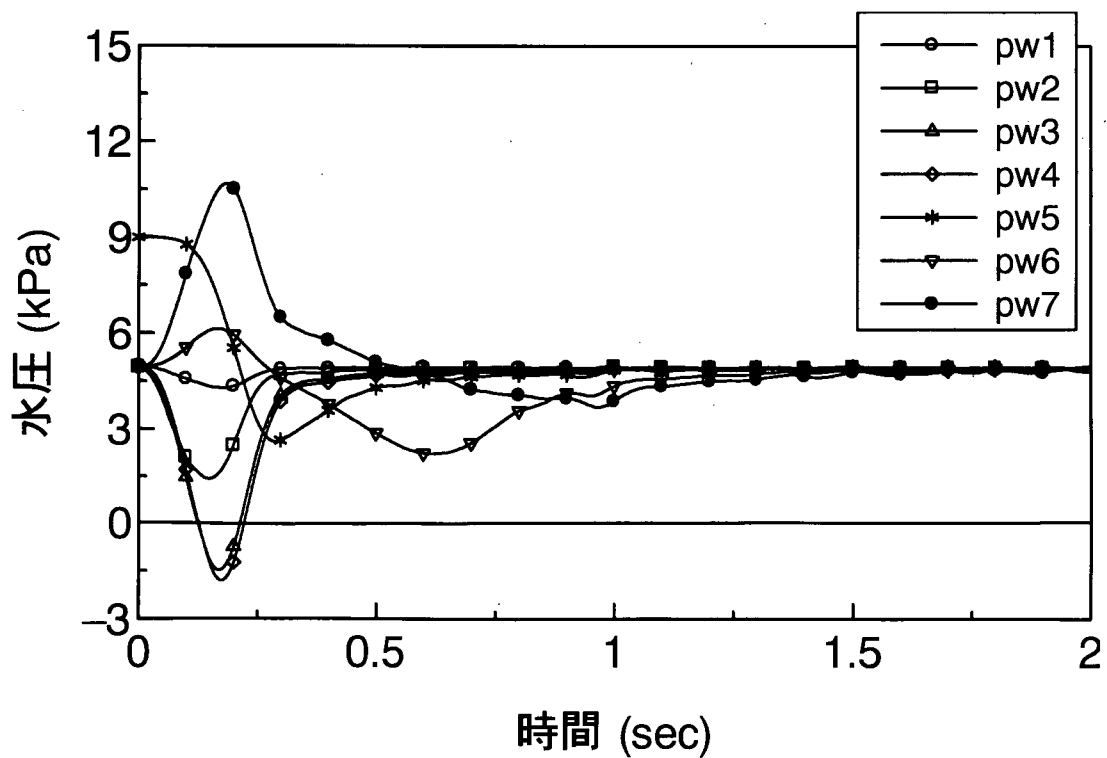


図-付 3.1.12 c14: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤

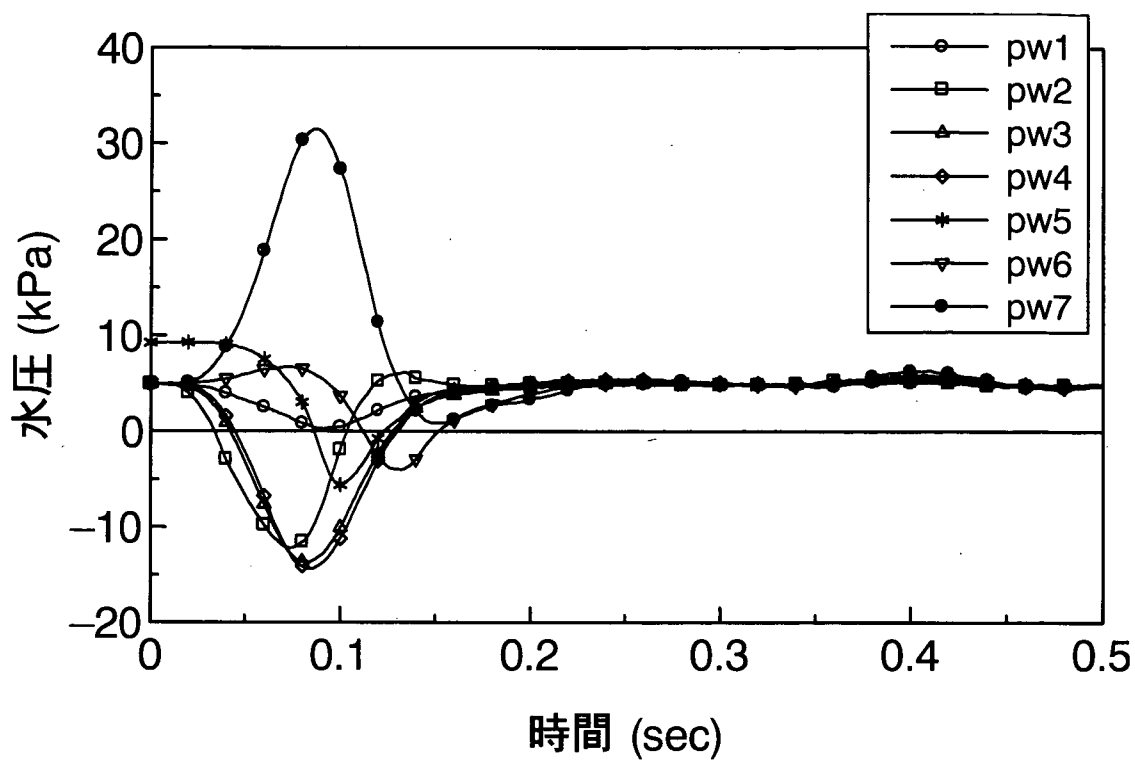


図-付 3.1.13 c15: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤

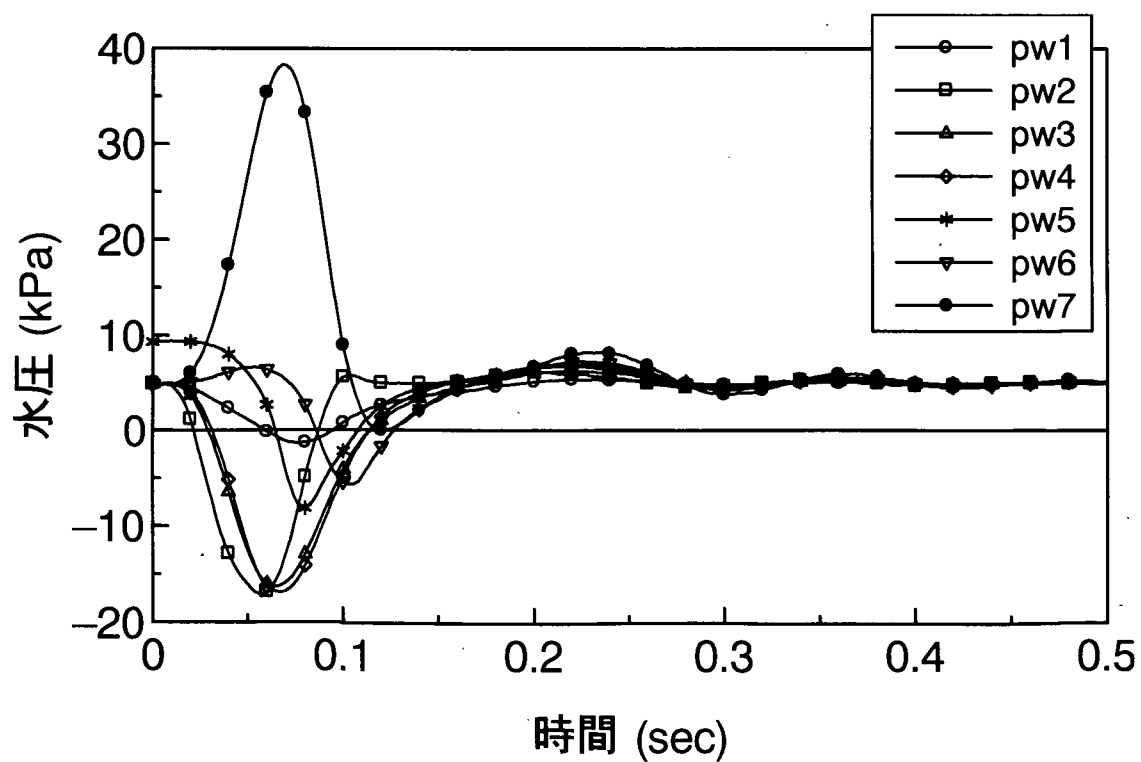
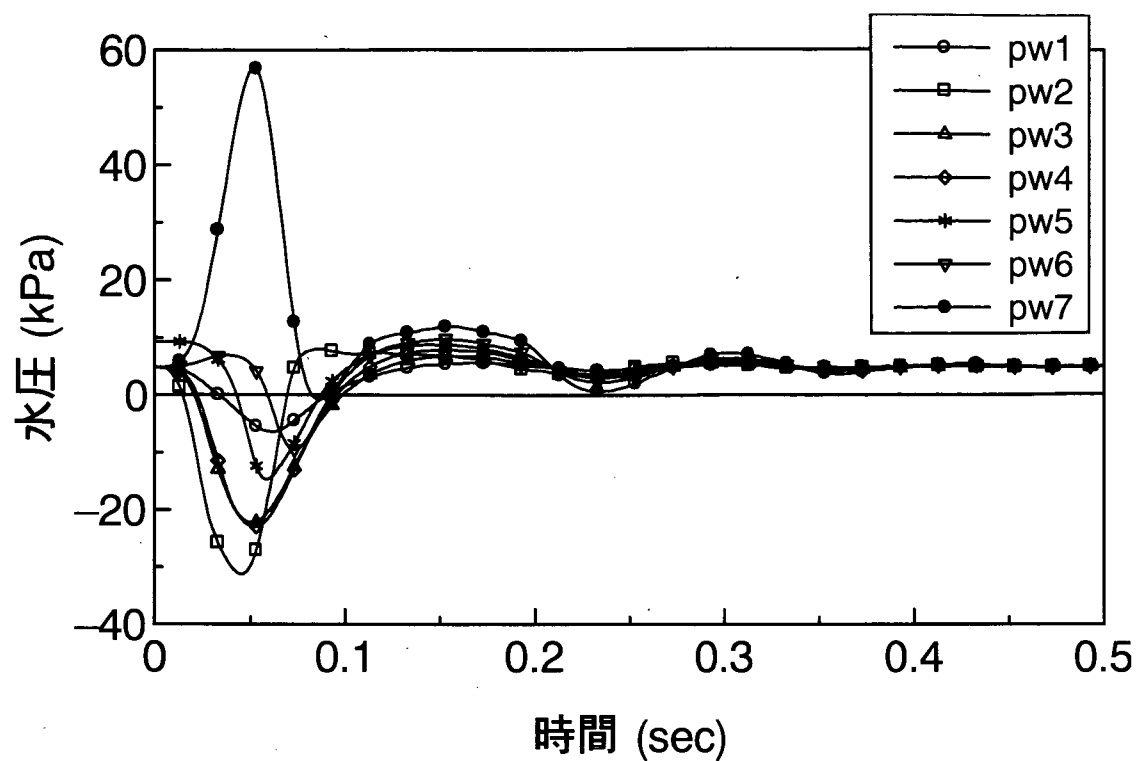
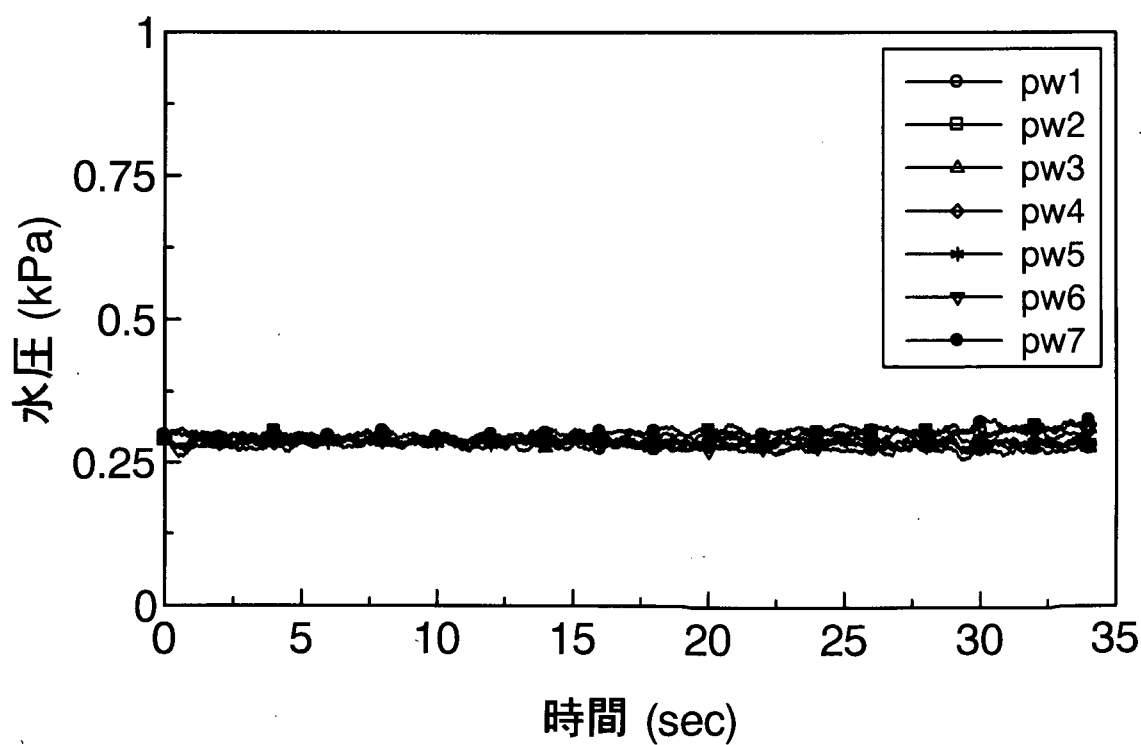


図-付 3.1.14 c16: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤



圖一付 3.1.15 c17: 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 彈性地盤



圖一付 3.1.16 c19: 水深 $h=30\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤

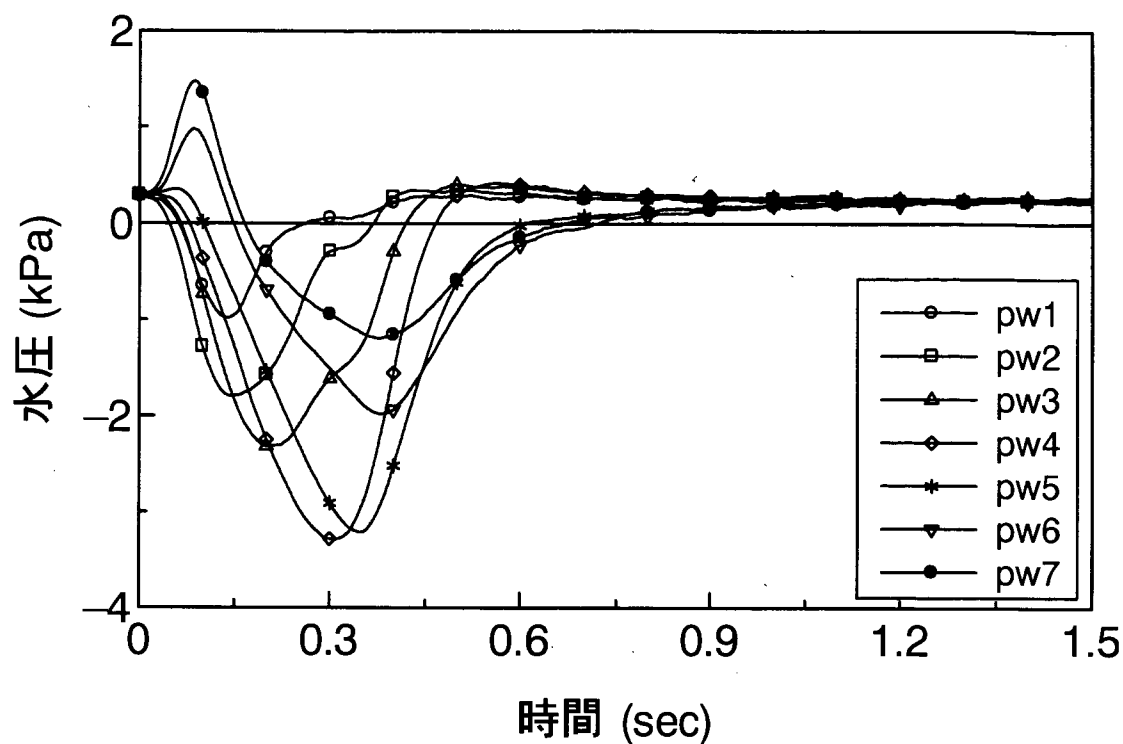


図-付 3.1.17 c20: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤

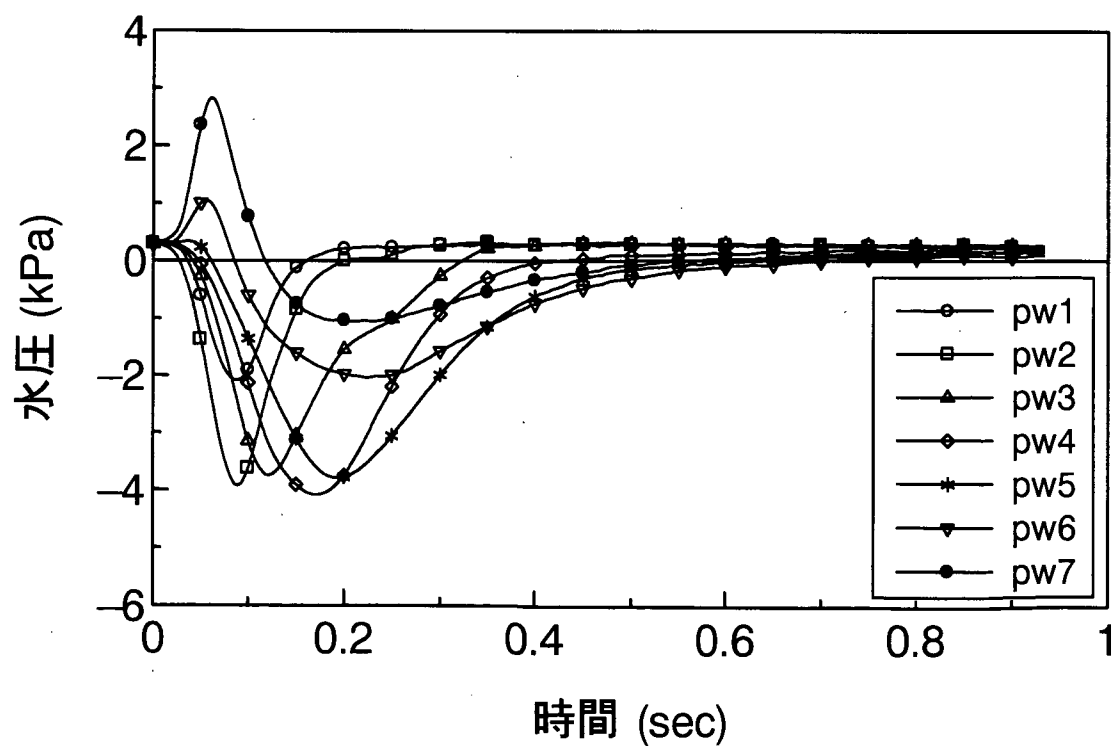
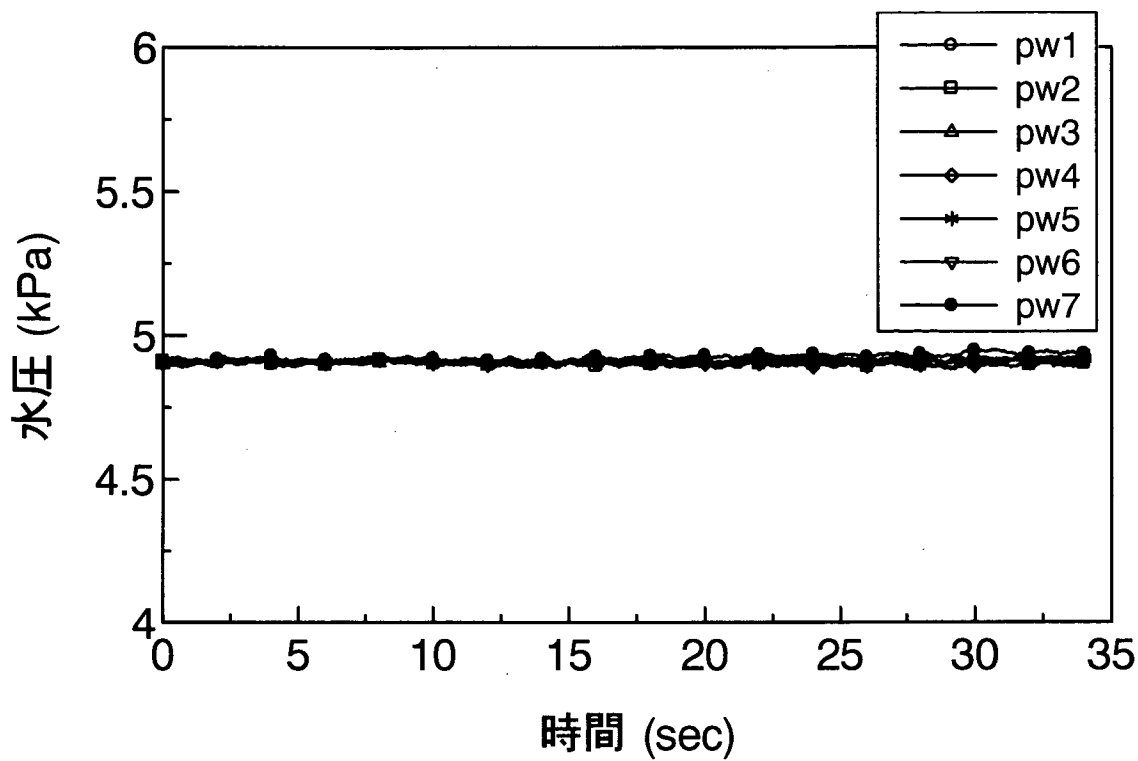
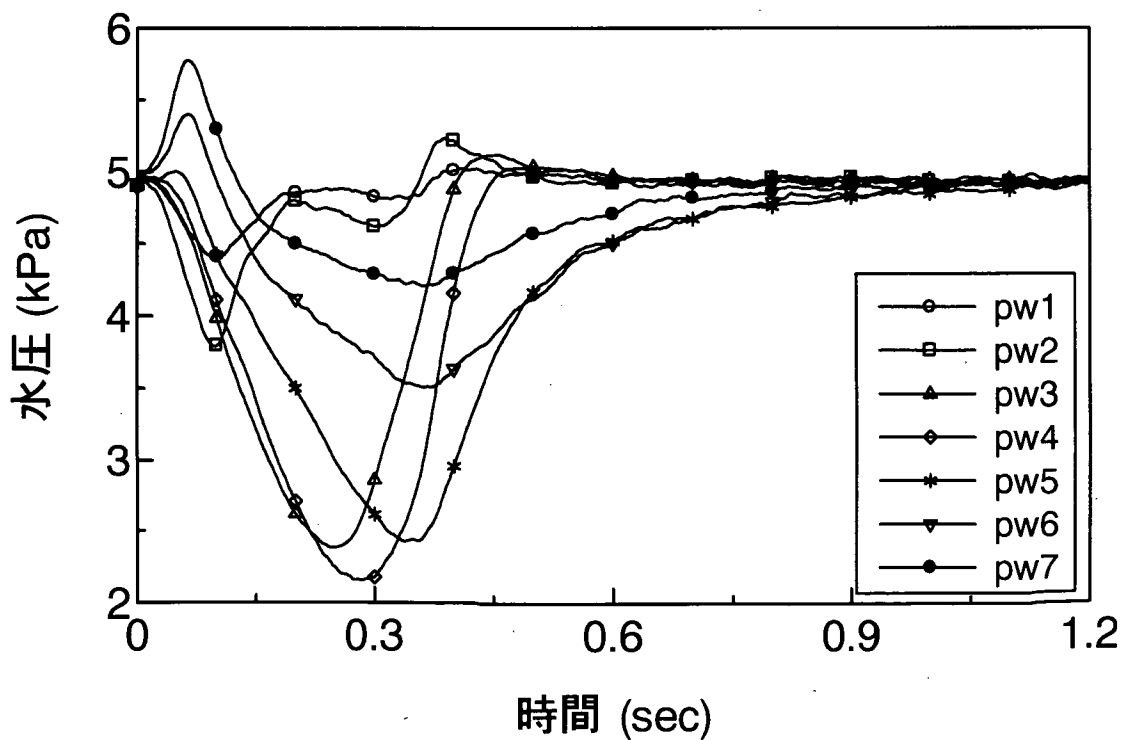


図-付 3.1.18 c21: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤



図一付 3.1.19 c23: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤



図一付 3.1.20 c24: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤

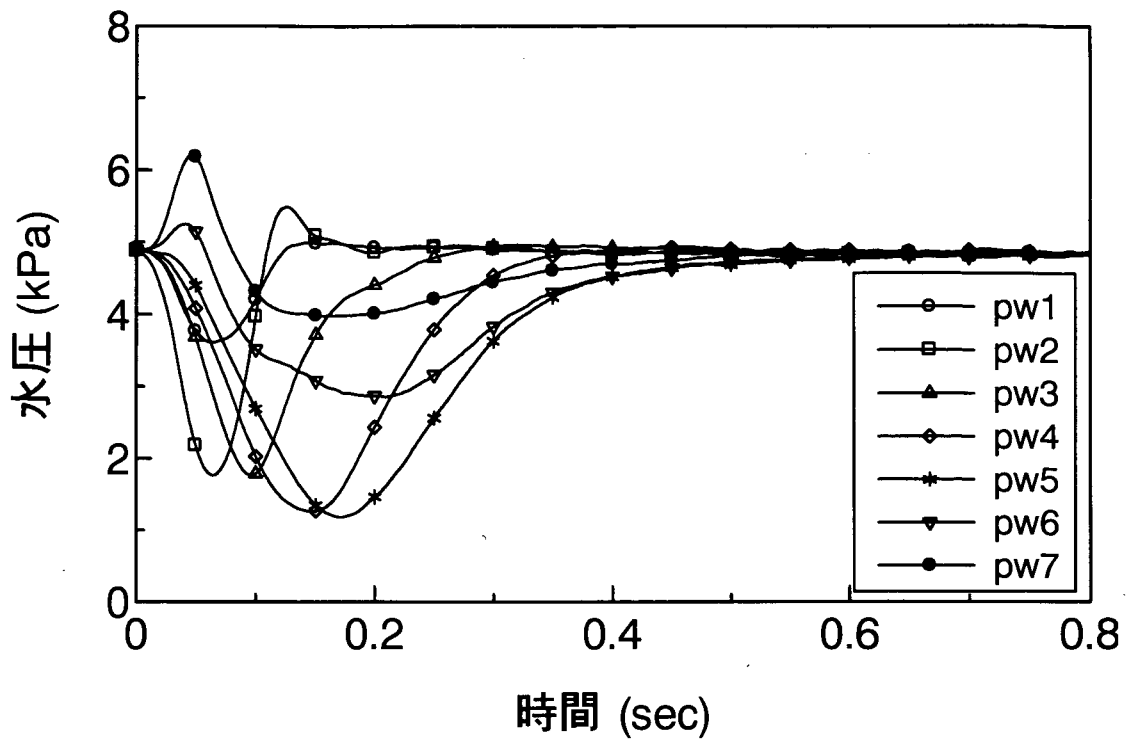


図-付 3.1.21 c25: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

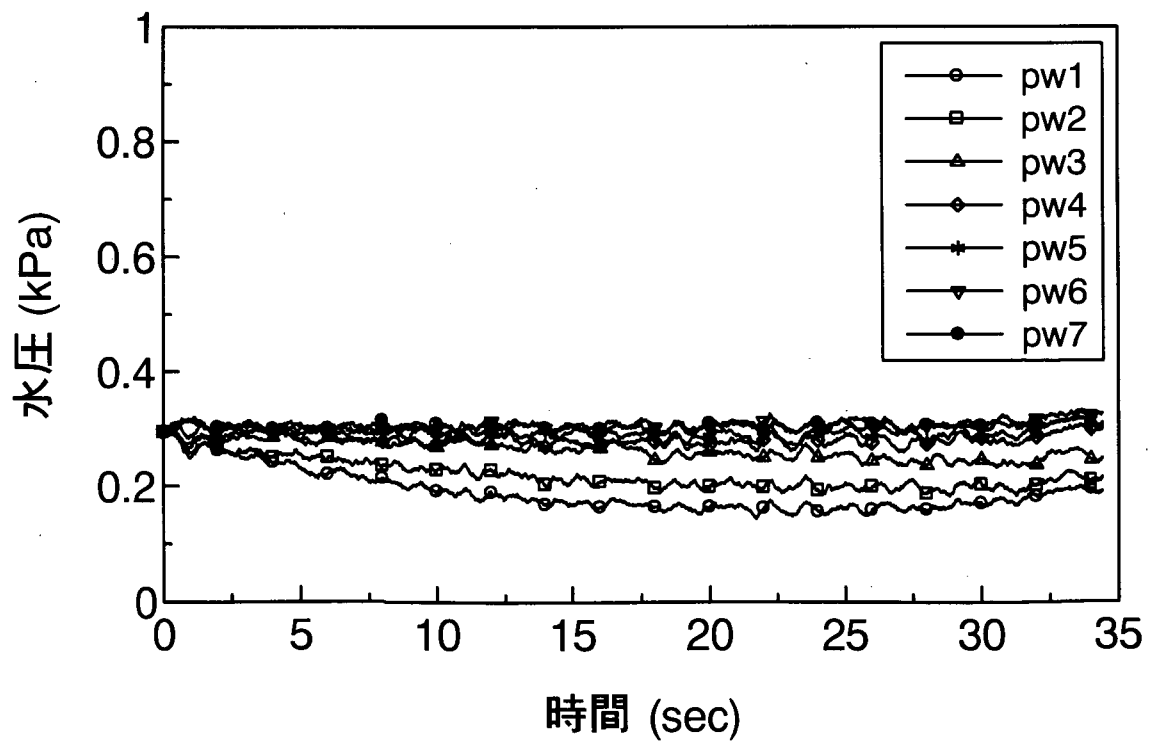


図-付 3.1.22 c27: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

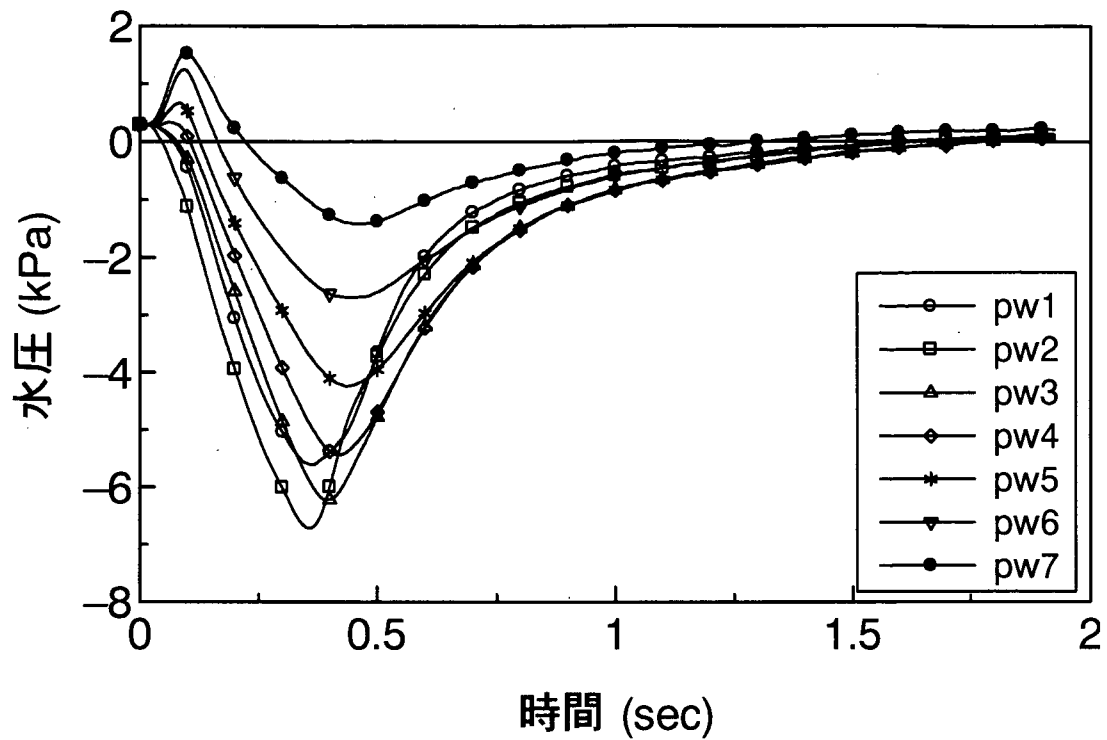


図-付 3.1.23 c28: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

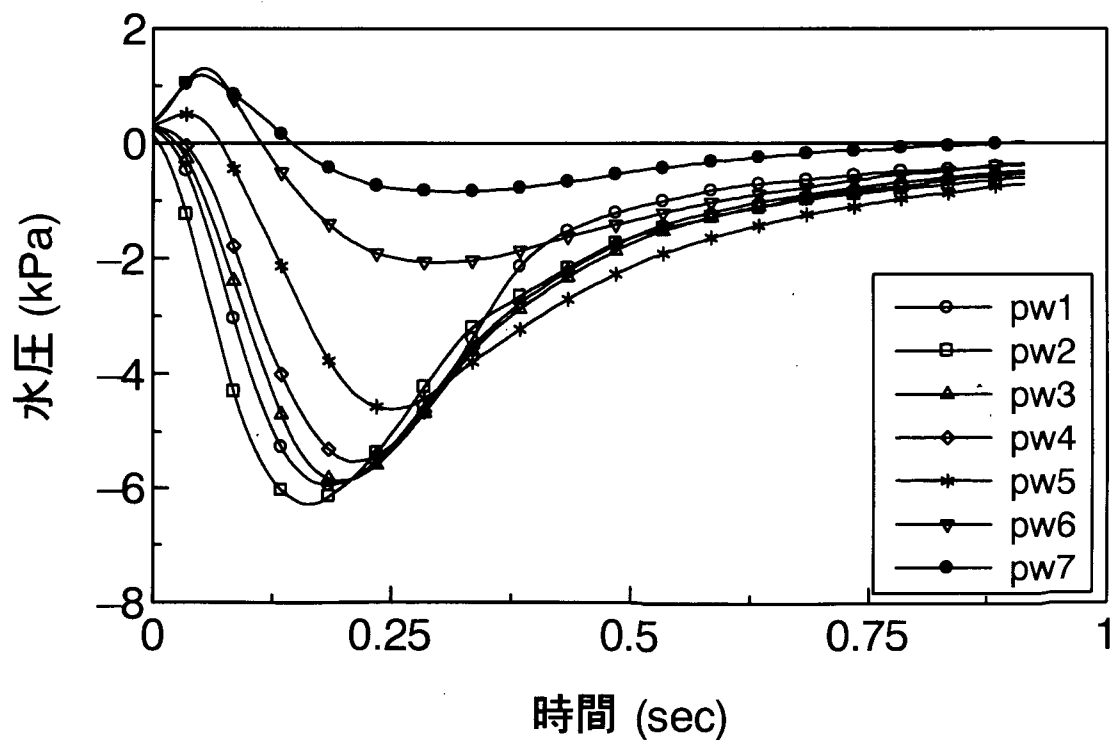


図-付 3.1.24 c29: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

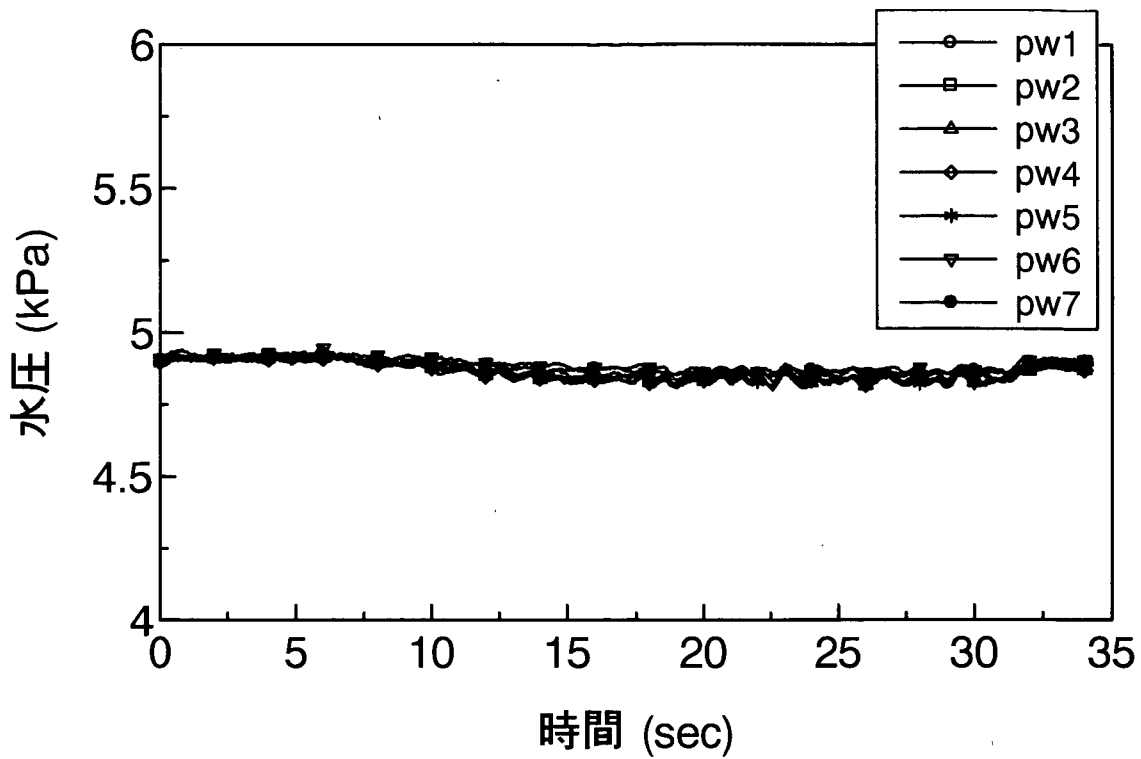


図-付 3.1.25 c31: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

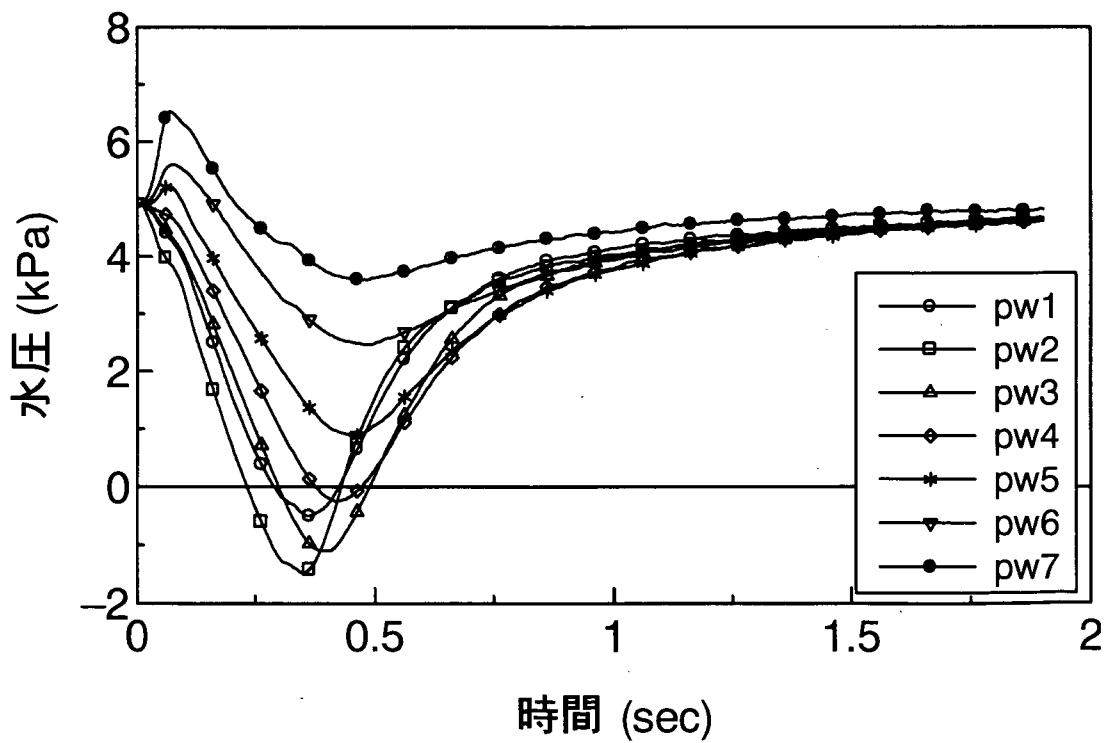


図-付 3.1.26 c32: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

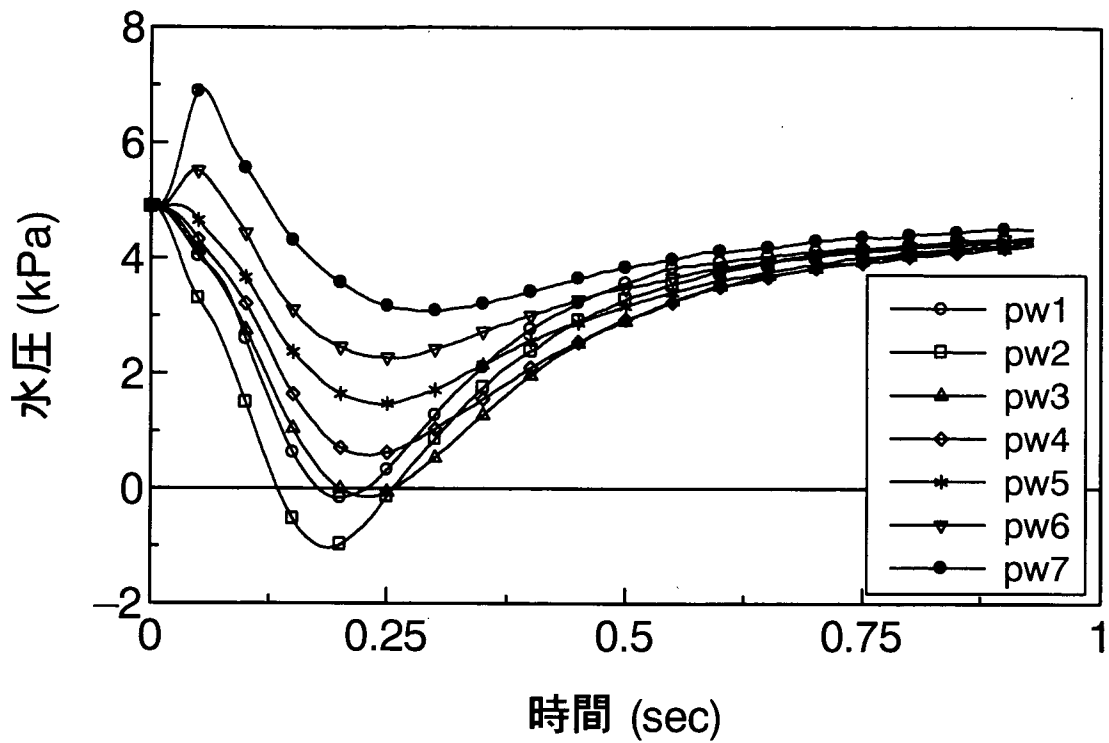


図-付 3.1.27 c33: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

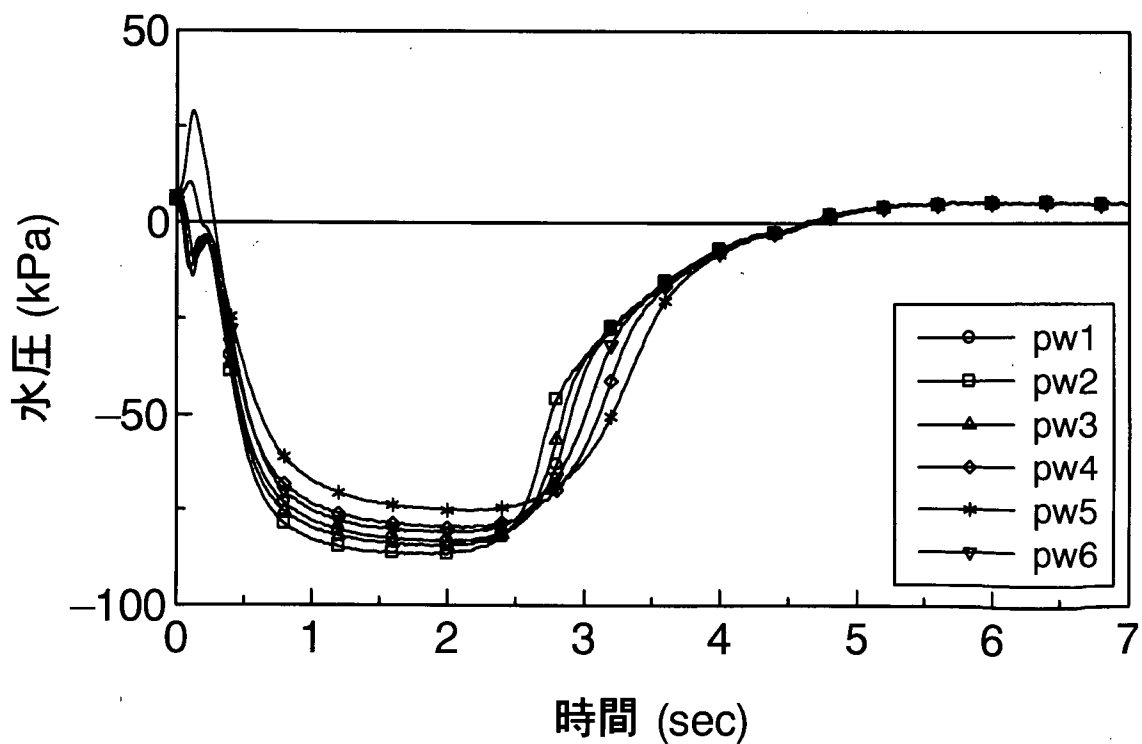
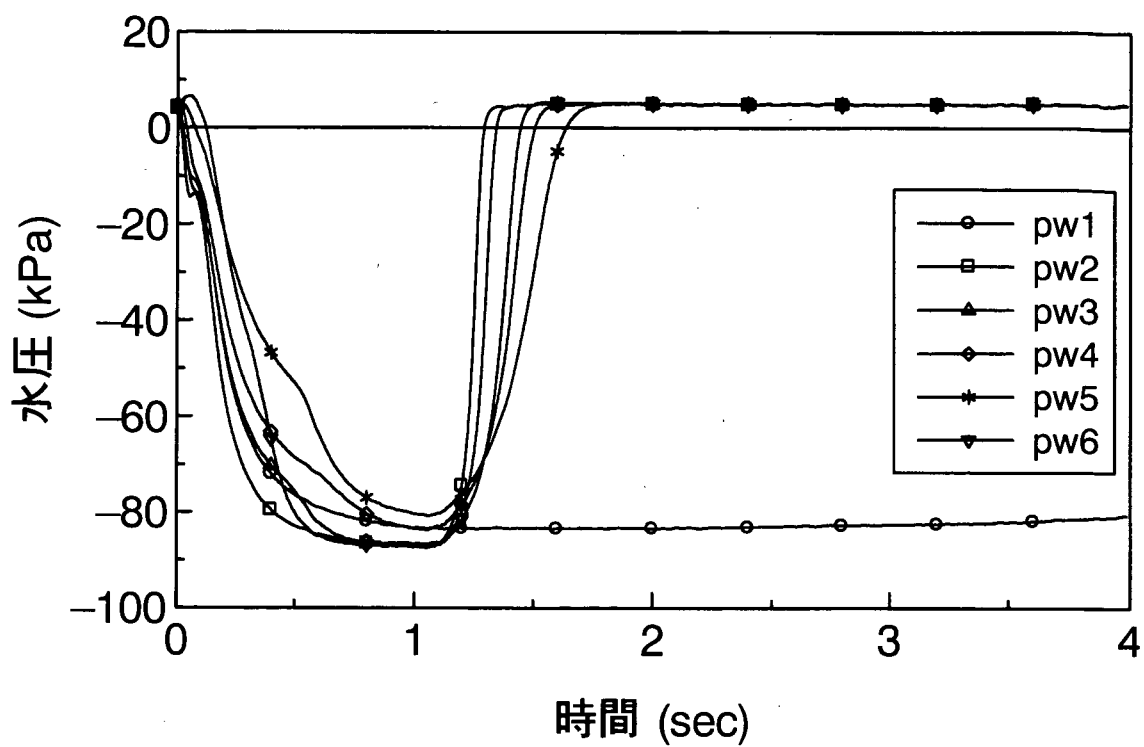
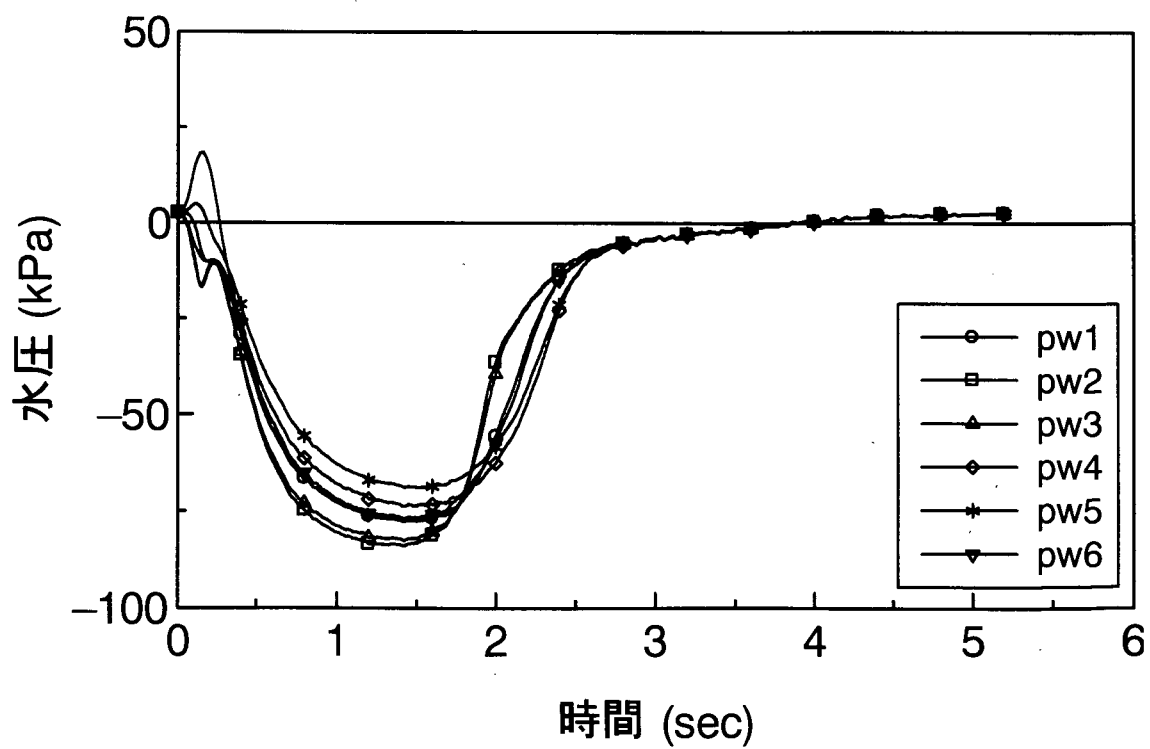


図-付 3.1.28 c35: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



図一付 3.1.29 c36: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



図一付 3.1.30 c37: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

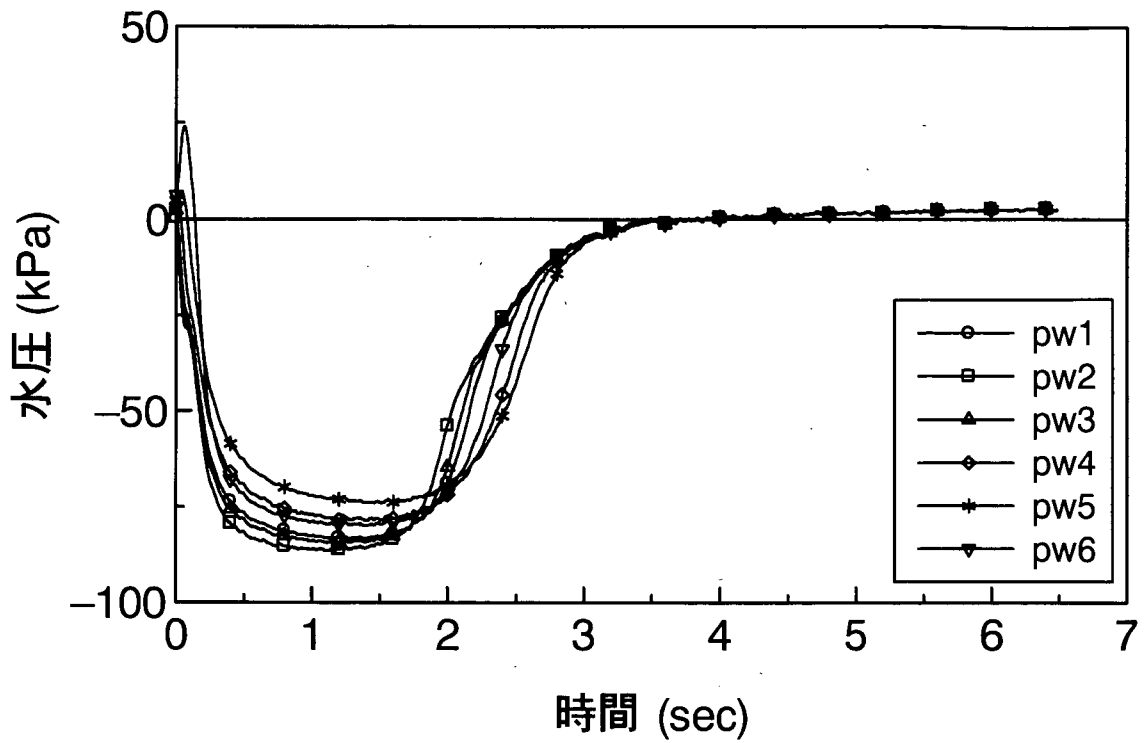


図-付 3.1.31 c38: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

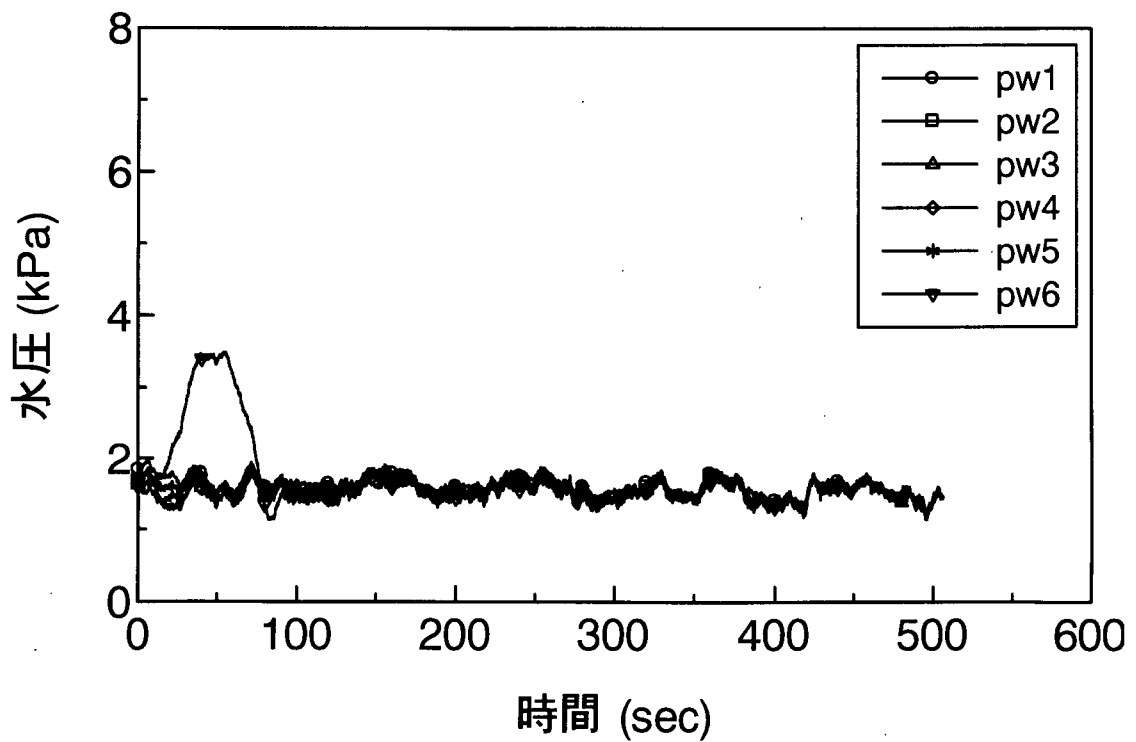


図-付 3.1.32 c39: 水深 $h=150\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.0001\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

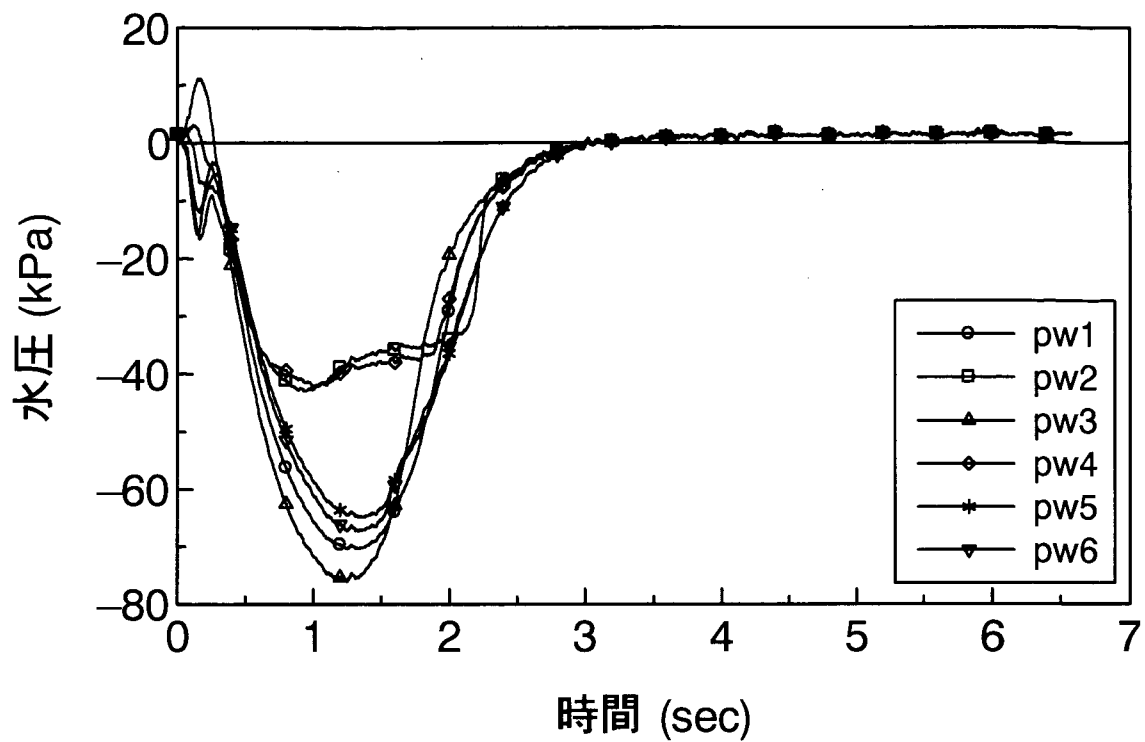


図-付 3.1.33 c40: 水深 $h=150\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

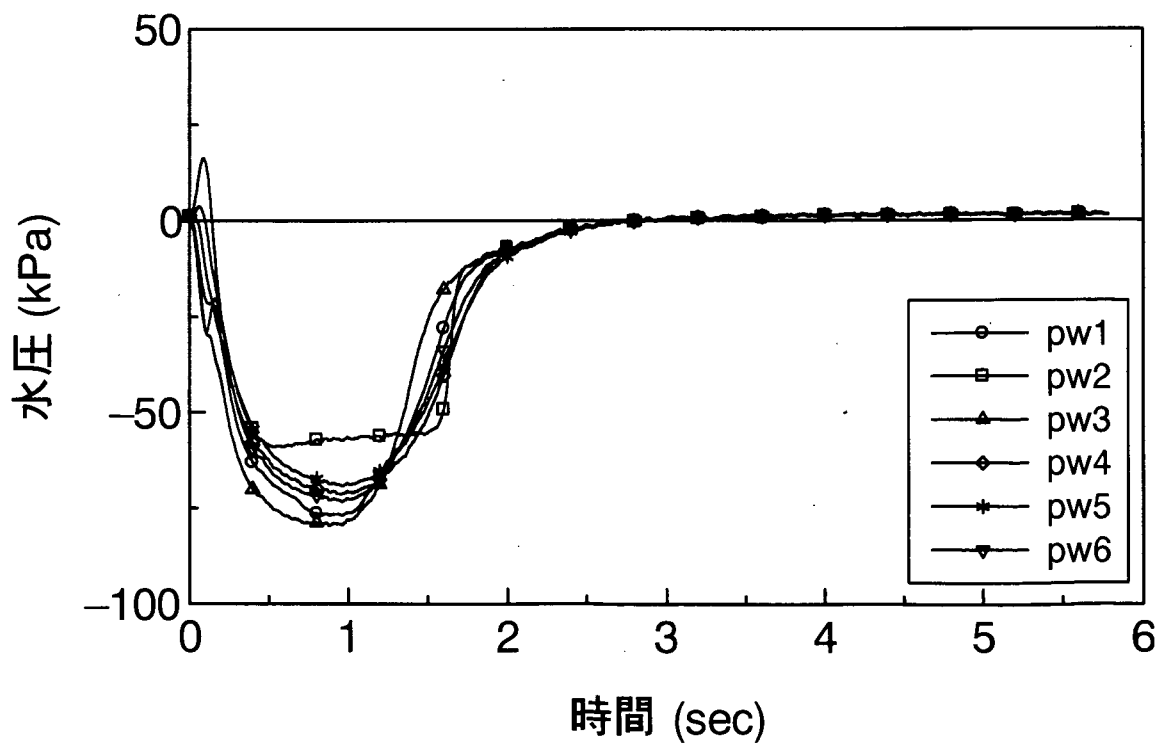
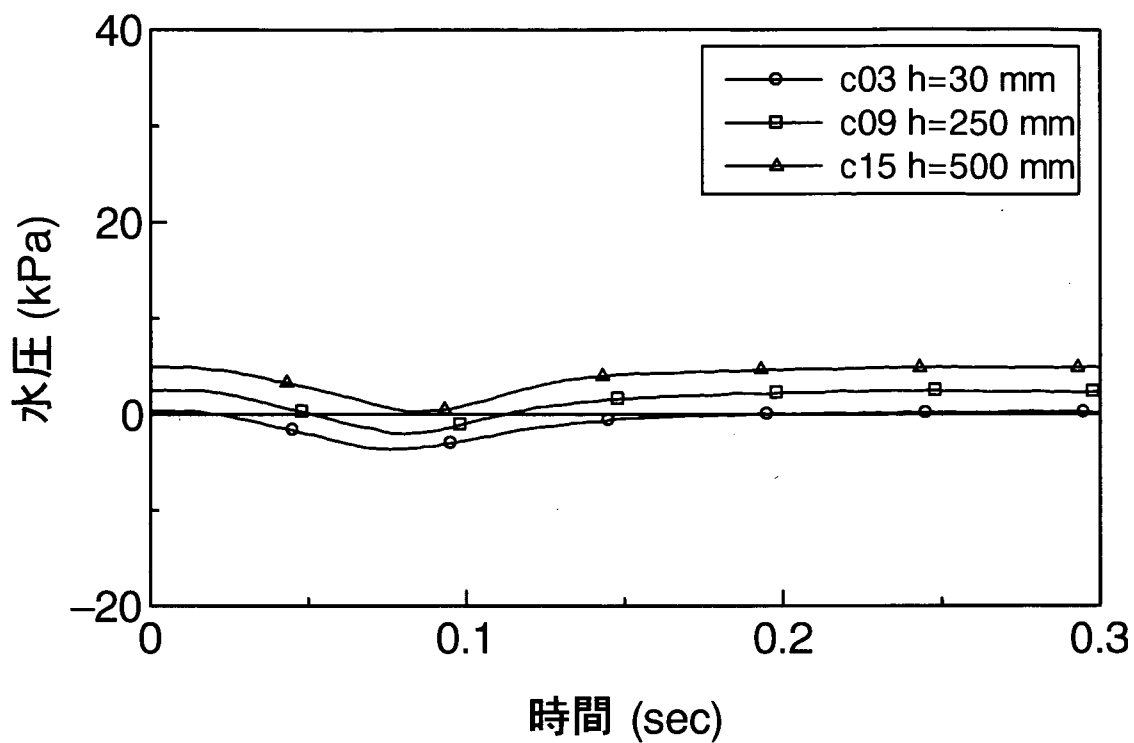
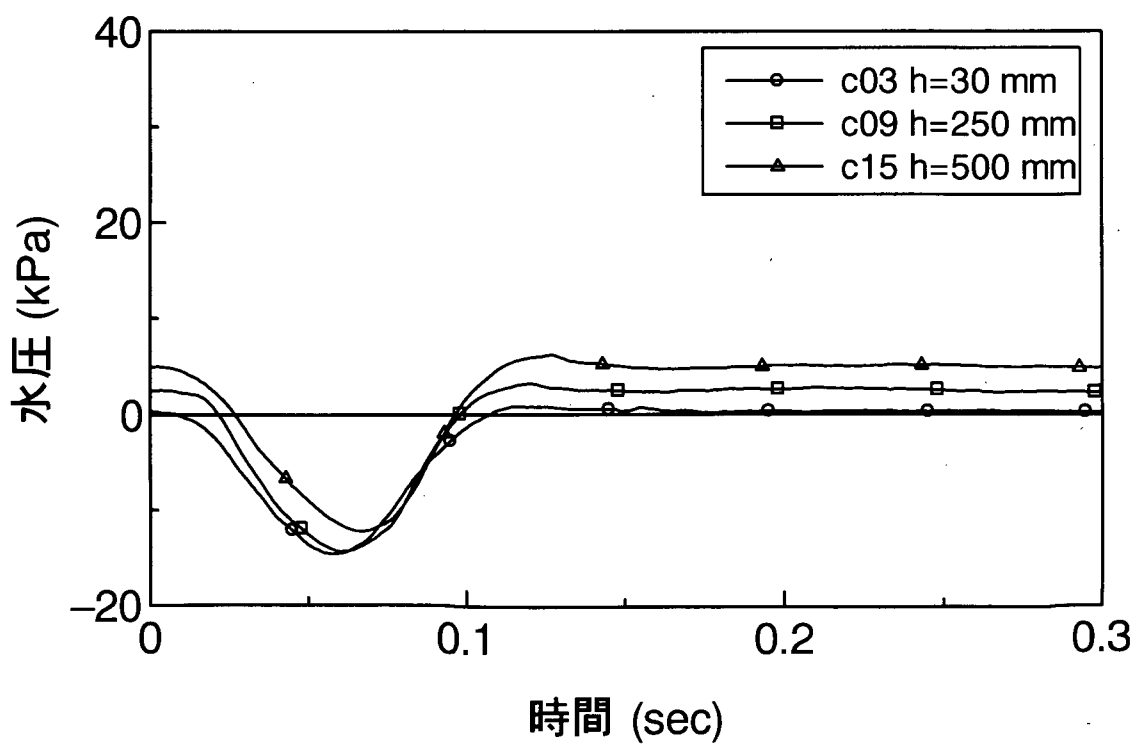


図-付 3.1.34 c41: 水深 $h=150\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

3.2 水深差の影響

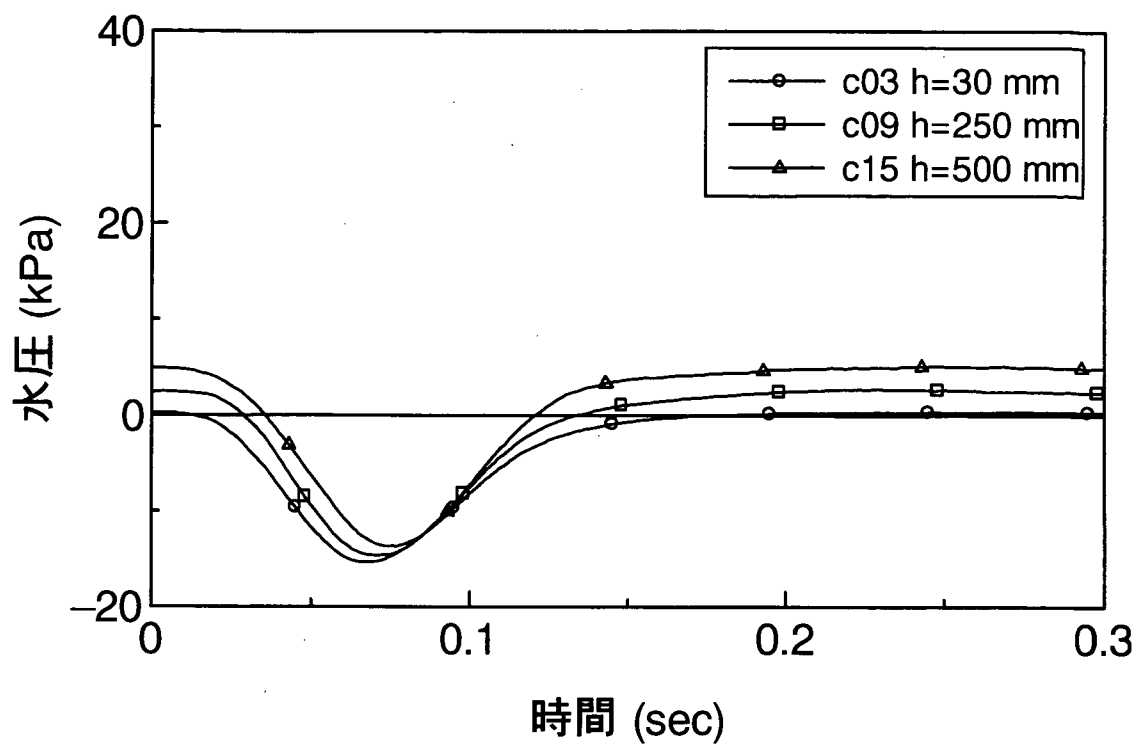


(a) W1

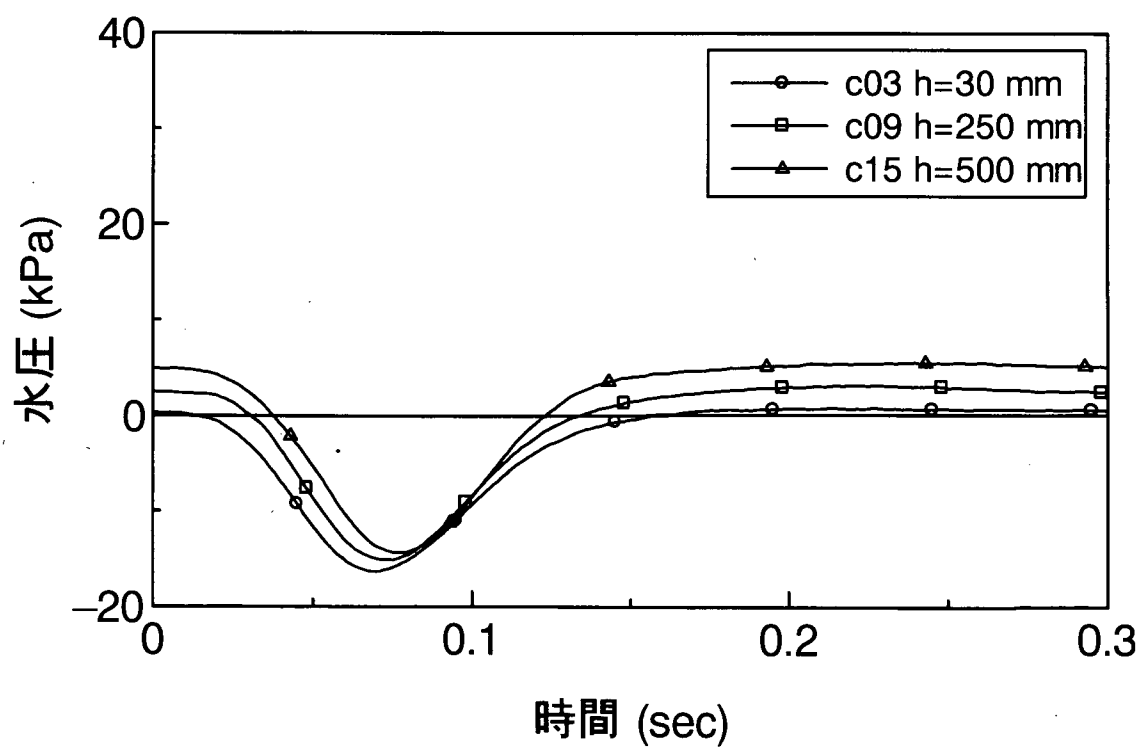


(b) W2

図-付 3.2.1-1 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤

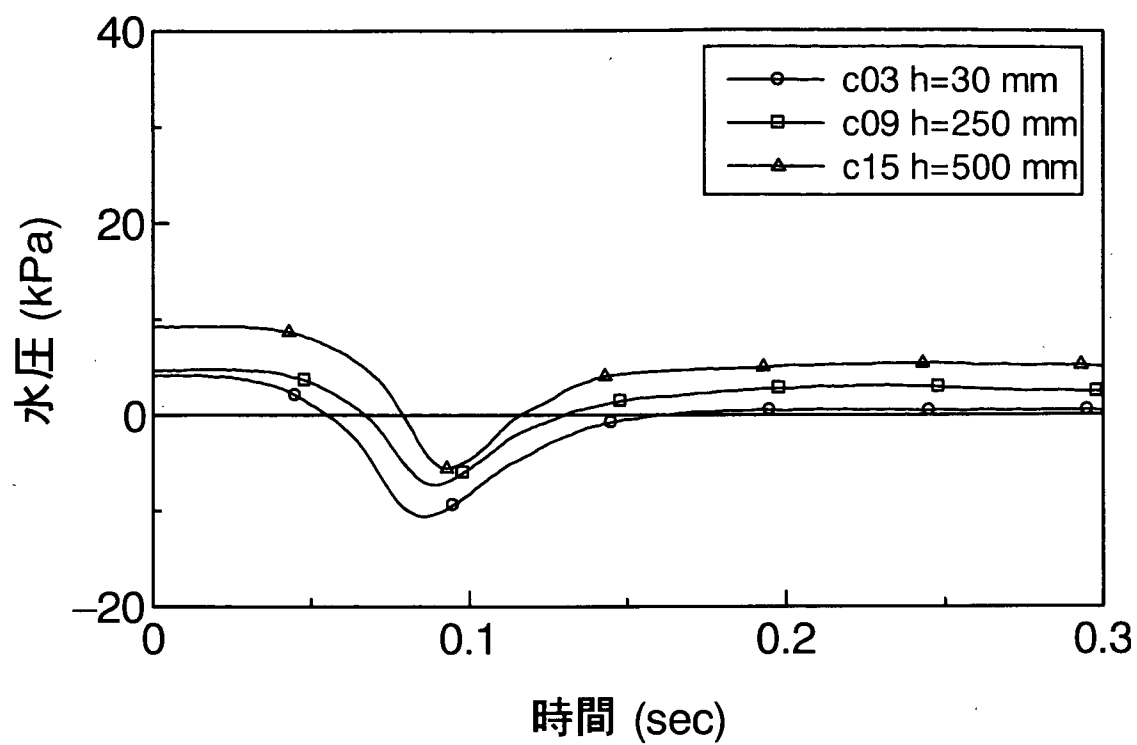


(c) W3

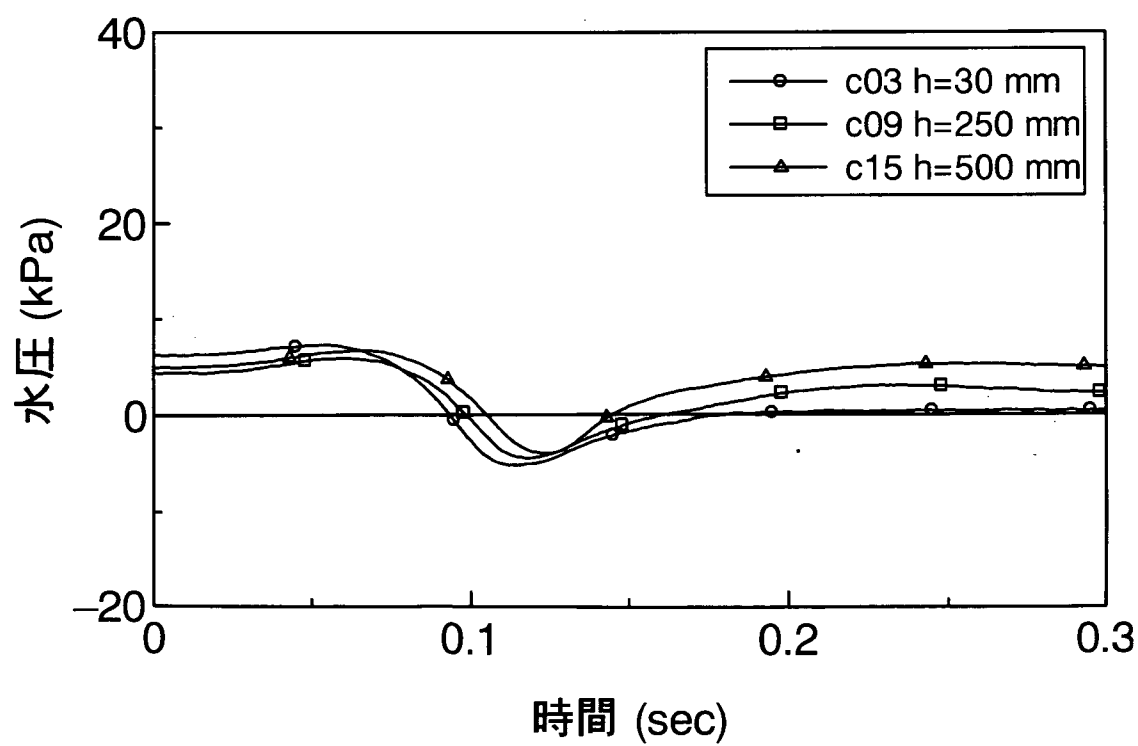


(d) W4

図-付 3.2.1-2 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤

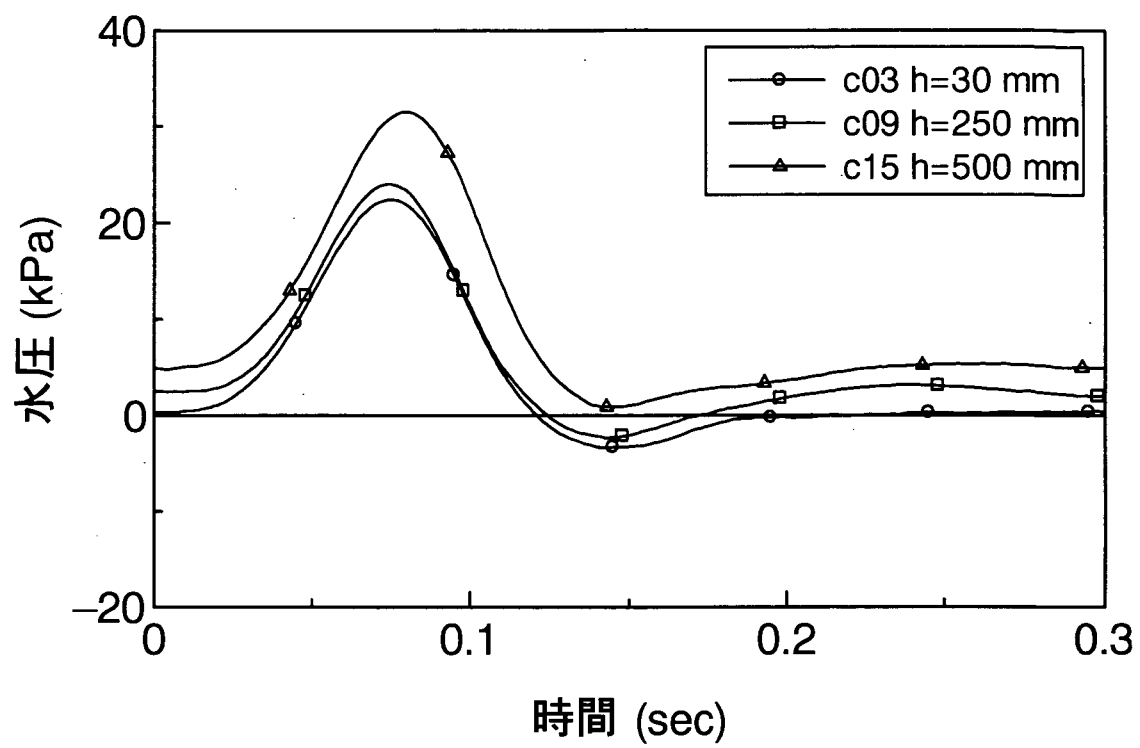


(e) W5



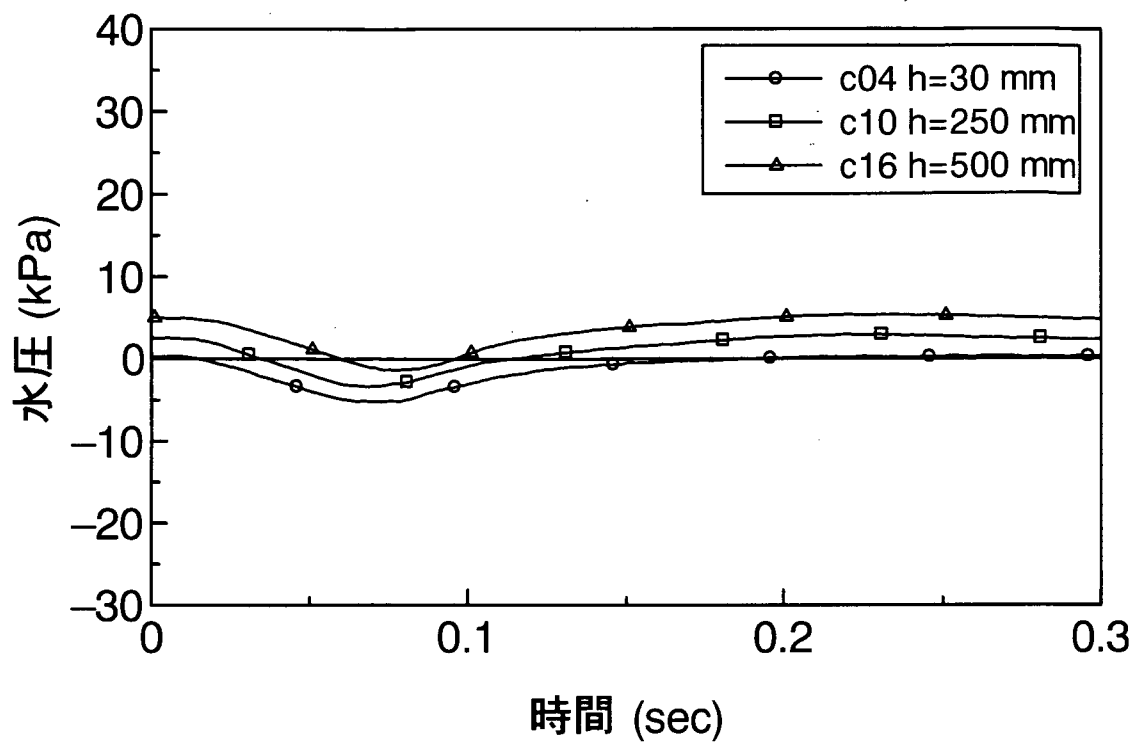
(f) W6

図-付 3.2.1-3 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤

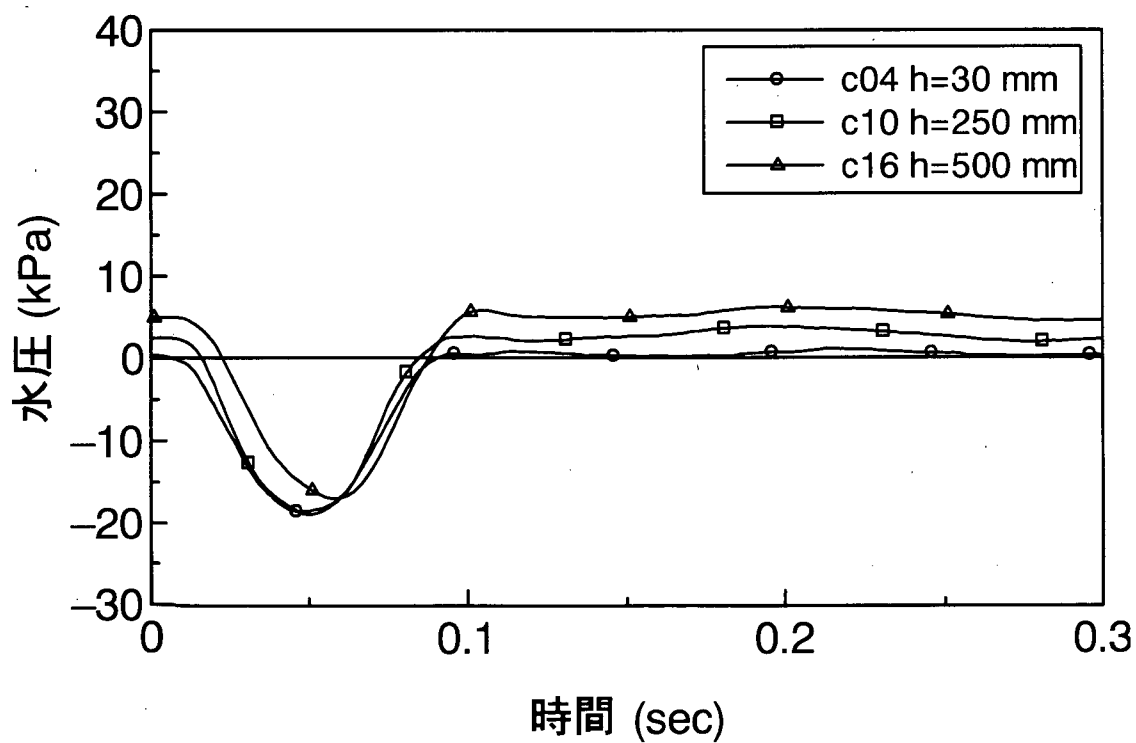


(g) W7

図-付 3.2.1-4 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤

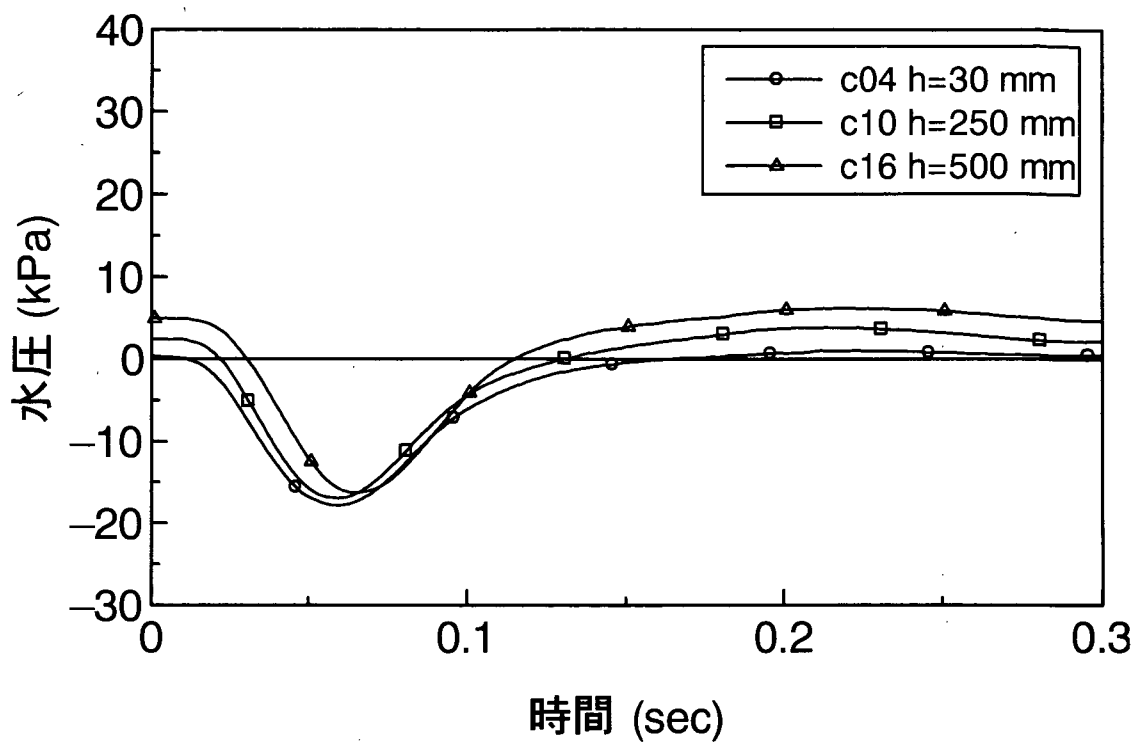


(a) W1

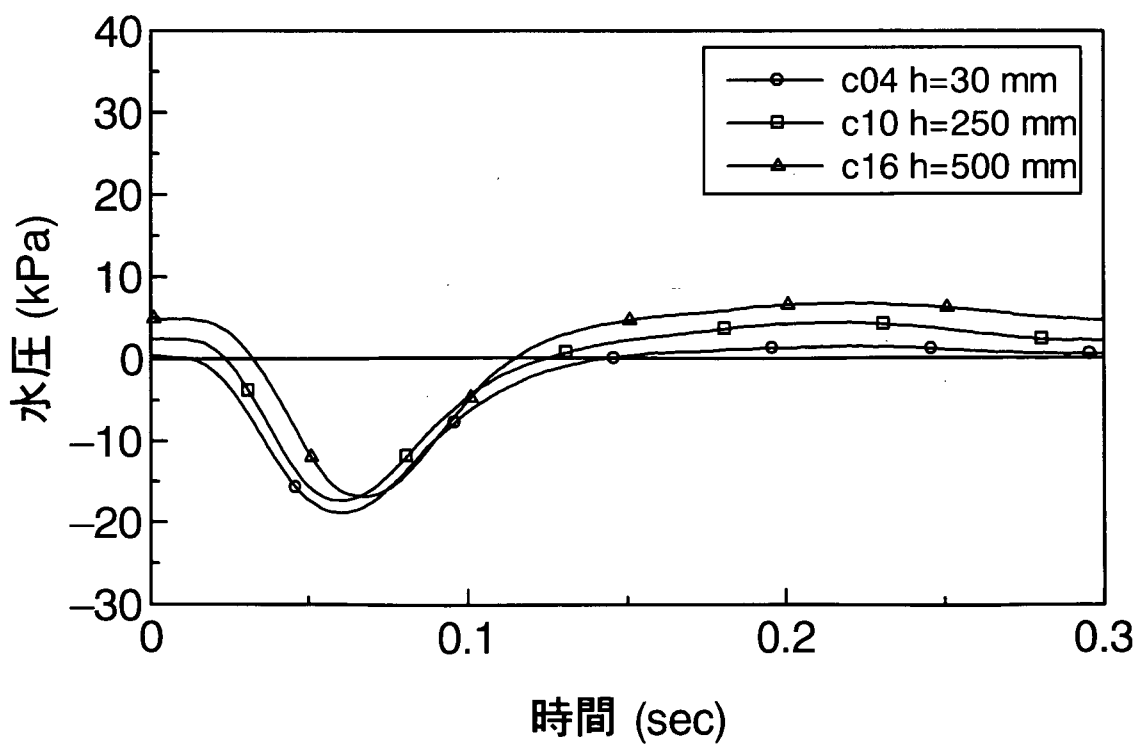


(b) W2

図-付 3.2.2-1 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤

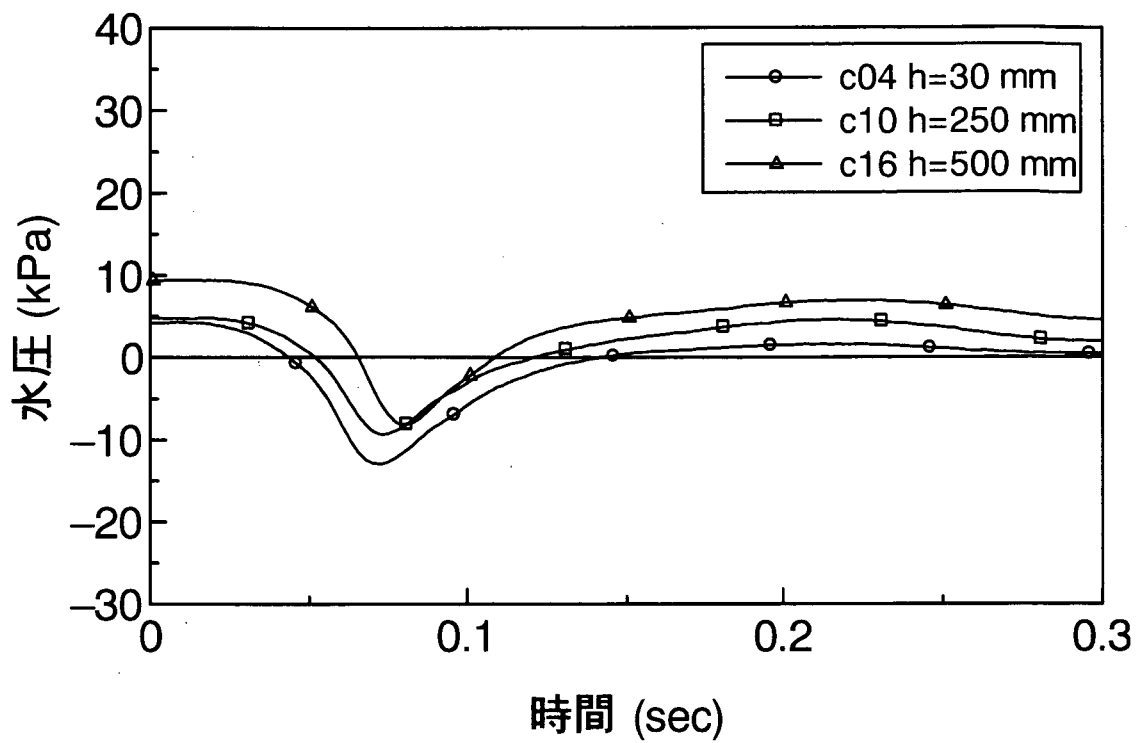


(c) W3

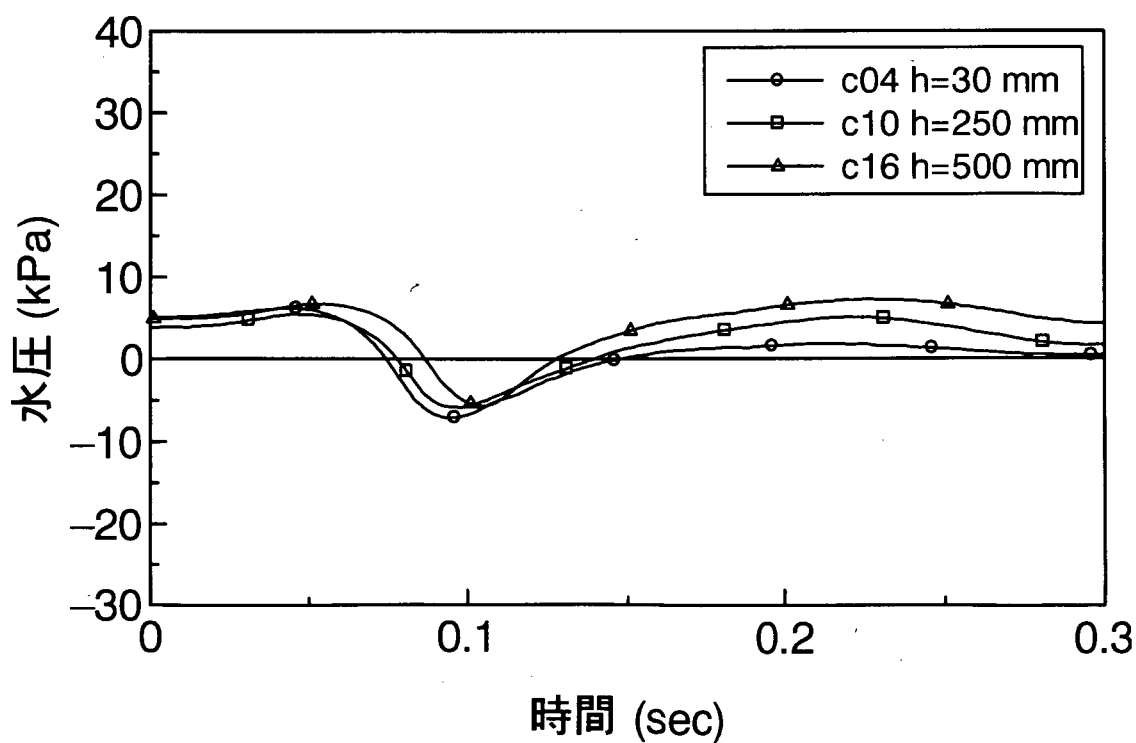


(d) W4

図-付 3.2.2-2 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤

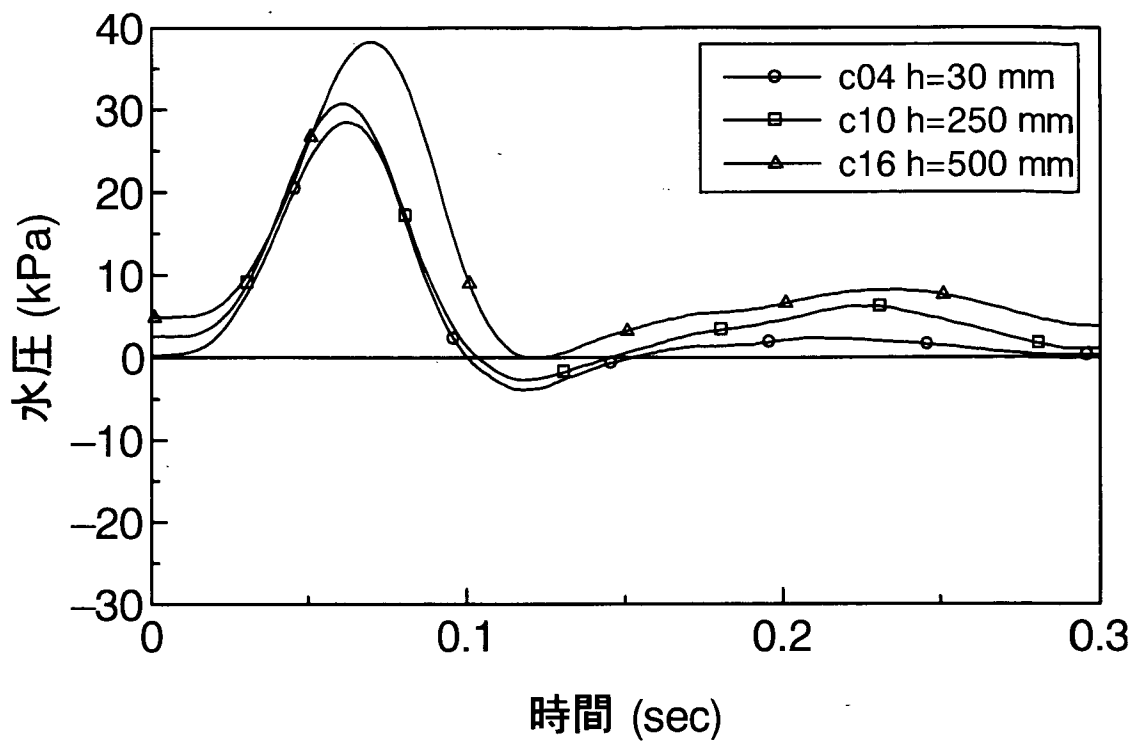


(e) W5



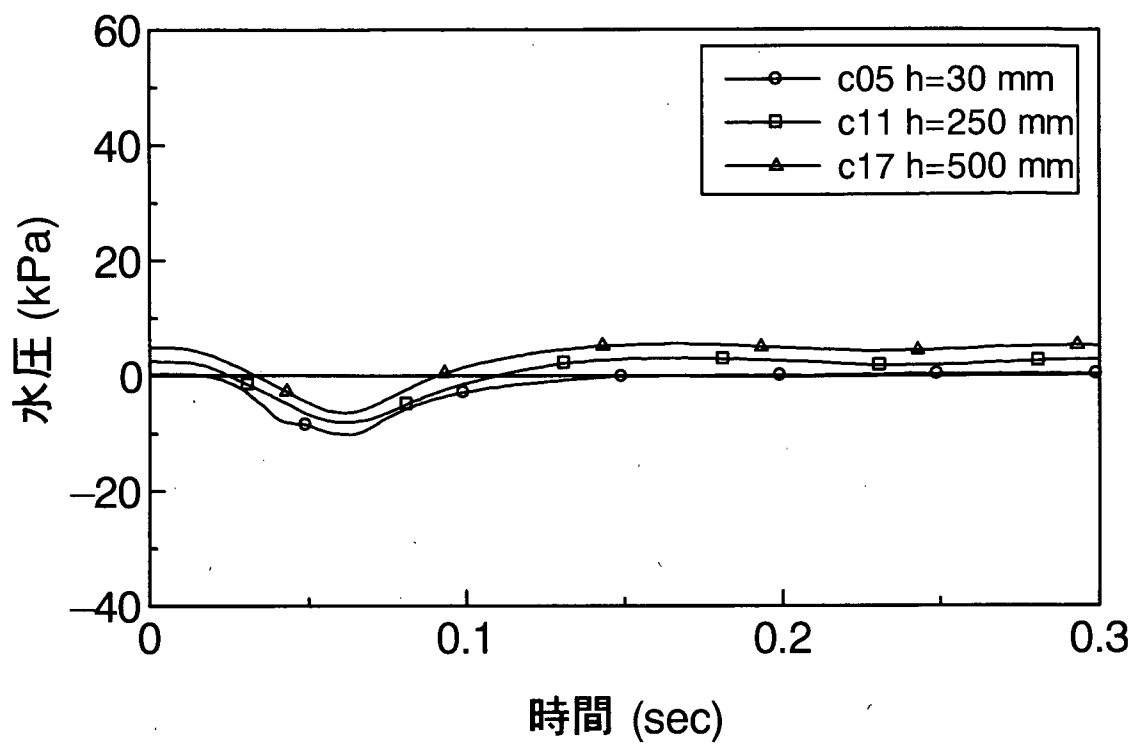
(f) W6

図-付 3.2.2-3 回転角速度 $\omega=0.15\text{rad/sec}$, 弾性地盤

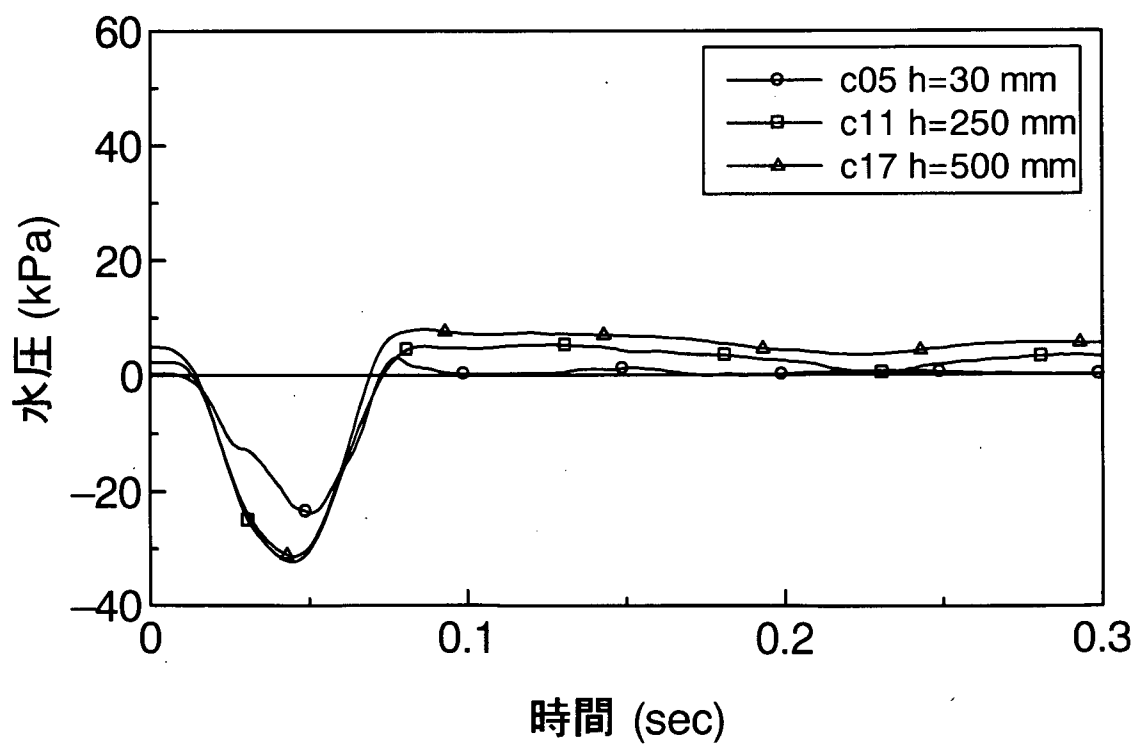


(g) W7

図-付 3.2.2-4 回転角速度 $\omega=0.15\text{rad/sec}$, 弾性地盤

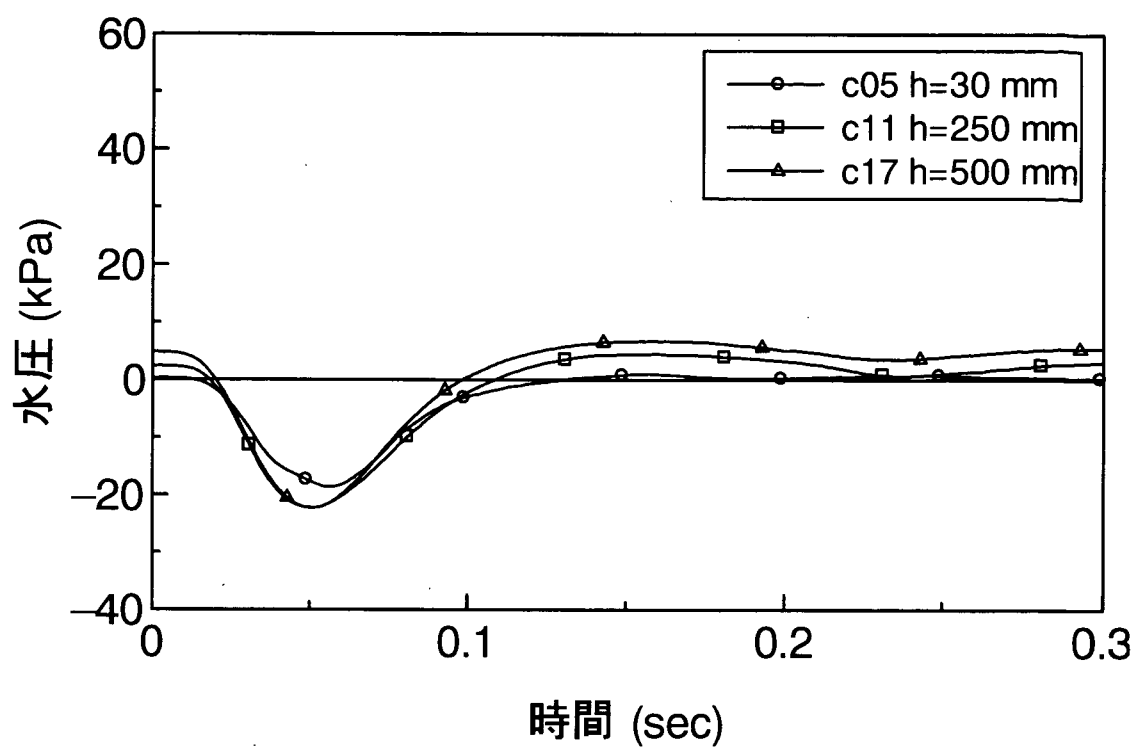


(a) W1

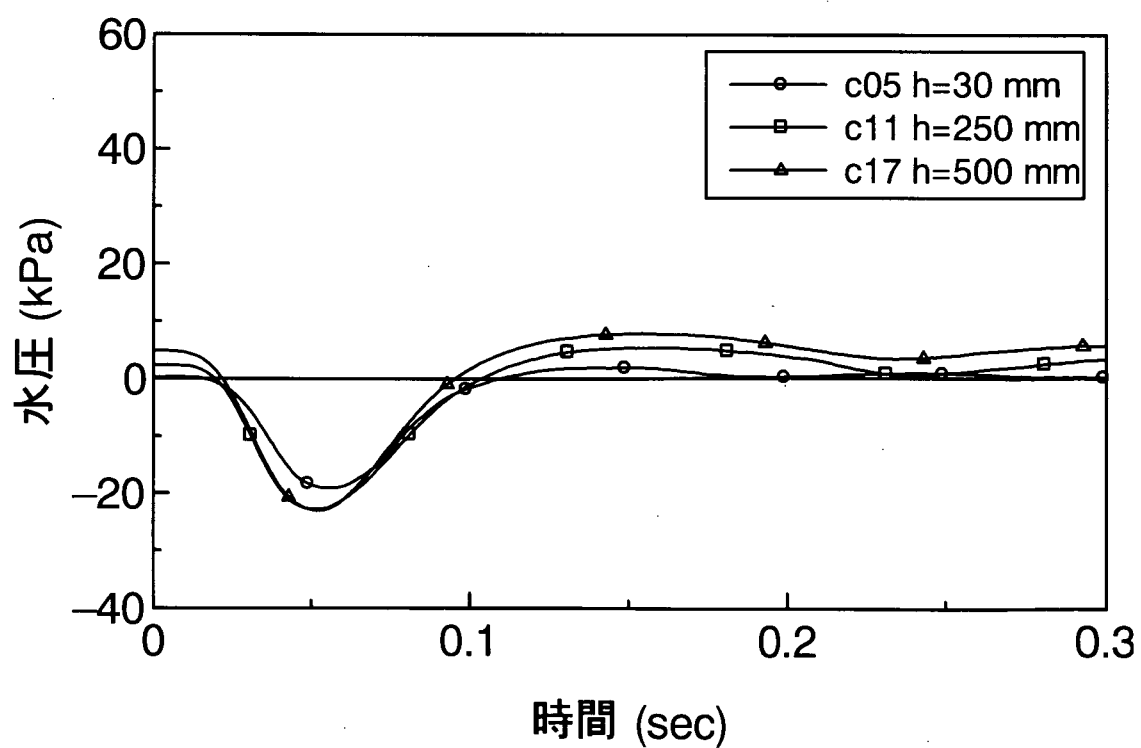


(b) W2

図-付 3.2.3-1 回転角速度 $\omega=0.2$ rad/sec, 弾性地盤

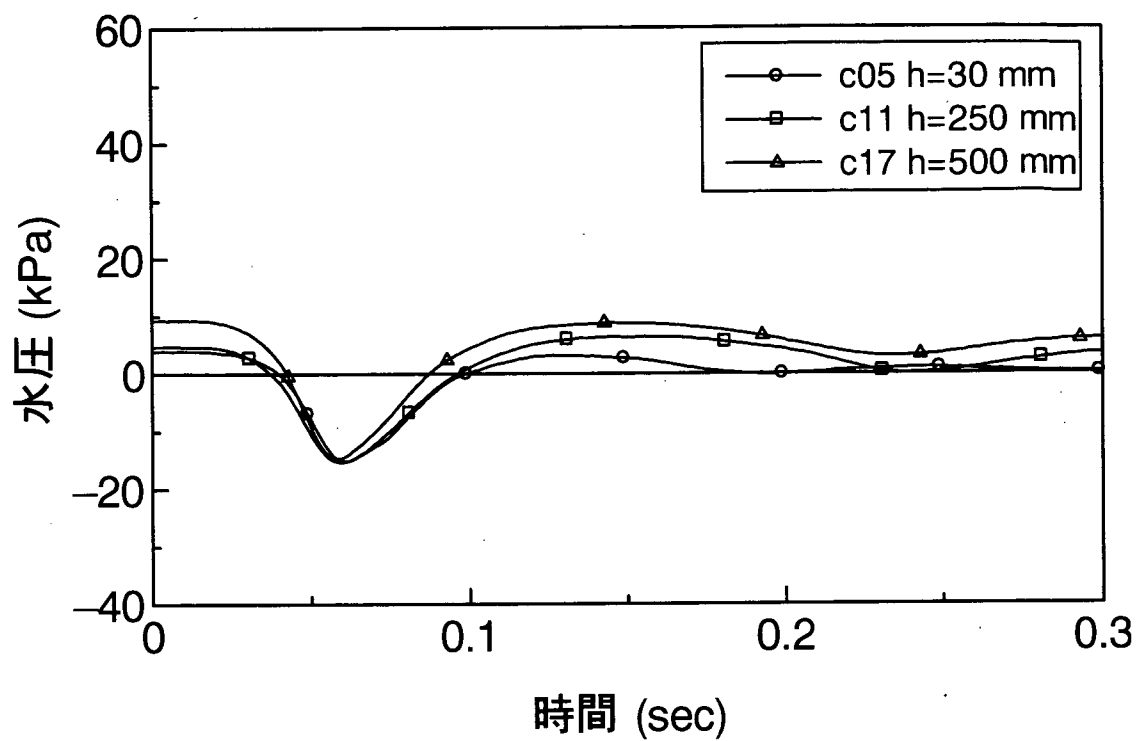


(c) W3

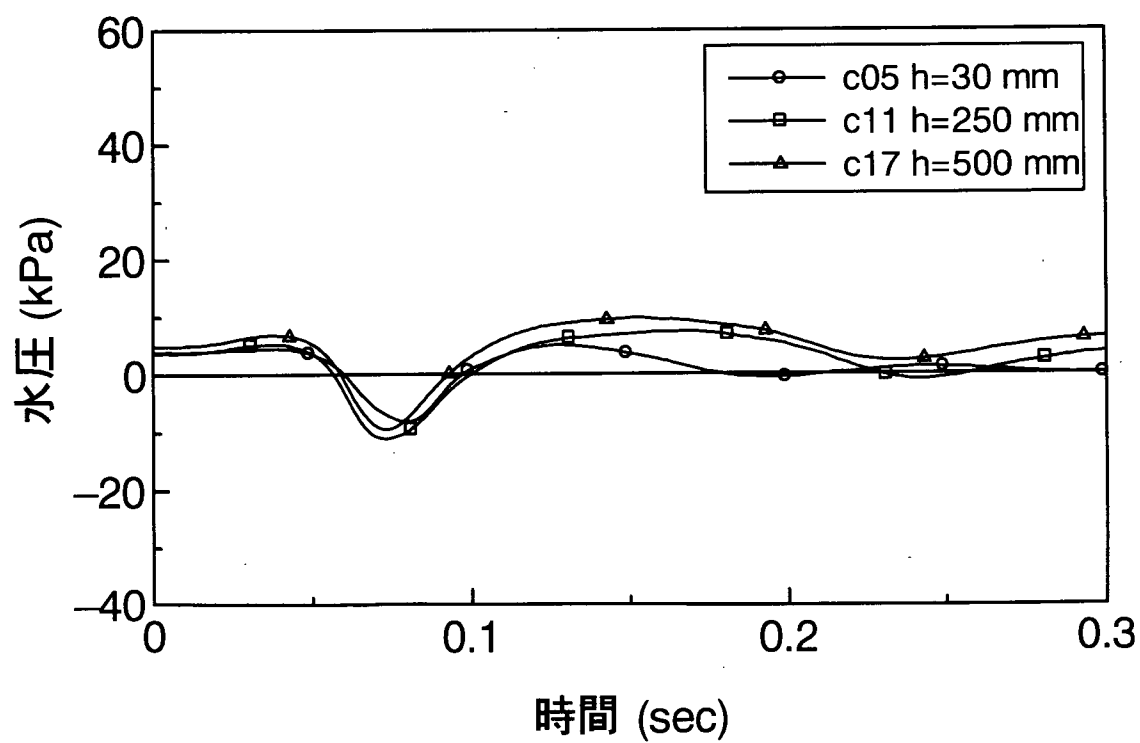


(d) W4

図-付 3.2.3-2 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤

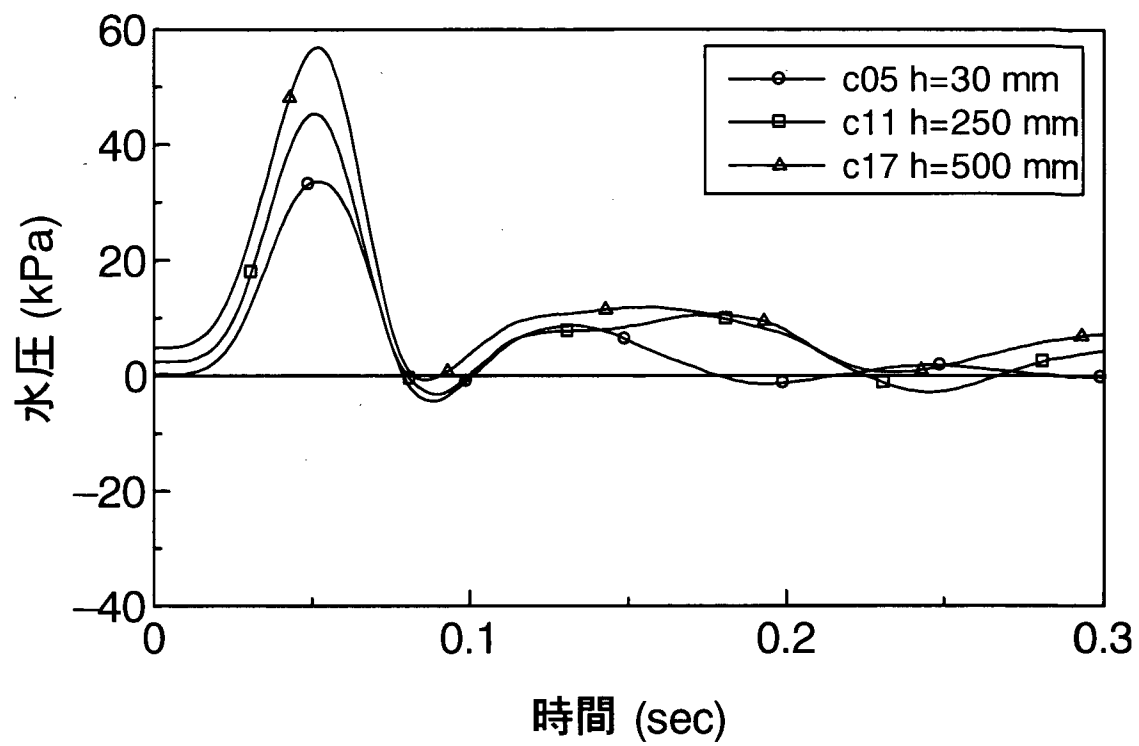


(e) W5



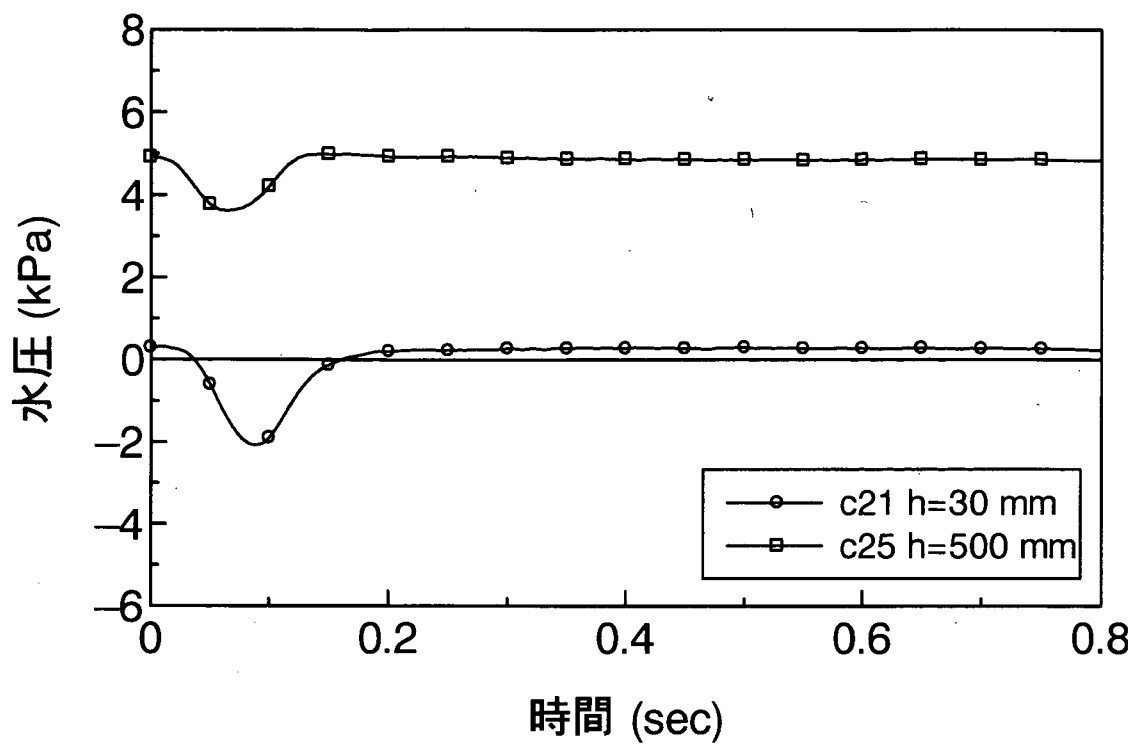
(f) W6

図-付 3.2.3-3 回転角速度 $\omega=0.2$ rad/sec, 弾性地盤

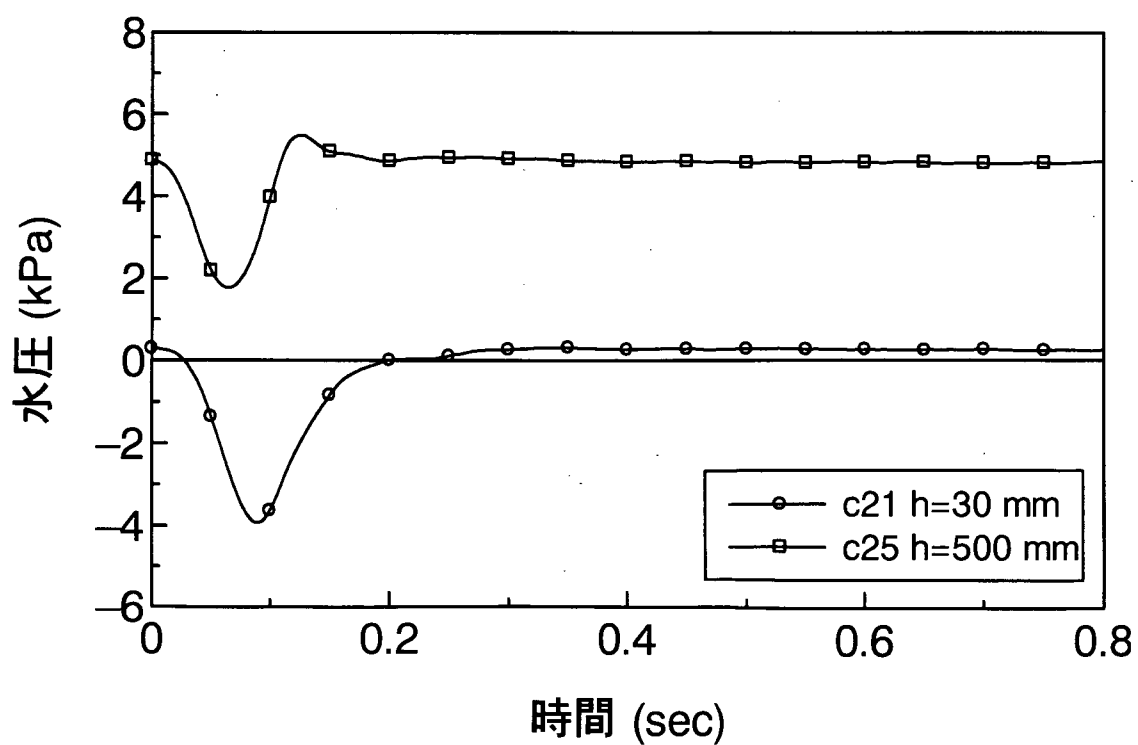


(g) W7

図-付 3.2.3-4 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤

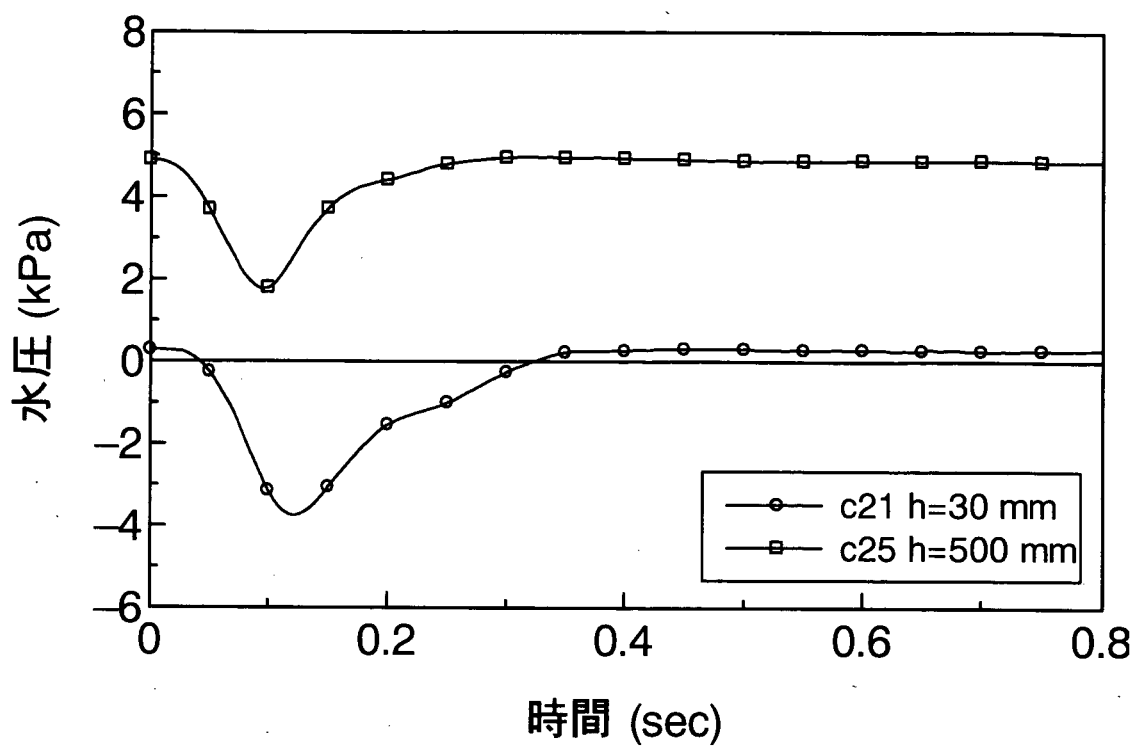


(a) W1

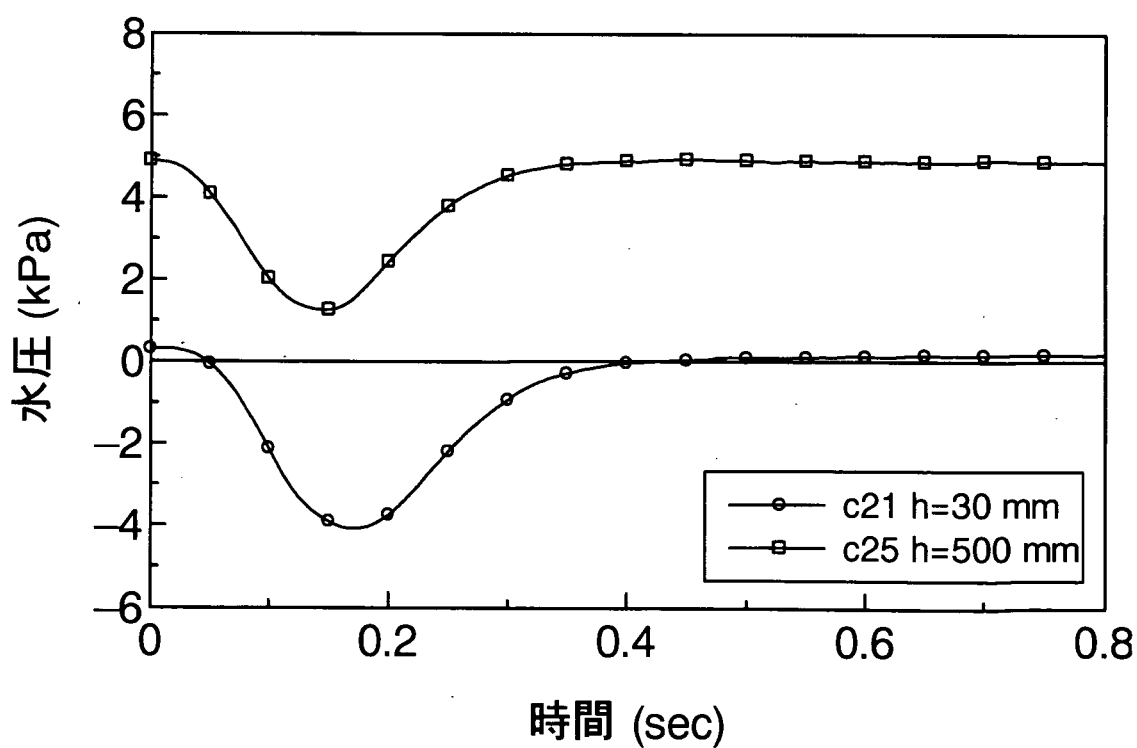


(b) W2

図-付 3.2.4-1 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

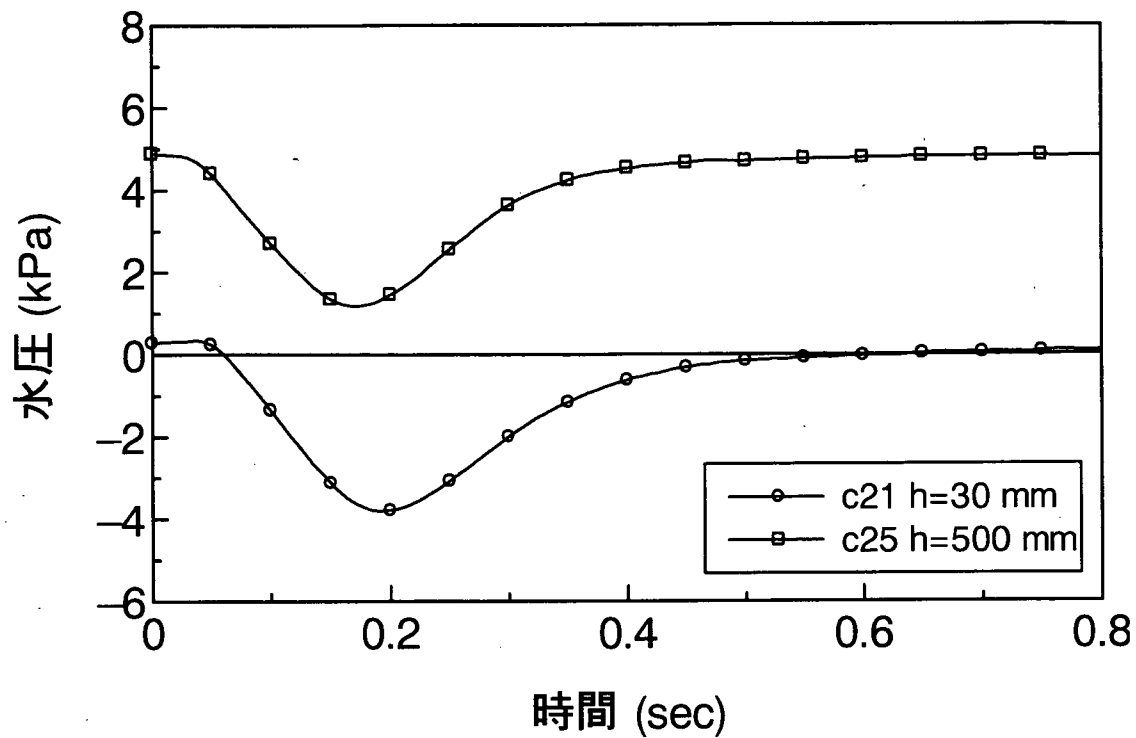


(c) W3

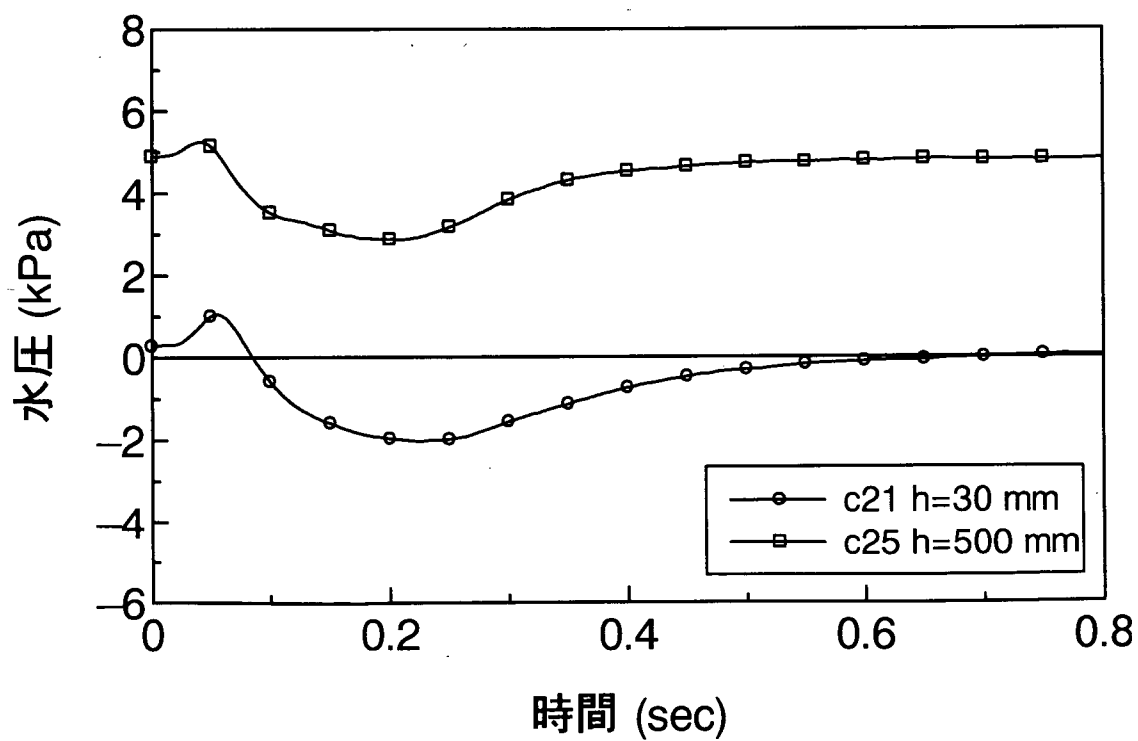


(d) W4

図-付 3.2.4-2 回転角速度 $\omega=0.2 \text{ rad/sec}$, 砂地盤

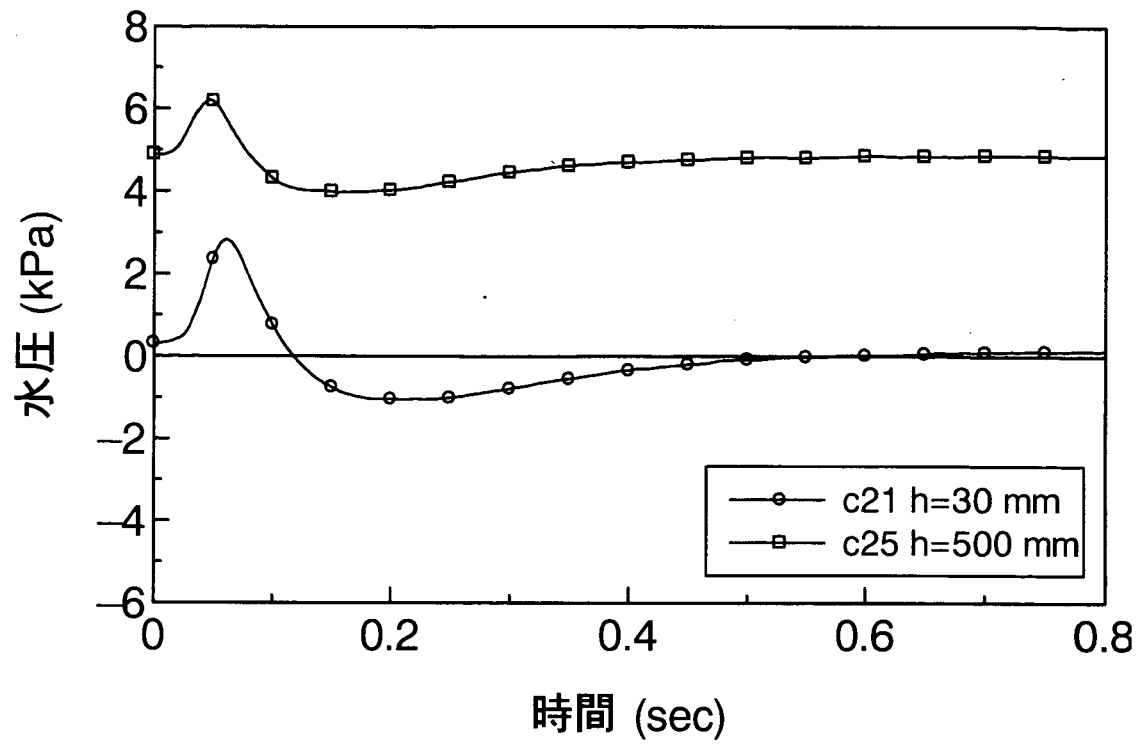


(e) W5



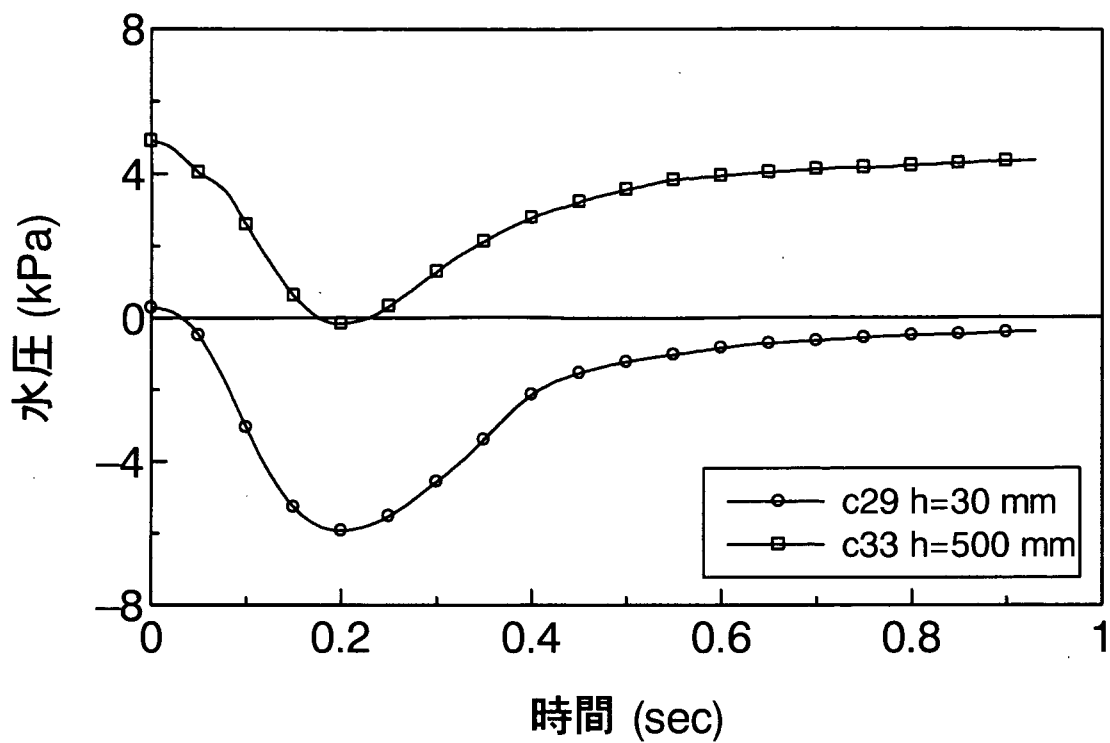
(f) W6

図一付 3.2.4-3 回転角速度 $\omega=0.2 \text{ rad/sec}$, 砂地盤

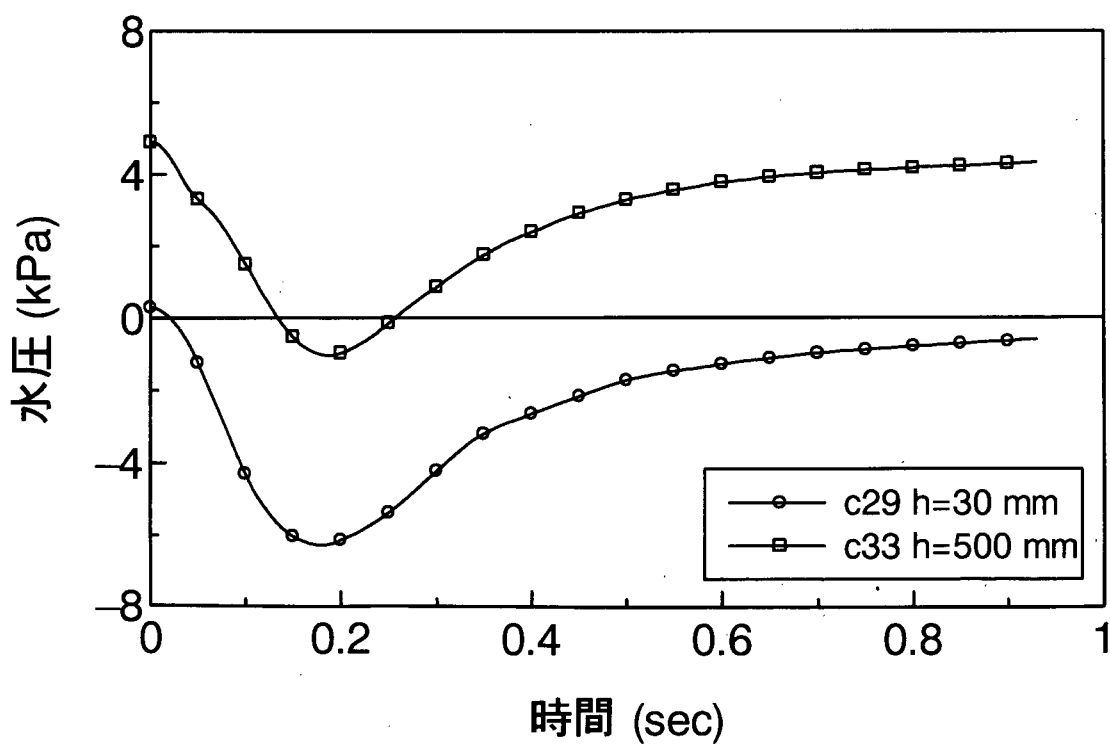


(g) W7

図一付 3.2.4-4 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

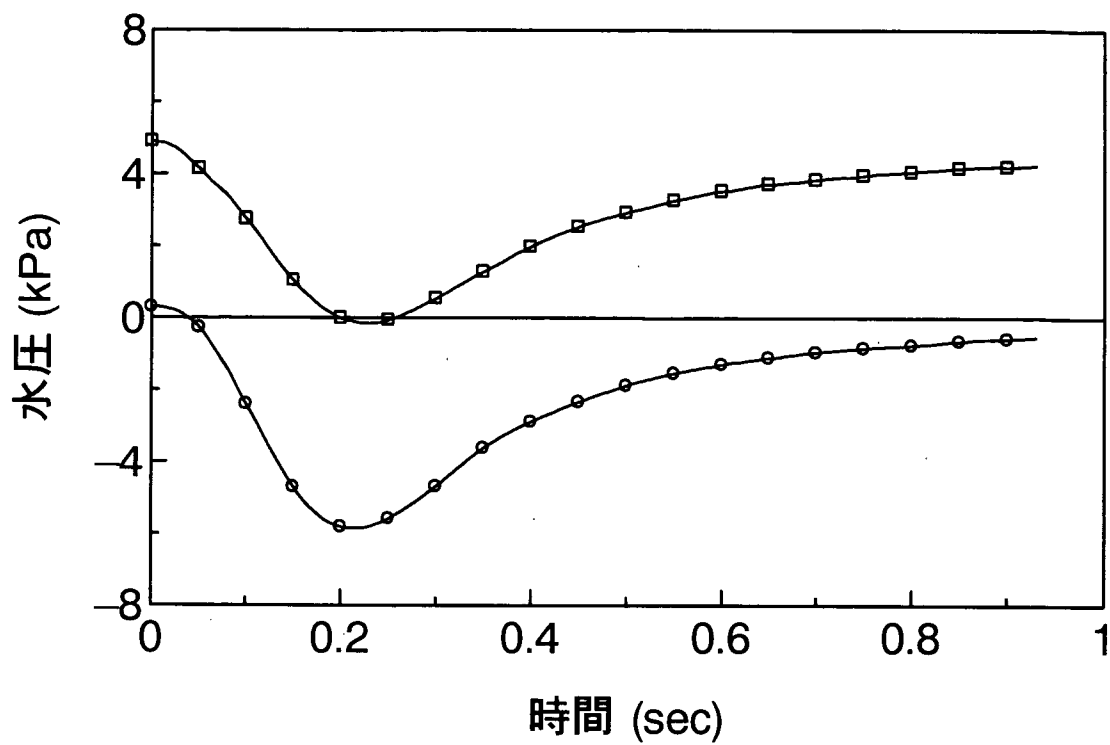


(a) W1

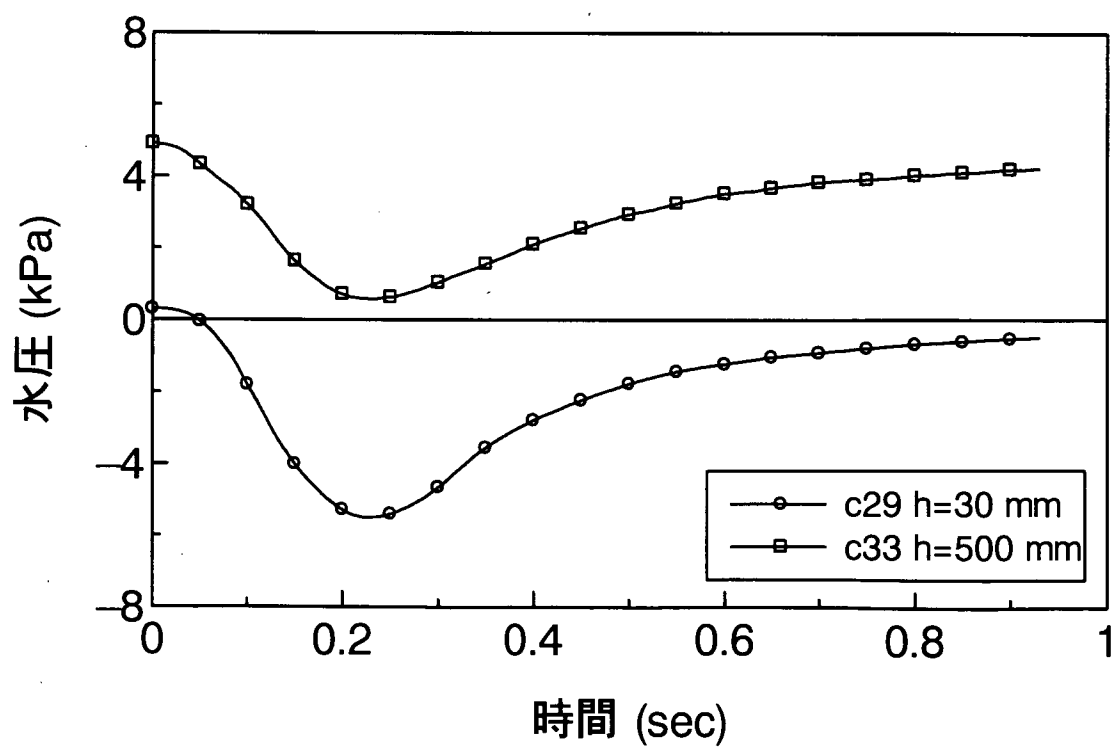


(b) W2

図-付 3.2.5-1 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

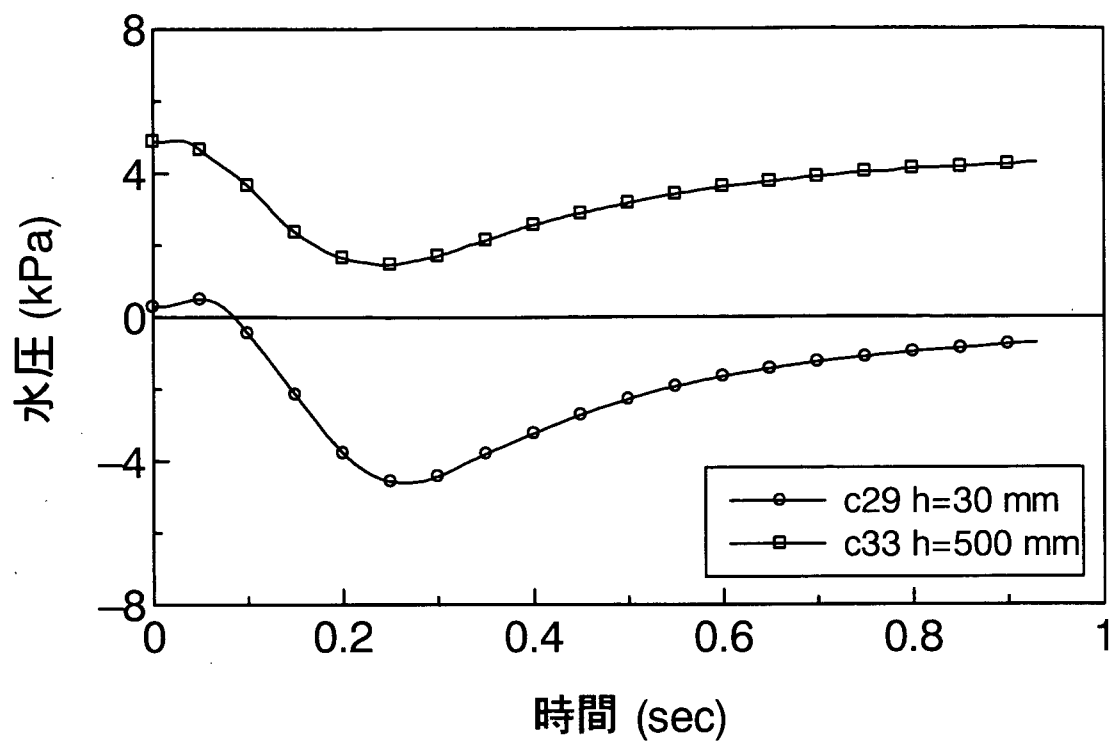


(c) W3

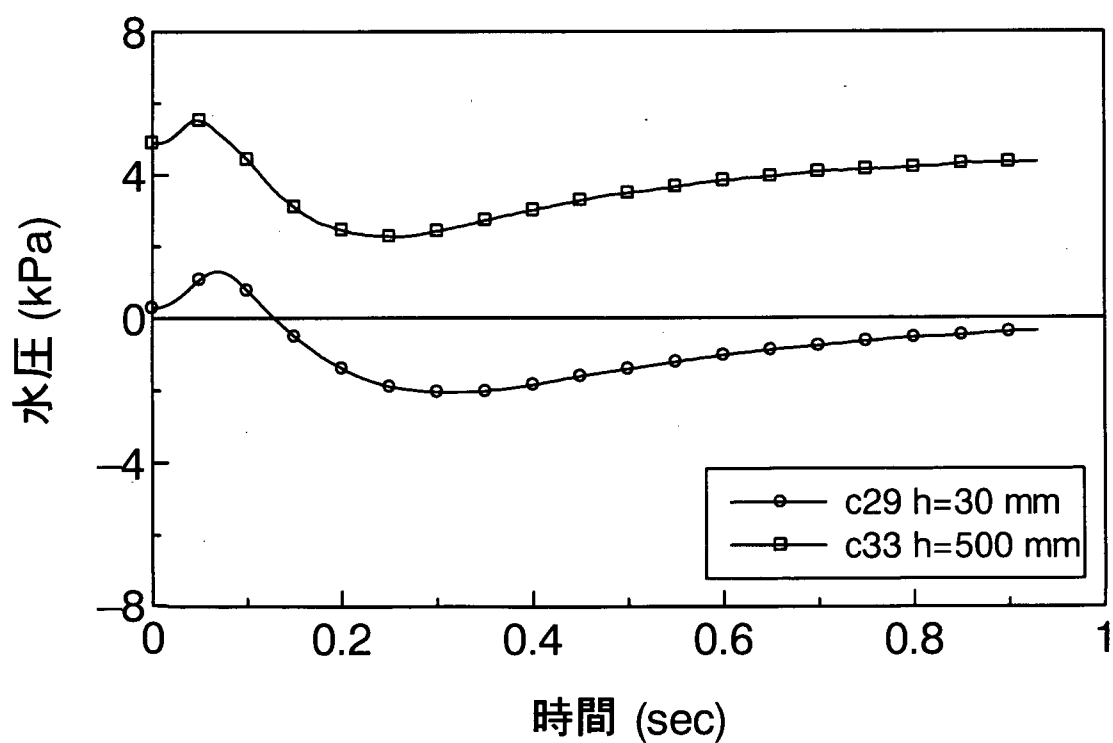


(d) W4

図-付 3.2.5-2 回転角速度 $\omega = 0.2 \text{ rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

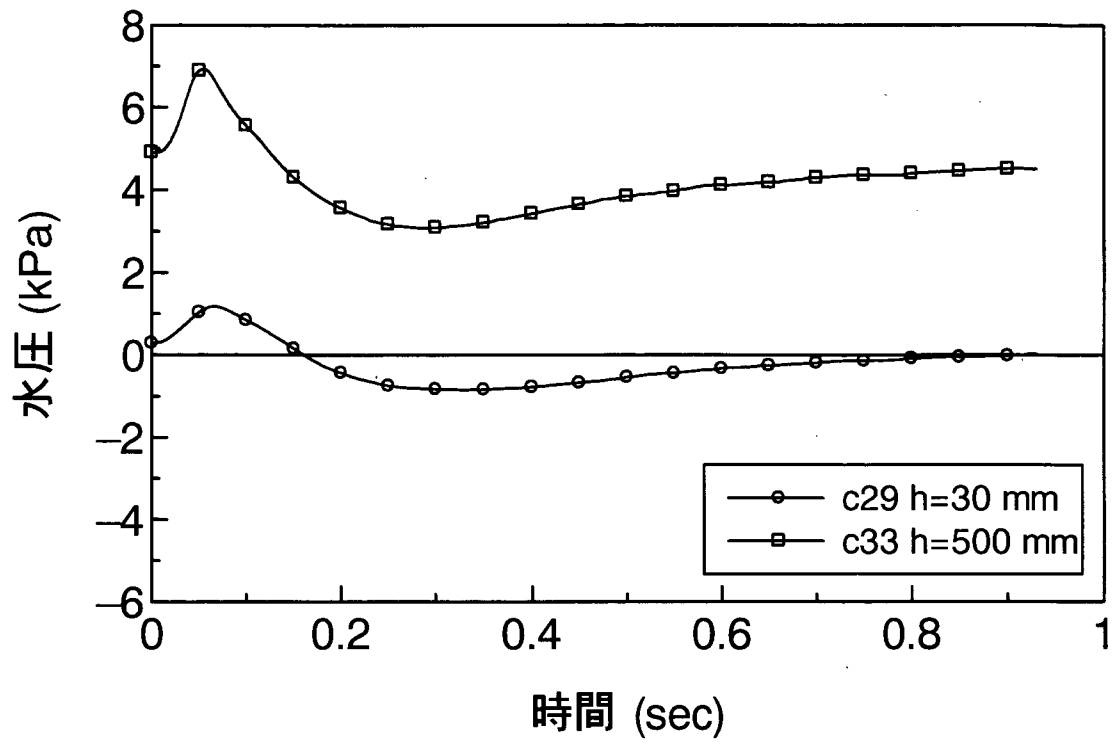


(e) W5



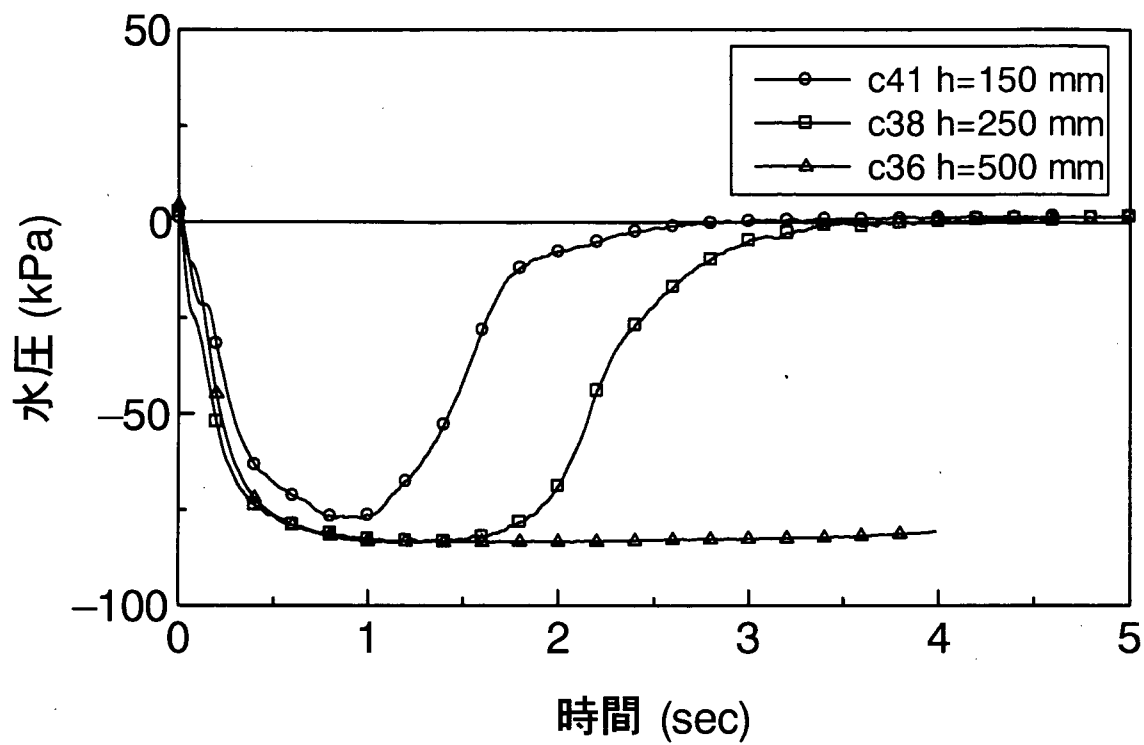
(f) W6

図-付 3.2.5-3 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

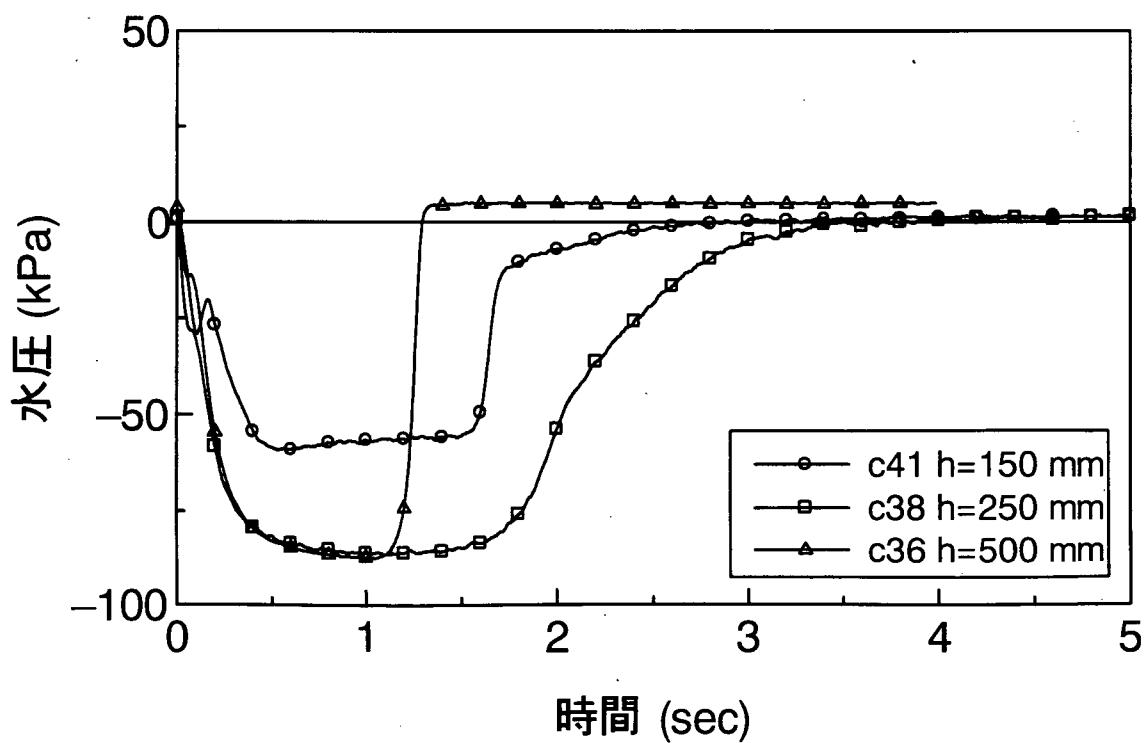


(g) W7

図一付 3.2.5-4 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

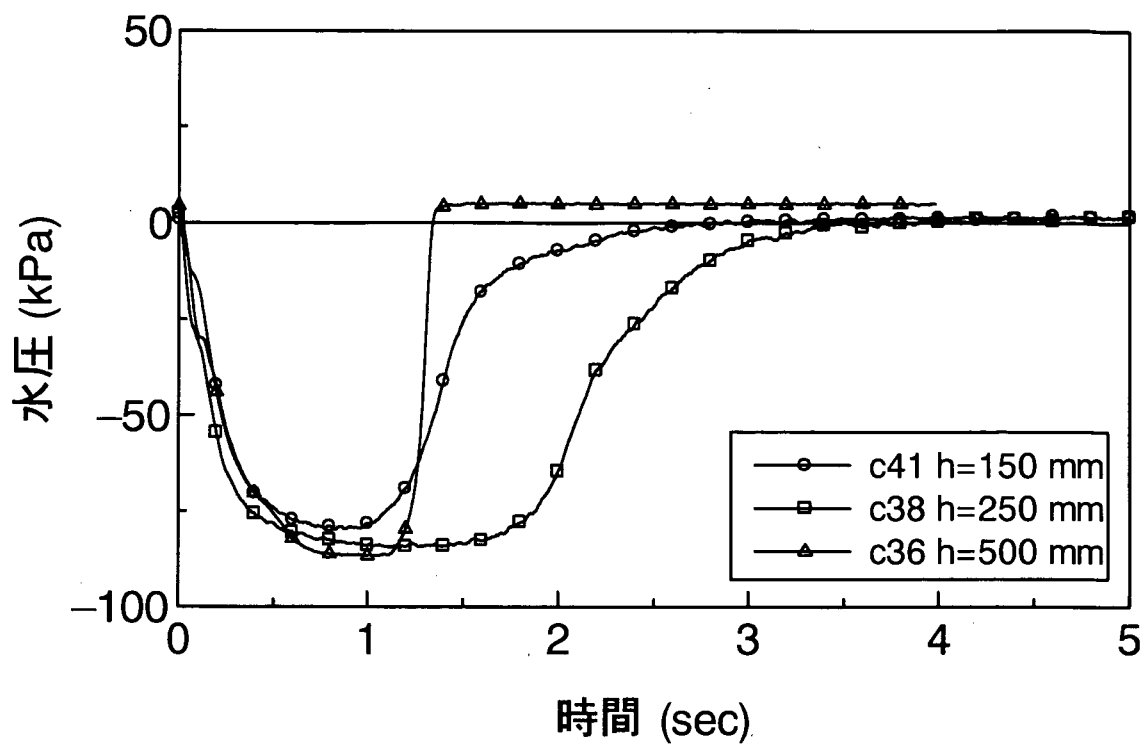


(a) W1

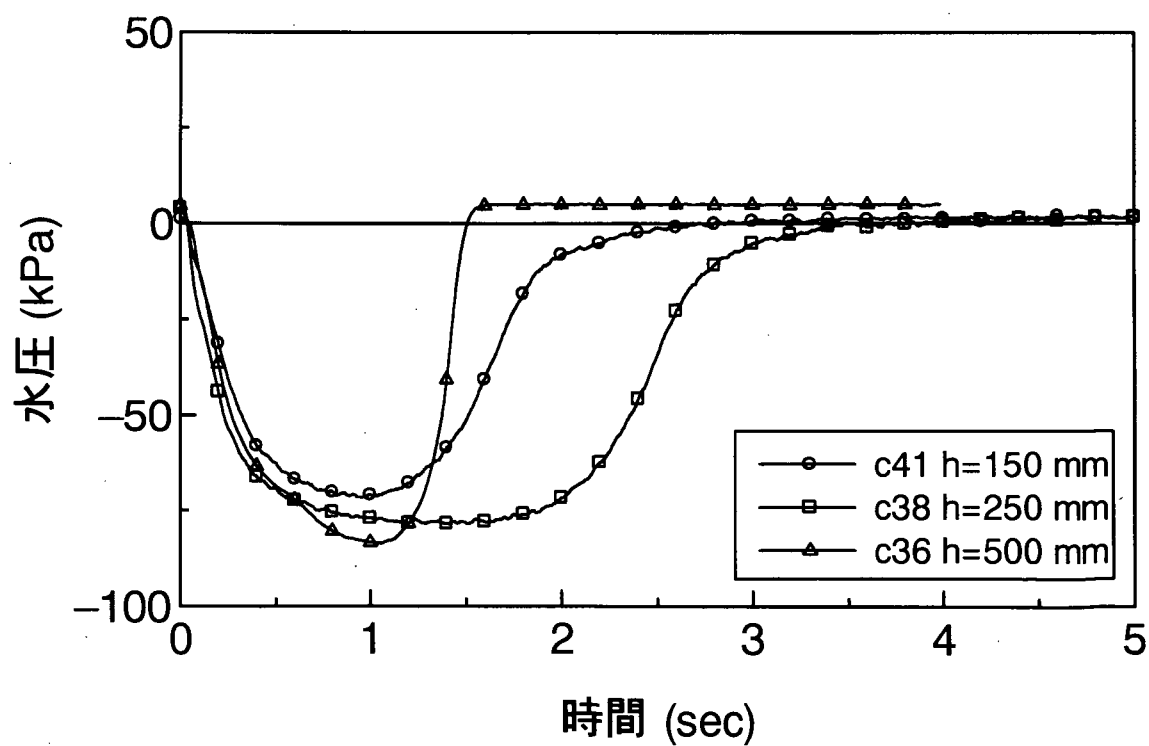


(b) W2

図-付 3.2.6-1 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

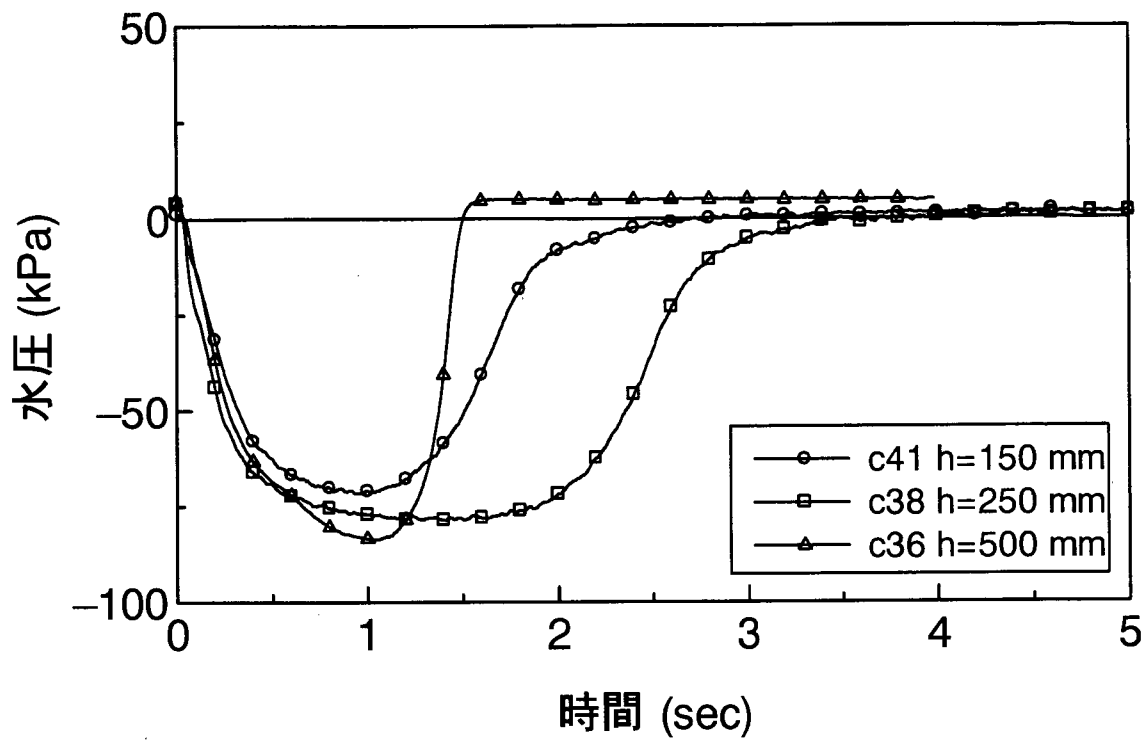


(c) W3

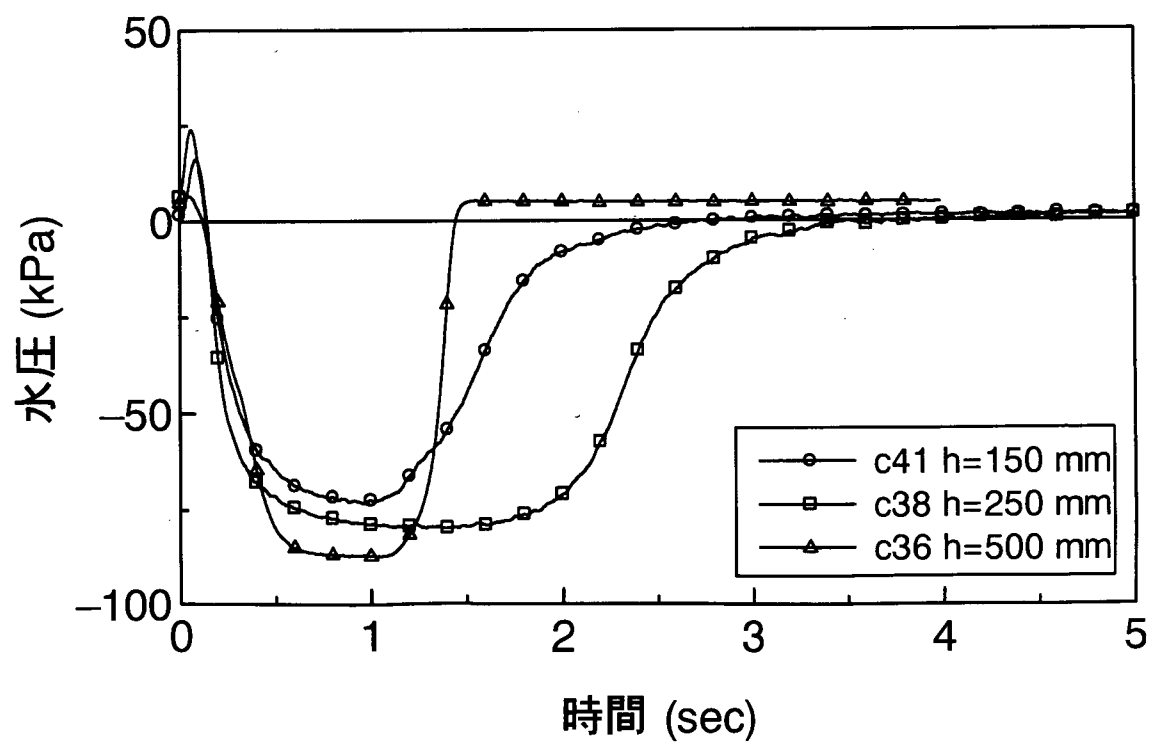


(d) W4

図-付 3.2.6-2 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



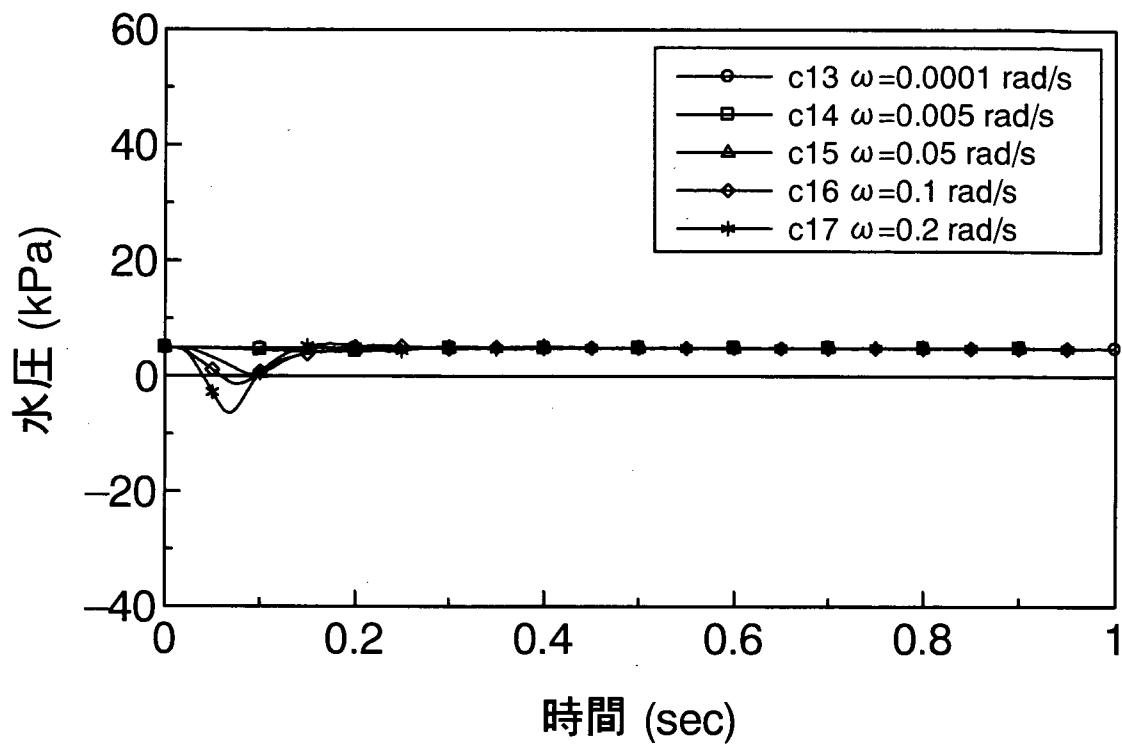
(e) W5



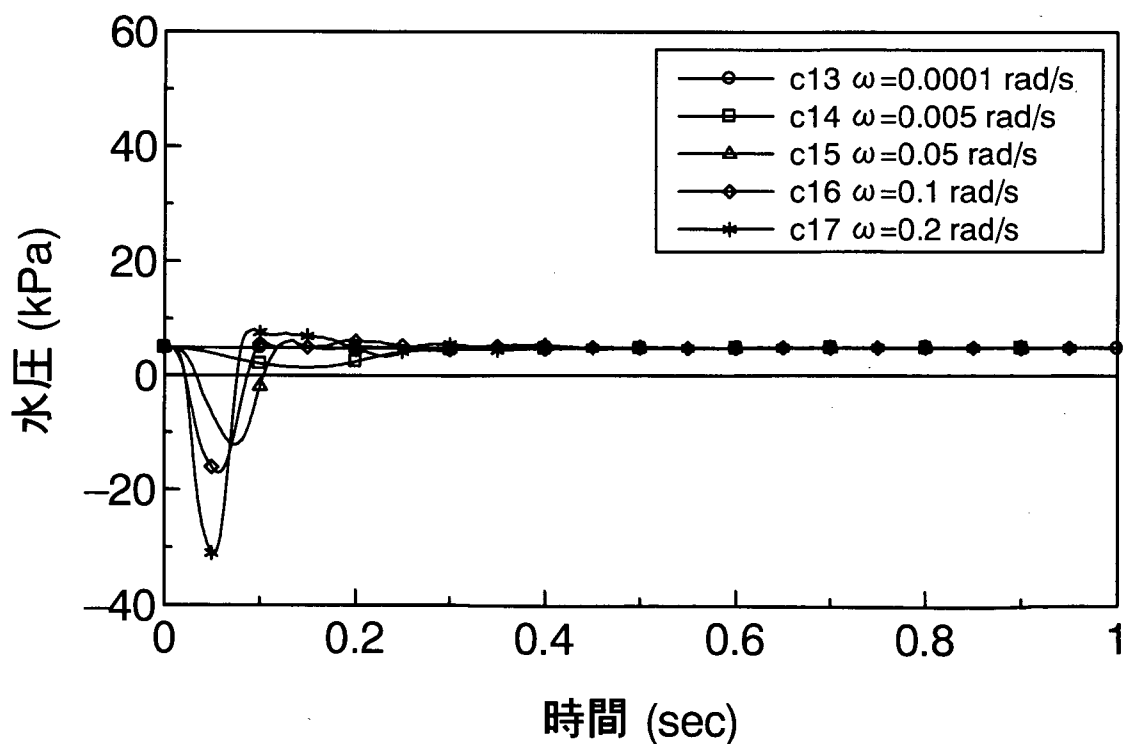
(f) W6

図-付 3.2.6-3 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

3.3 回転角速度の影響

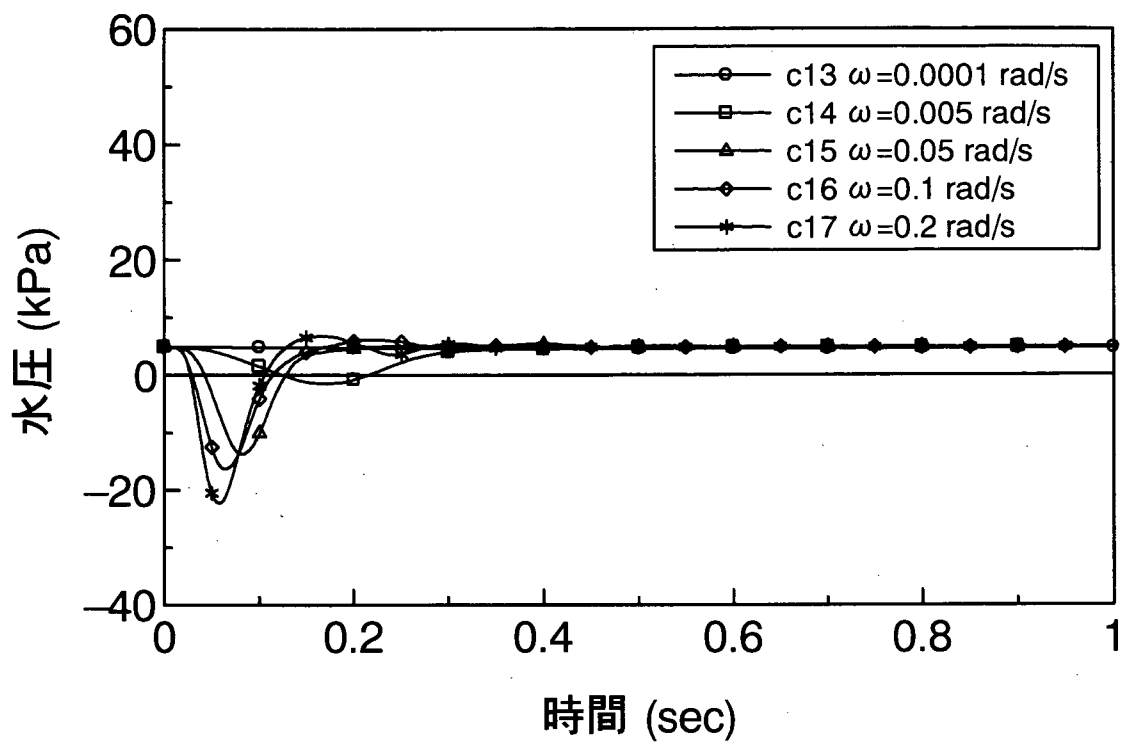


(a) W1

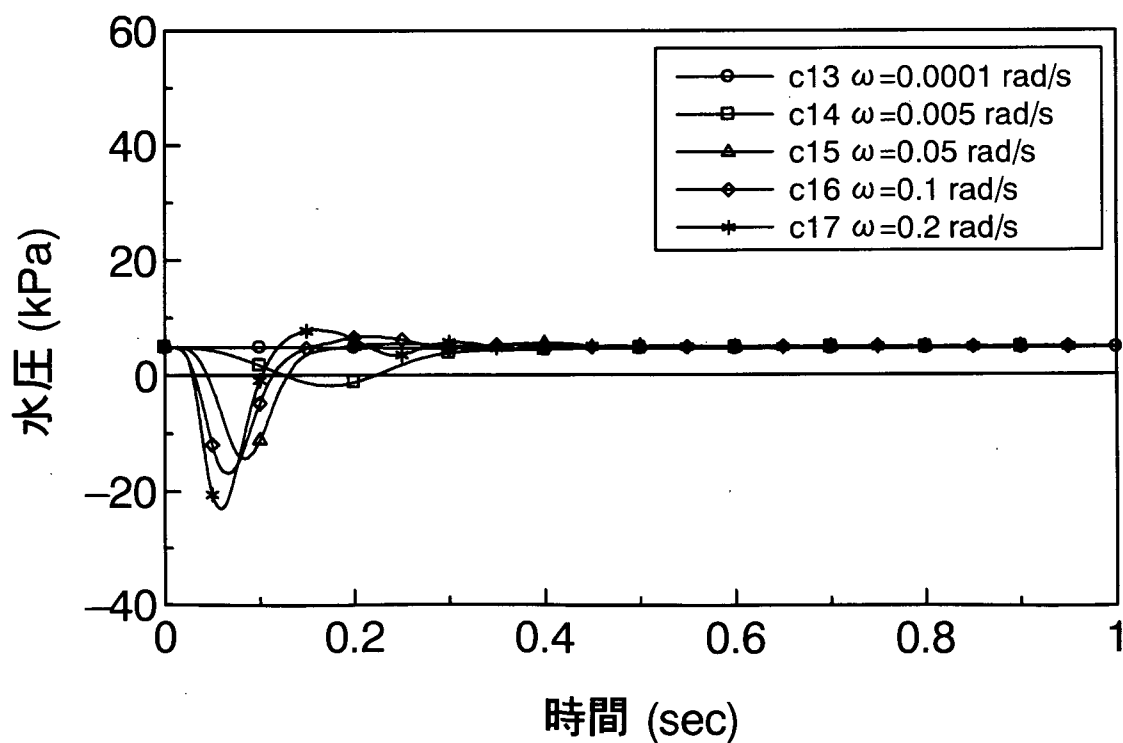


(b) W2

図-付 3.3.1-1 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤

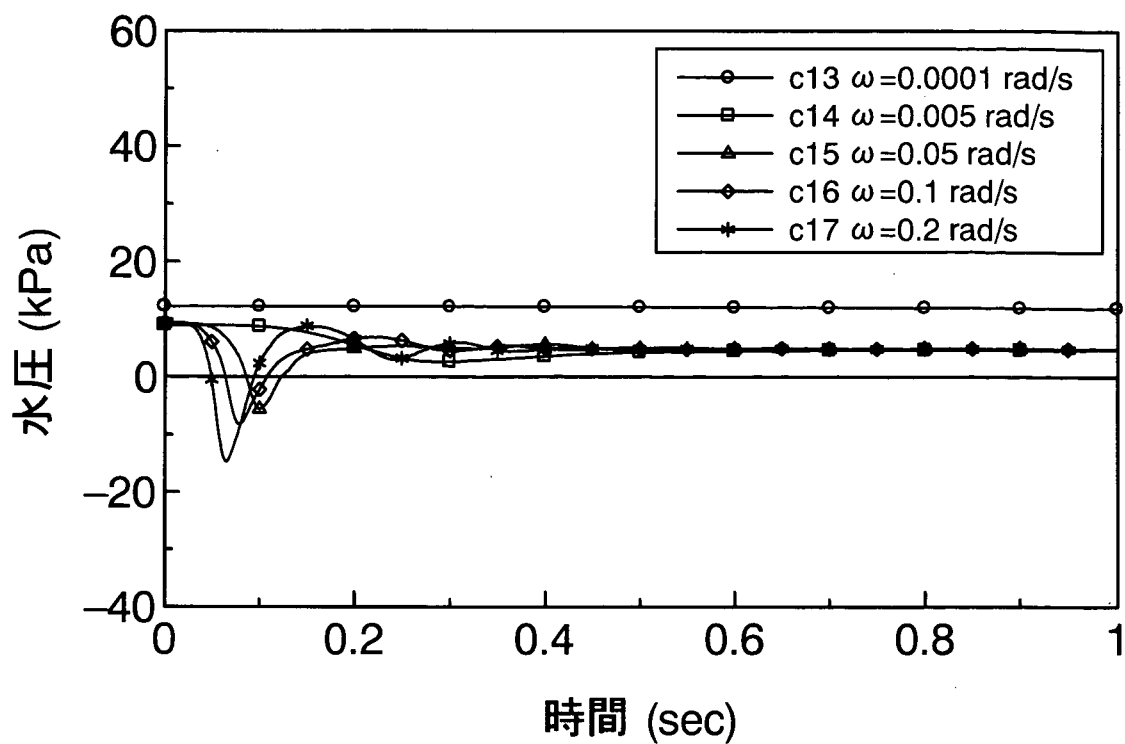


(c) W3

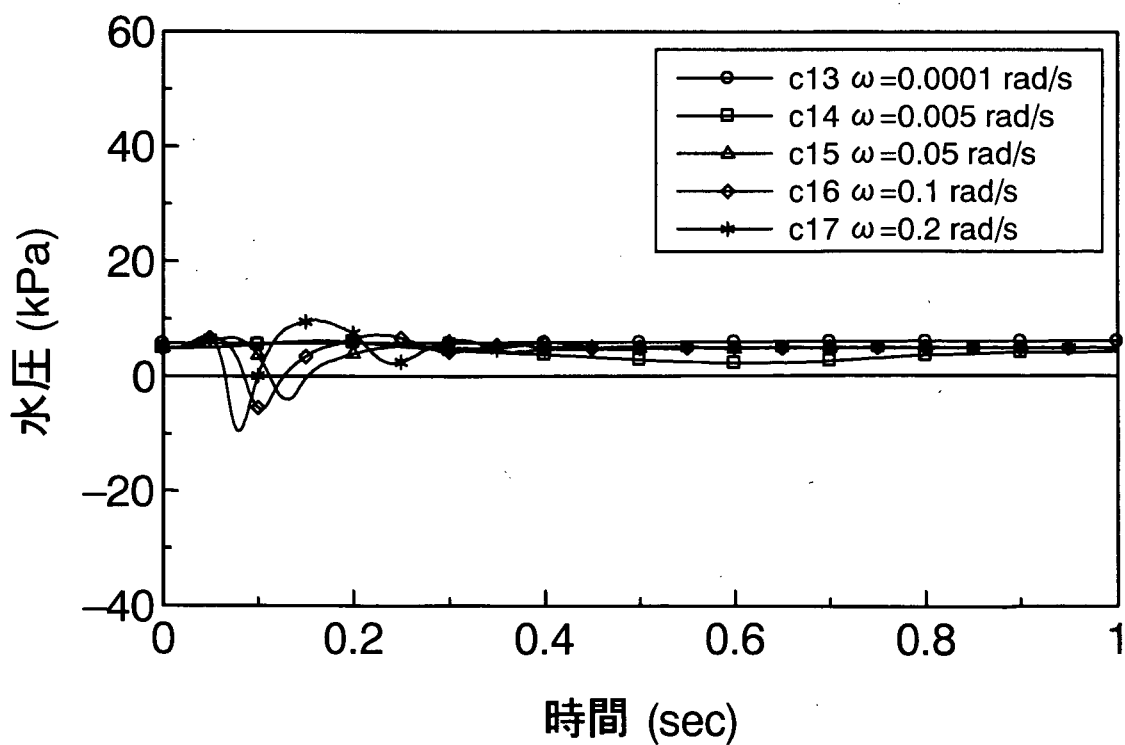


(d) W4

図-付 3.3.1-2 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤

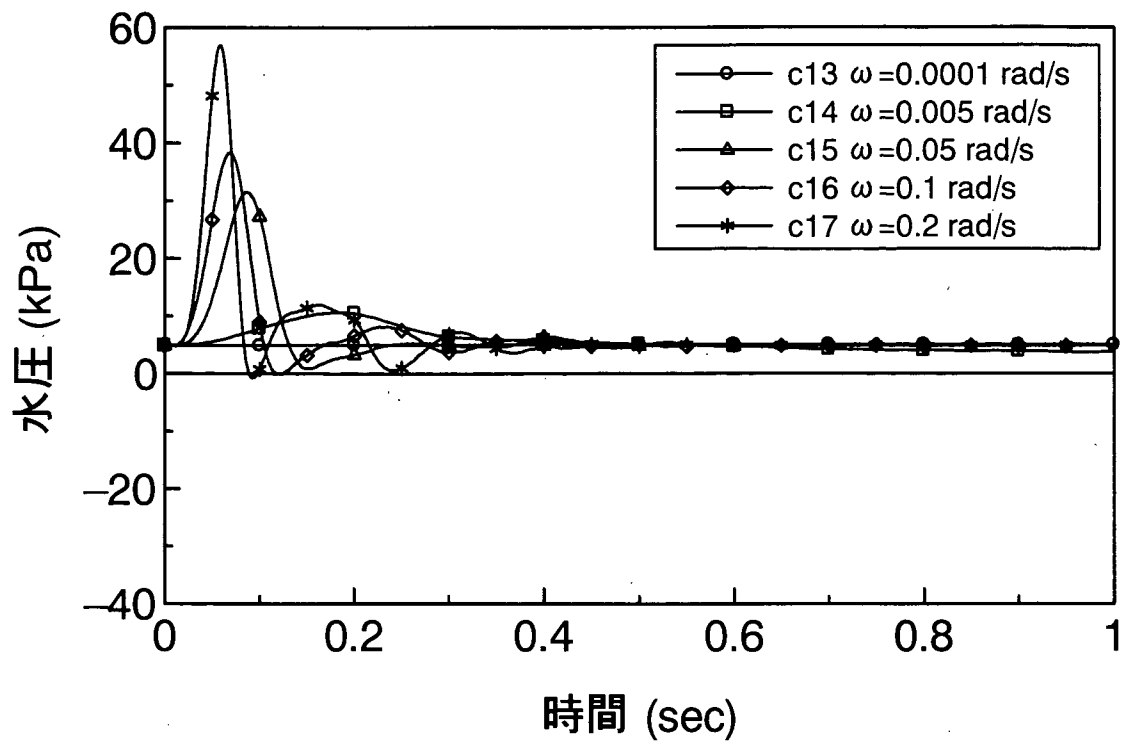


(e) W5



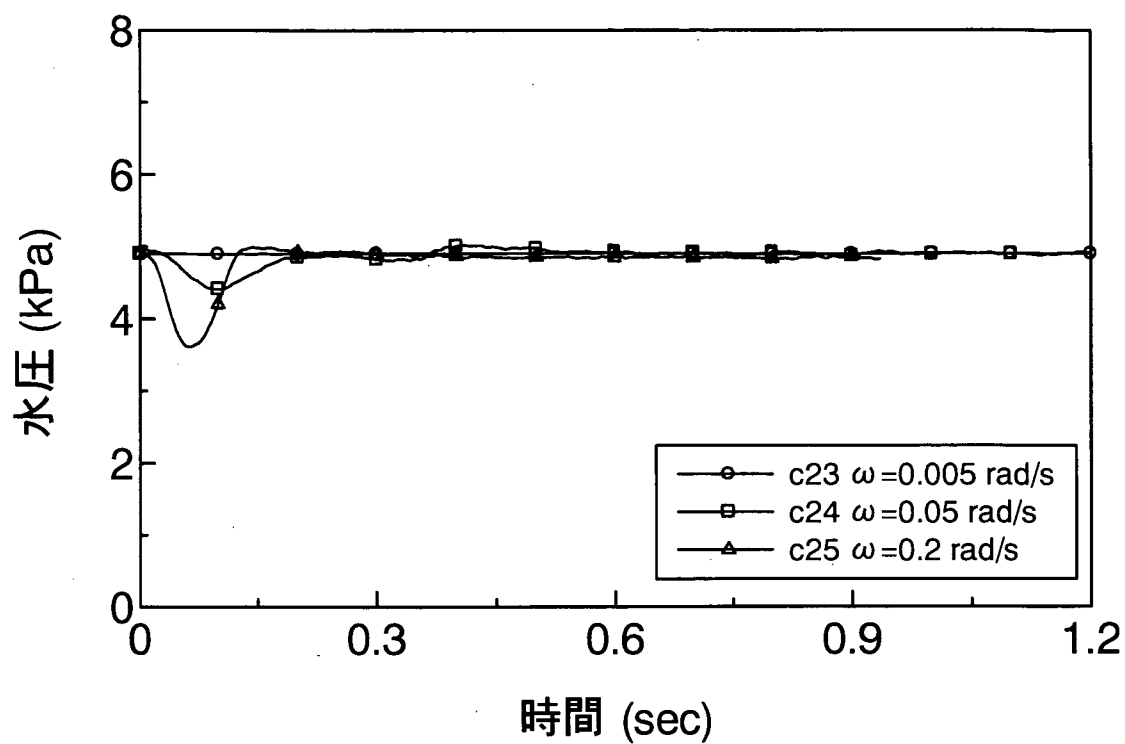
(f) W6

図-付 3.3.1-3 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

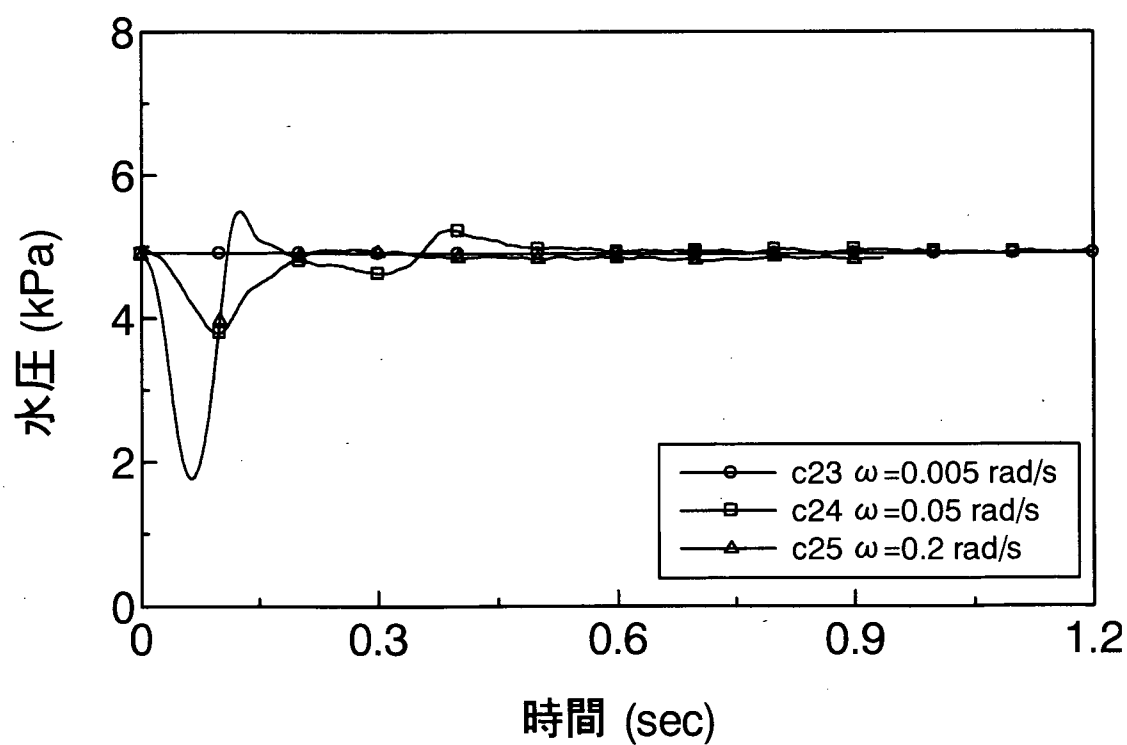


(g) W7

図一付 3.3.1-4 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤

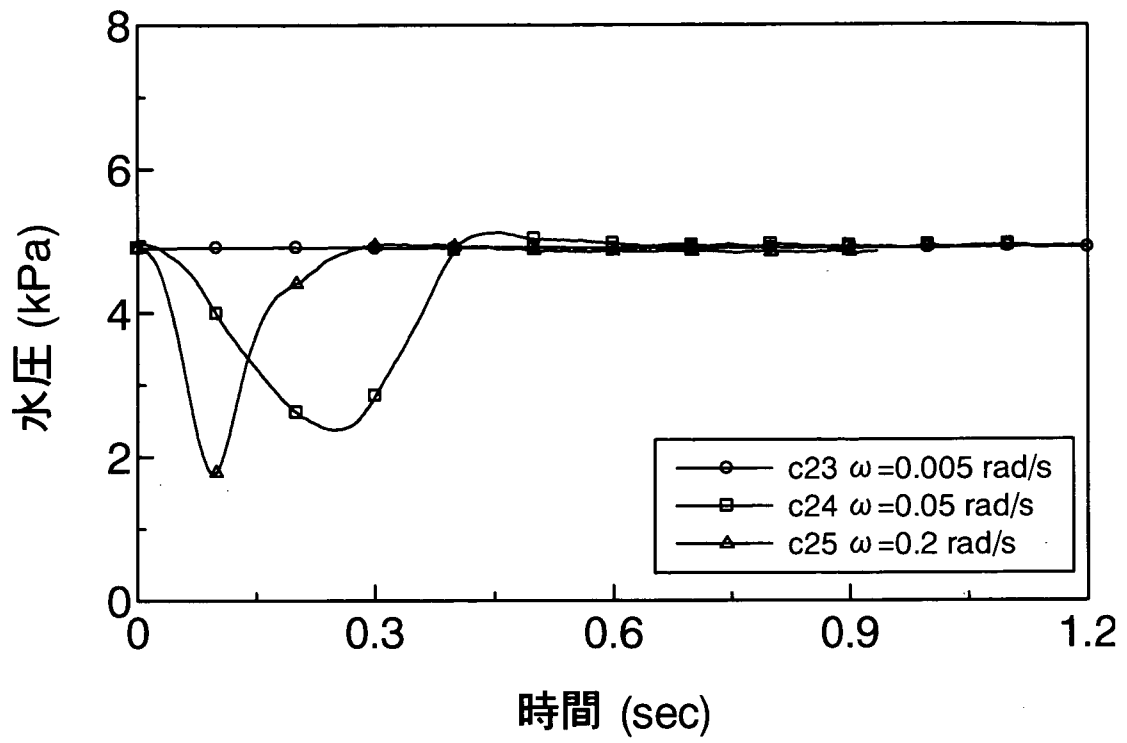


(a) W1

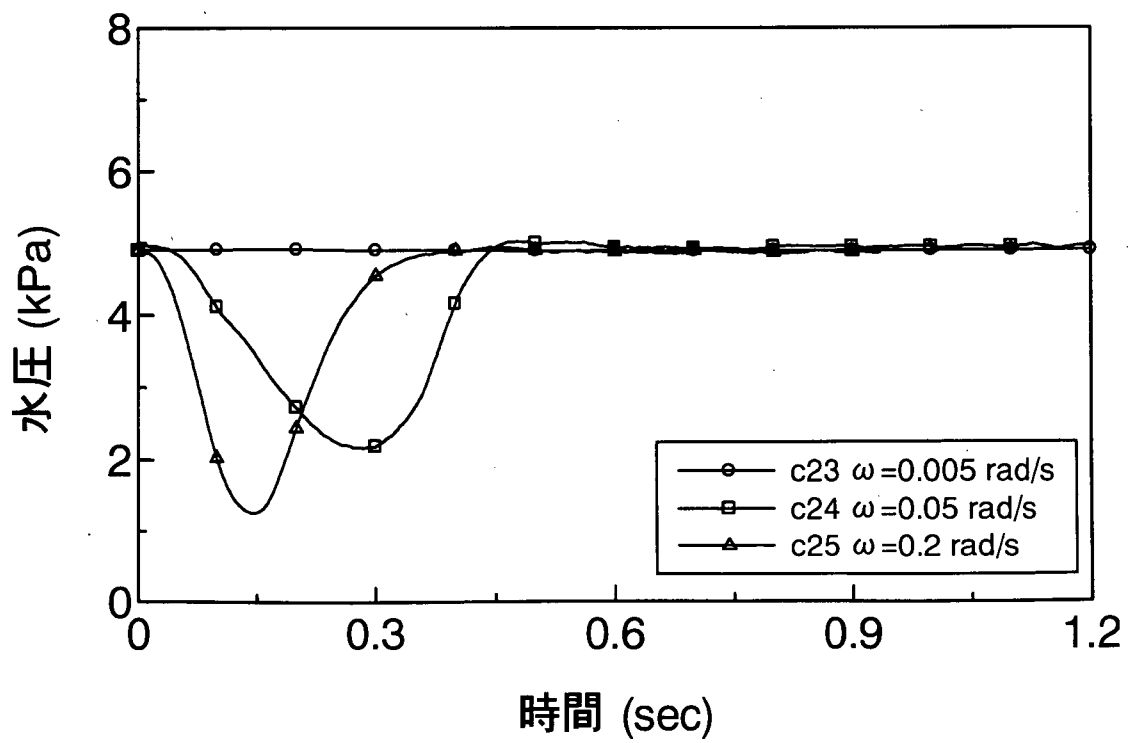


(b) W2

図-付 3.3.2-1 水深 $h=500$ mm, 砂地盤

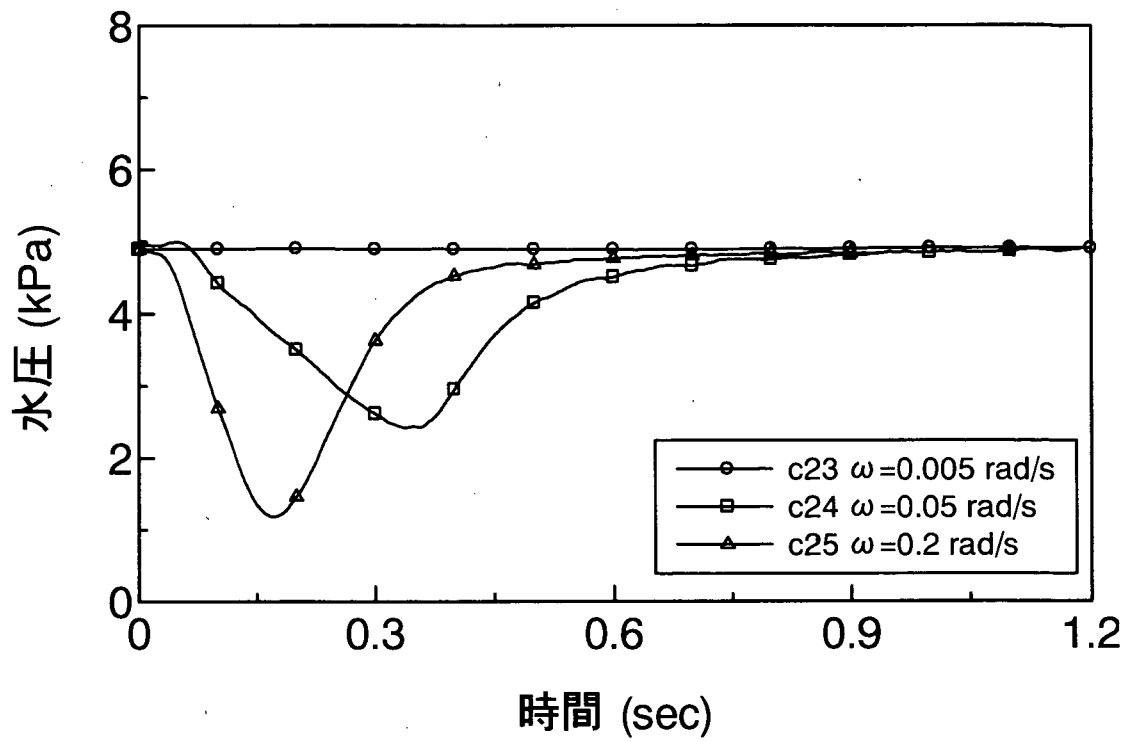


(c) W3

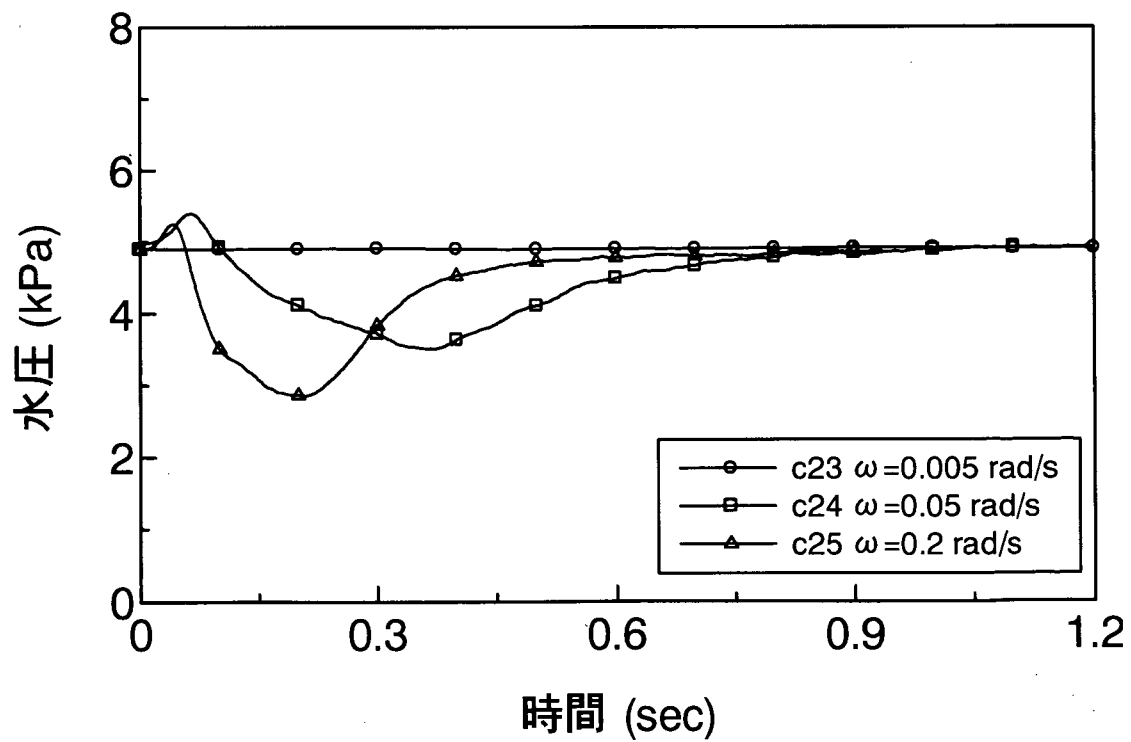


(d) W4

図-付 3.3.2-2 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

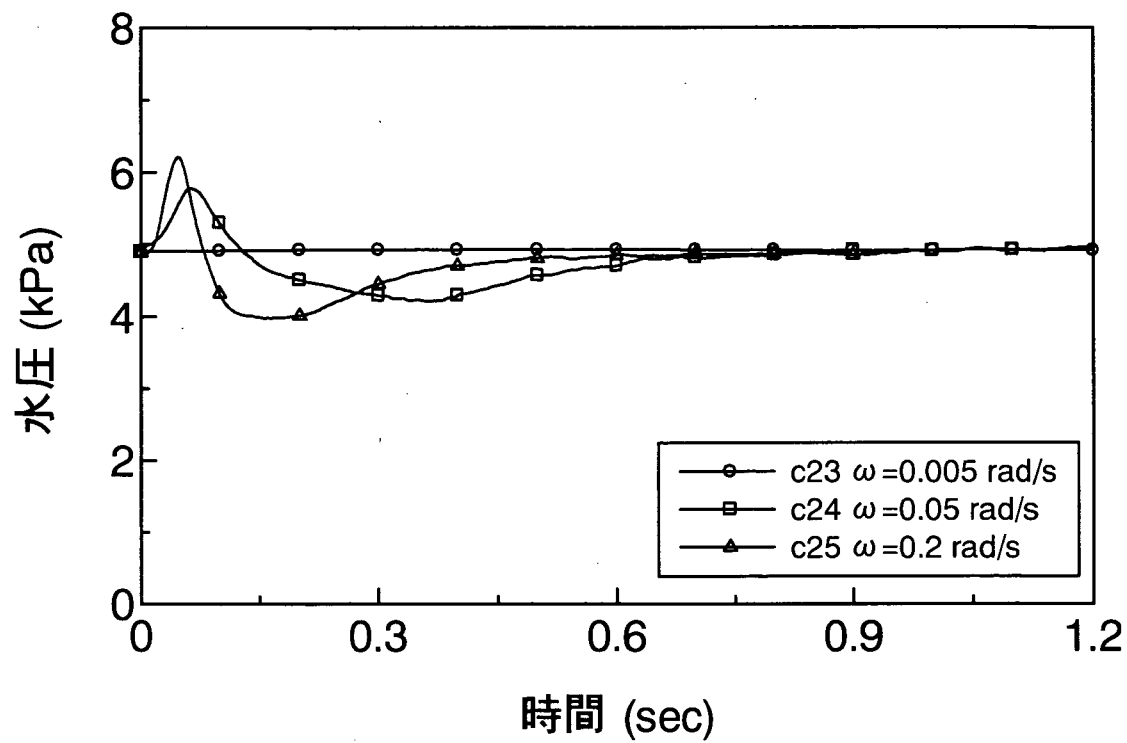


(e) W5



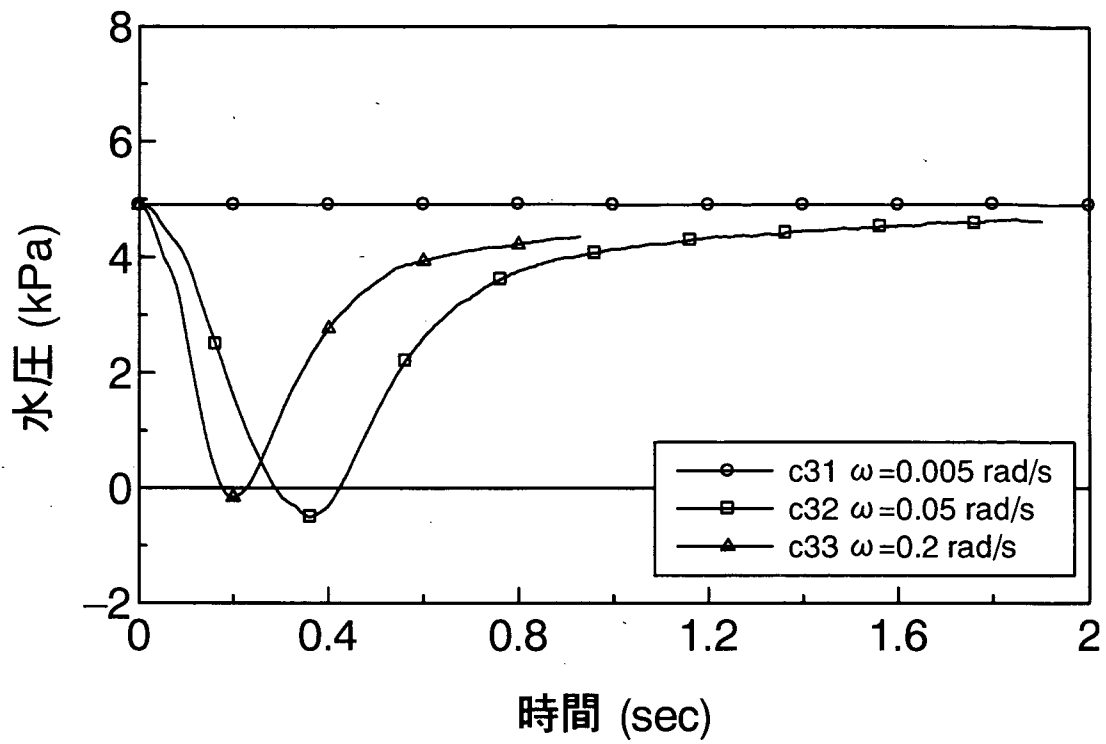
(f) W6

図一付 3.3.2-3 水深 $h=500$ mm, 砂地盤

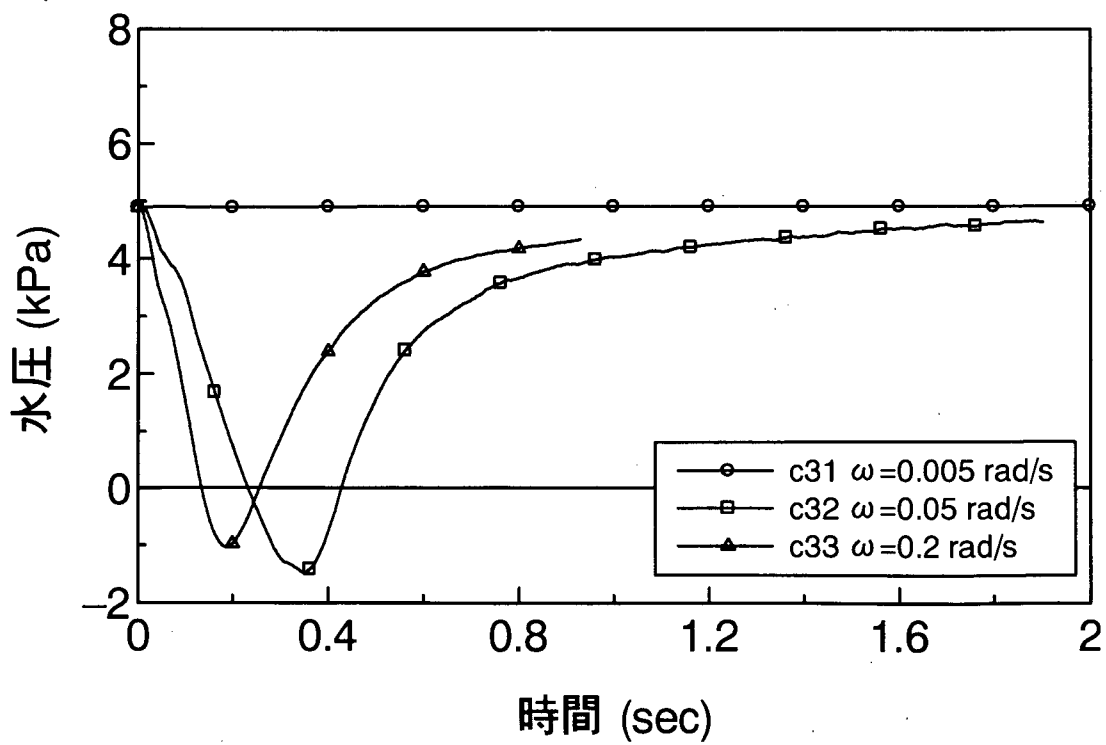


(g) W7

図-付 3.3.2-4 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

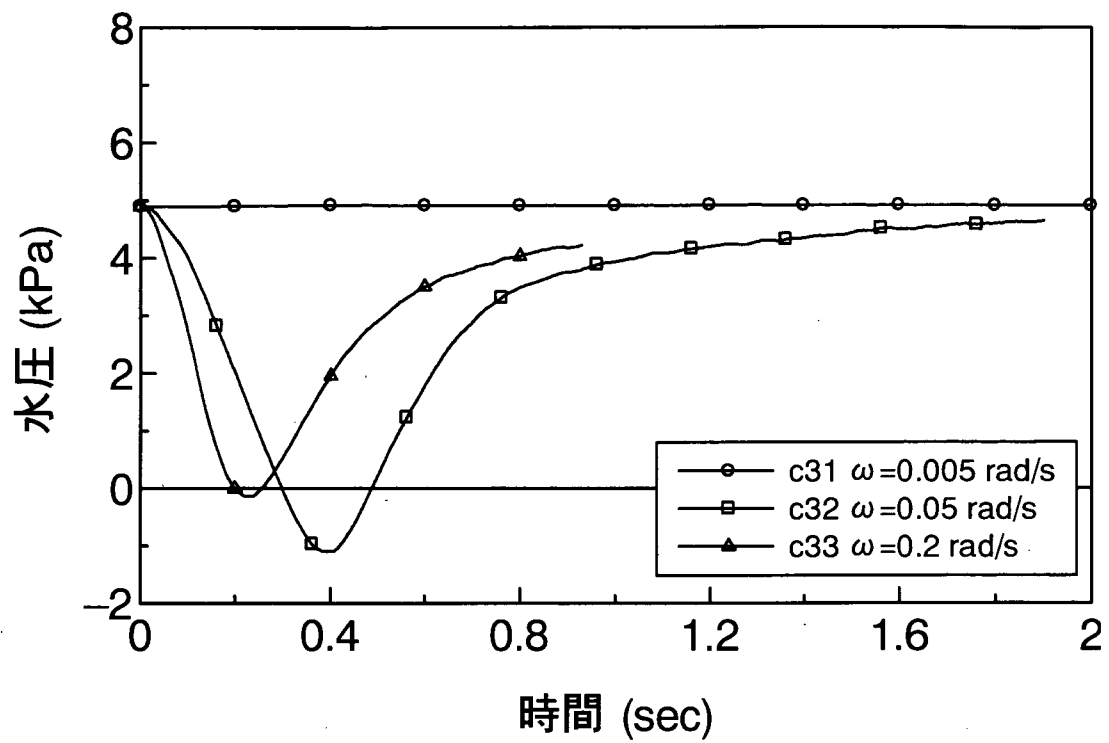


(a) W1

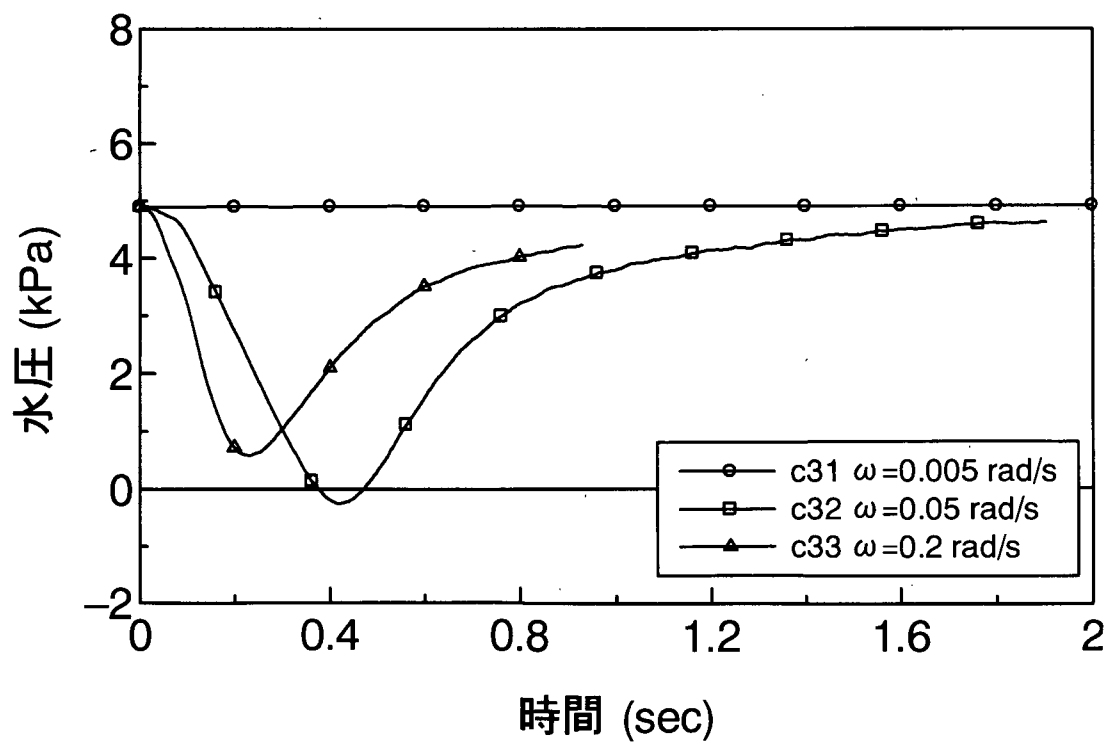


(b) W2

図-付 3.3.3-1 水深 $h=500$ mm, 砂地盤(止水板あり)

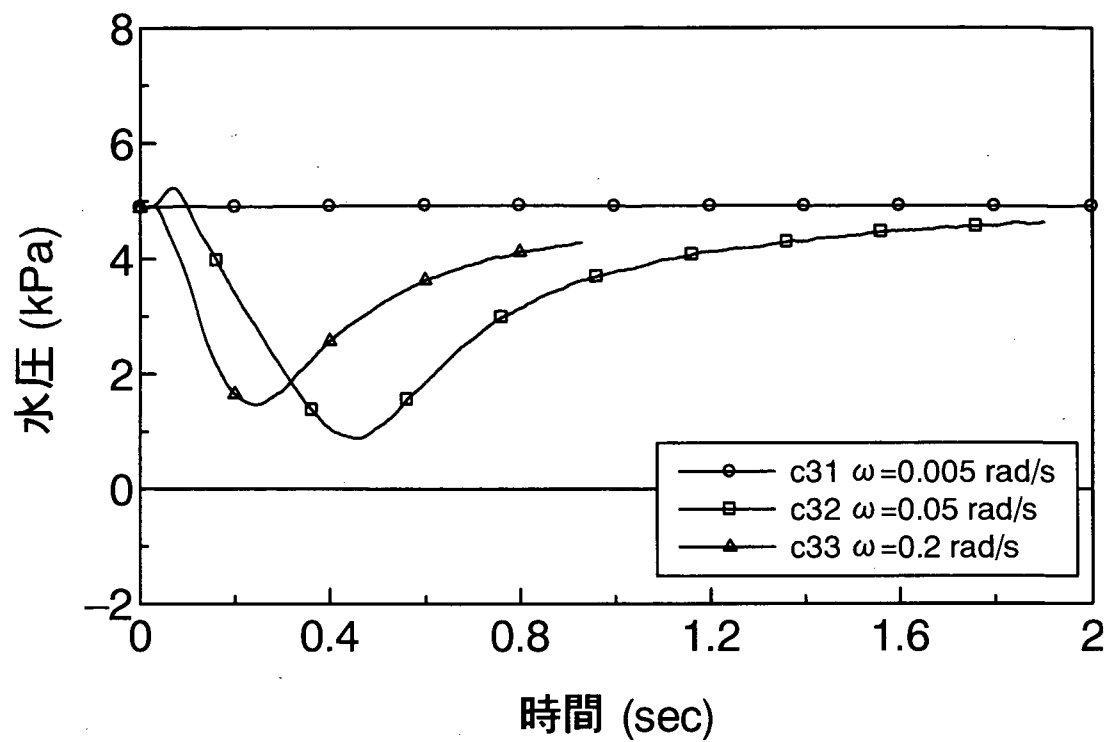


(c) W3

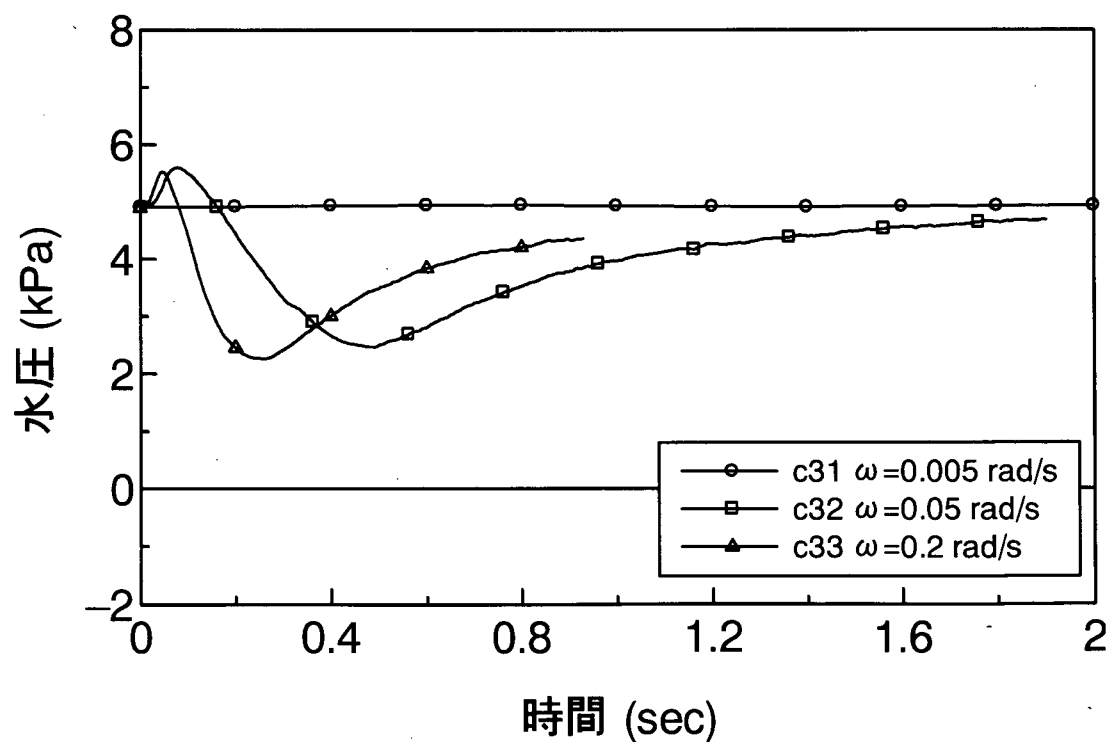


(d) W4

図-付 3.3.3-2 水深 $h=500$ mm, 砂地盤(止水板あり)

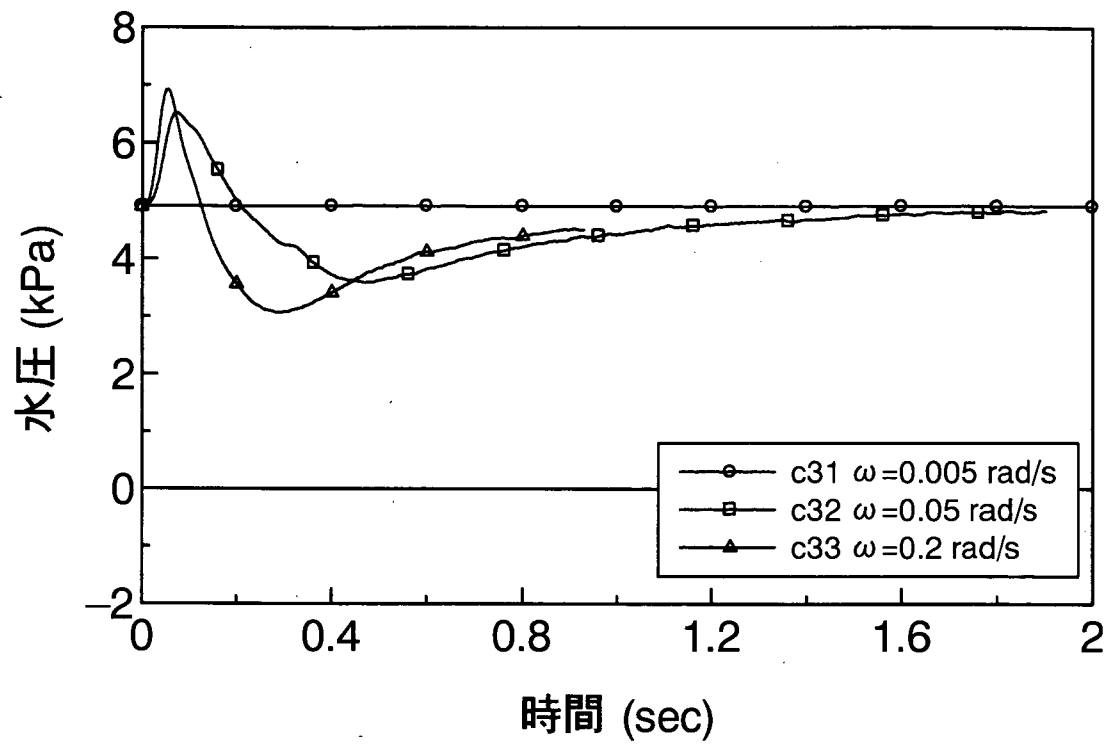


(e) W5



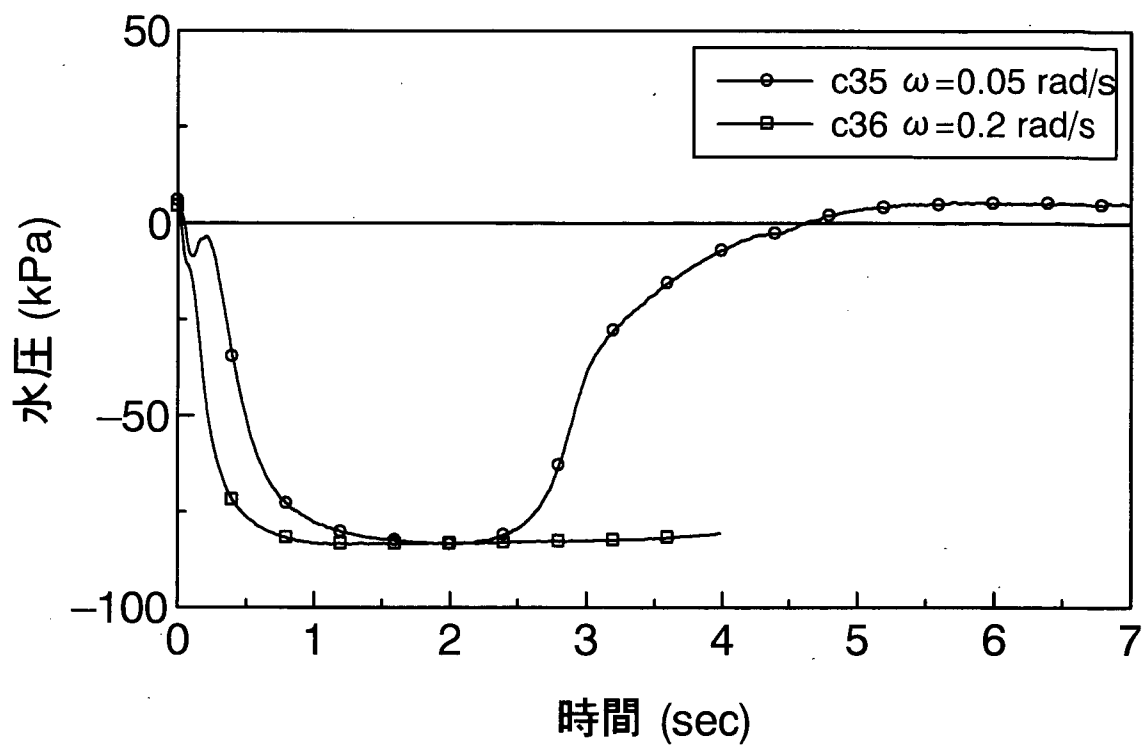
(f) W6

図-付 3.3.3-3 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤 (止水板あり)

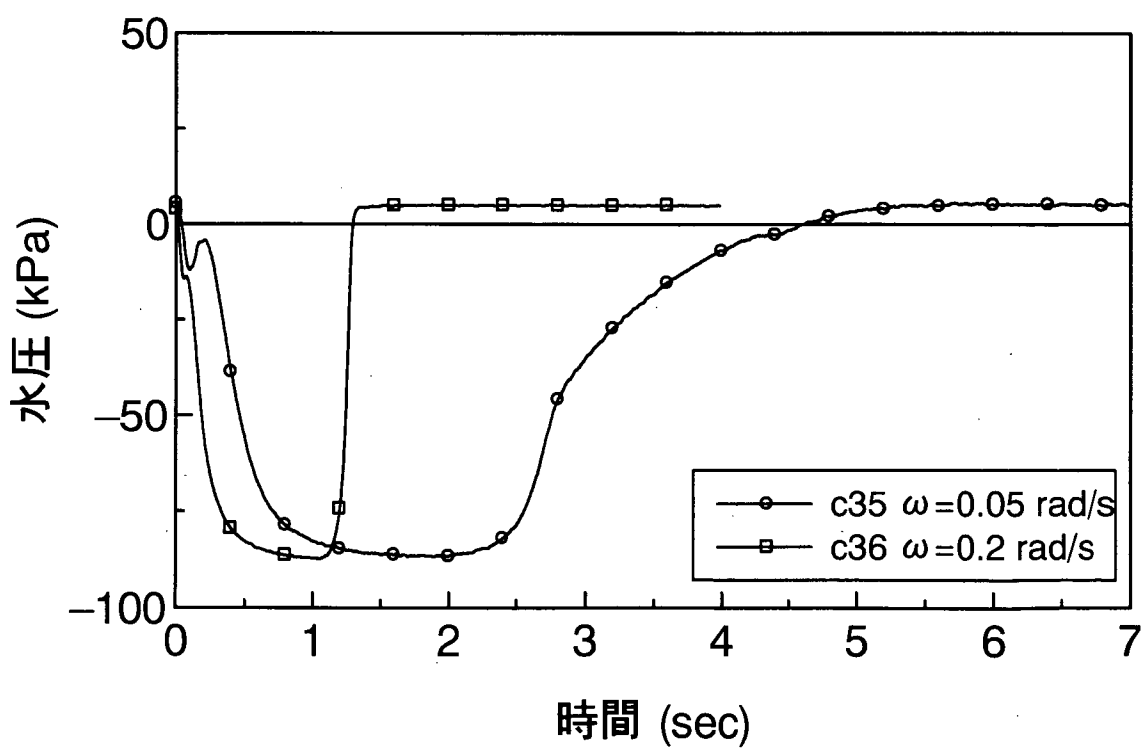


(g) W7

図-付 3.3.3-4 水深 $h=500$ mm, 砂地盤(止水板あり)

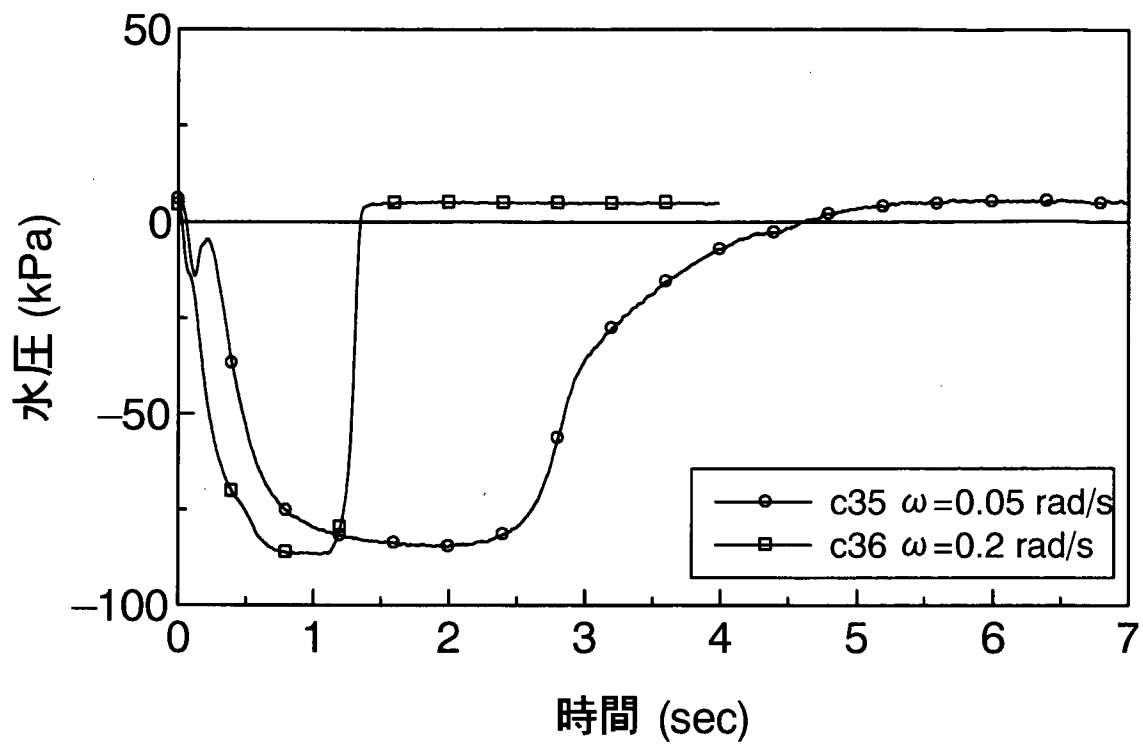


(a) W1

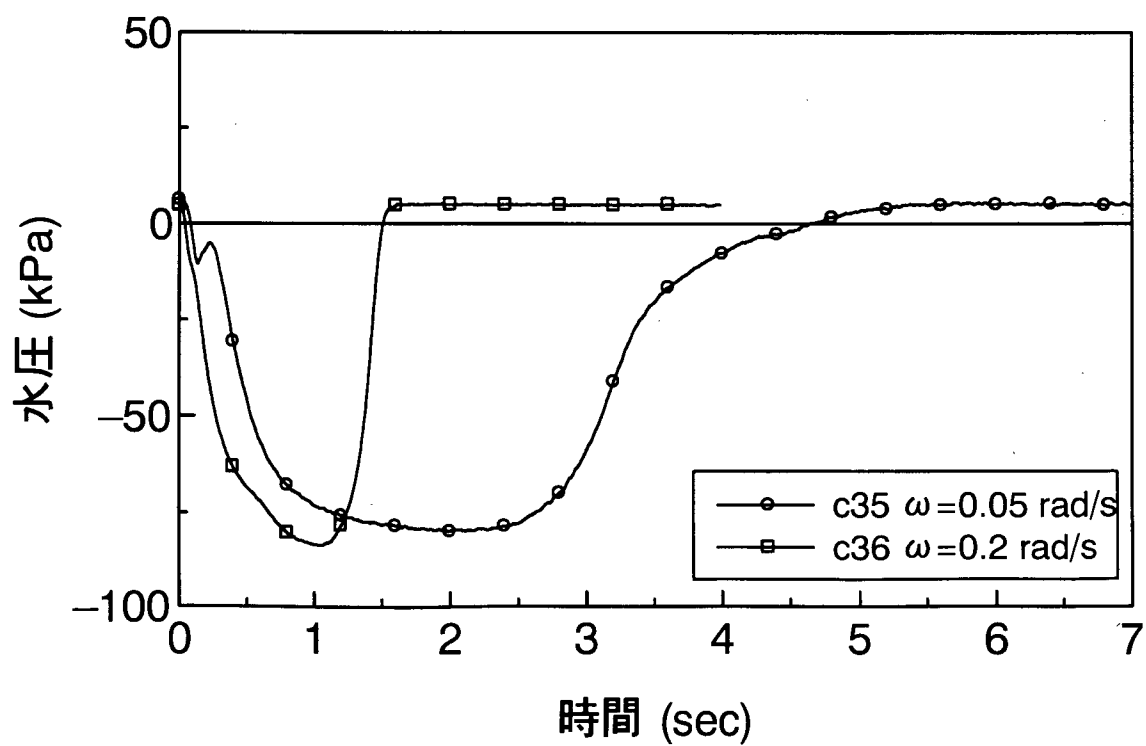


(b) W2

図-付 3.3.4-1 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤 (止水ゴム)

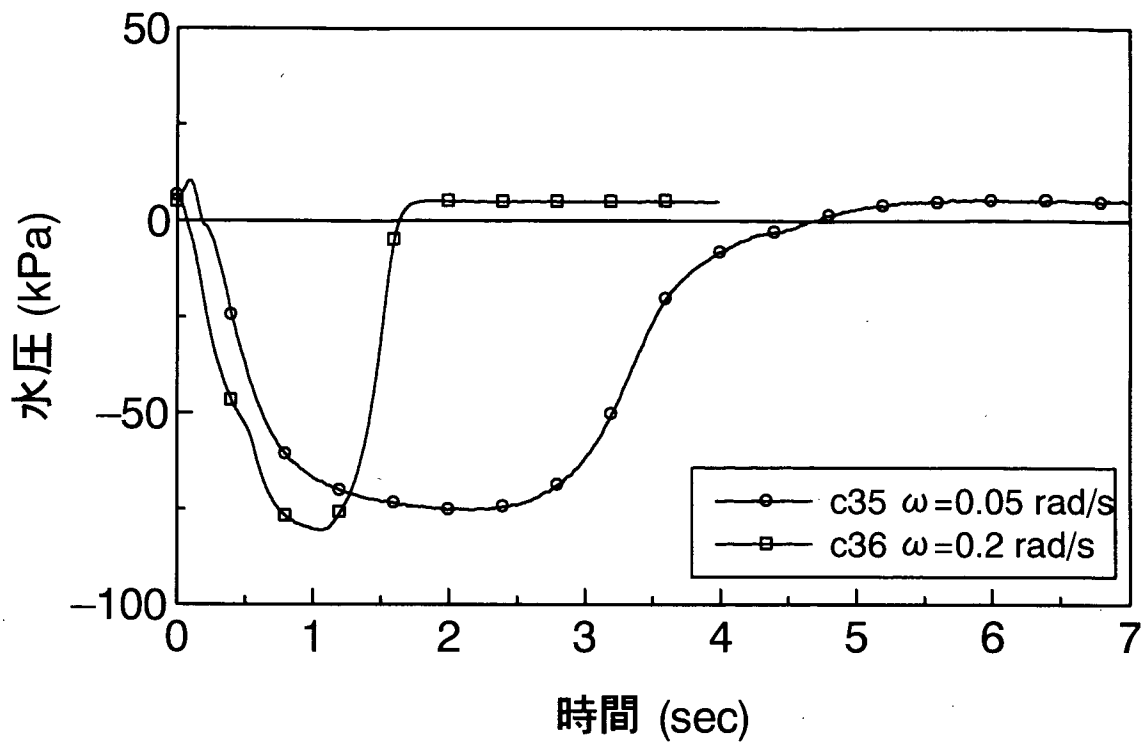


(c) W3

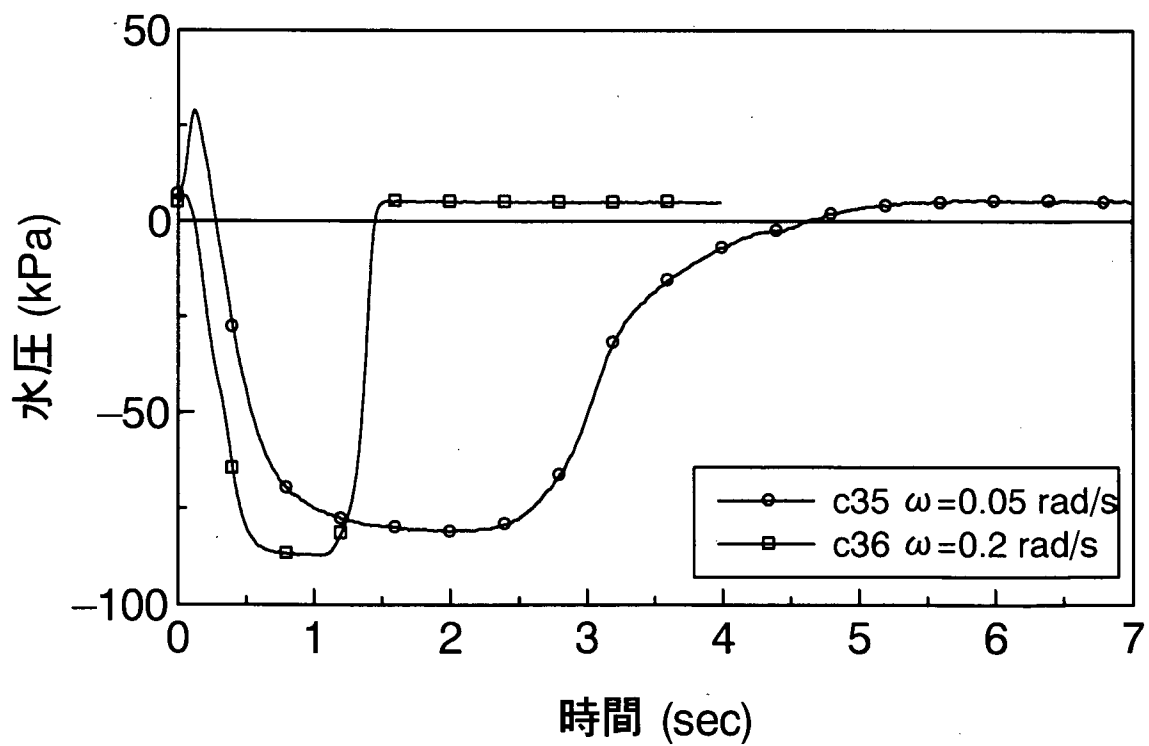


(d) W4

図-付 3.3.4-2 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤(止水ゴム)



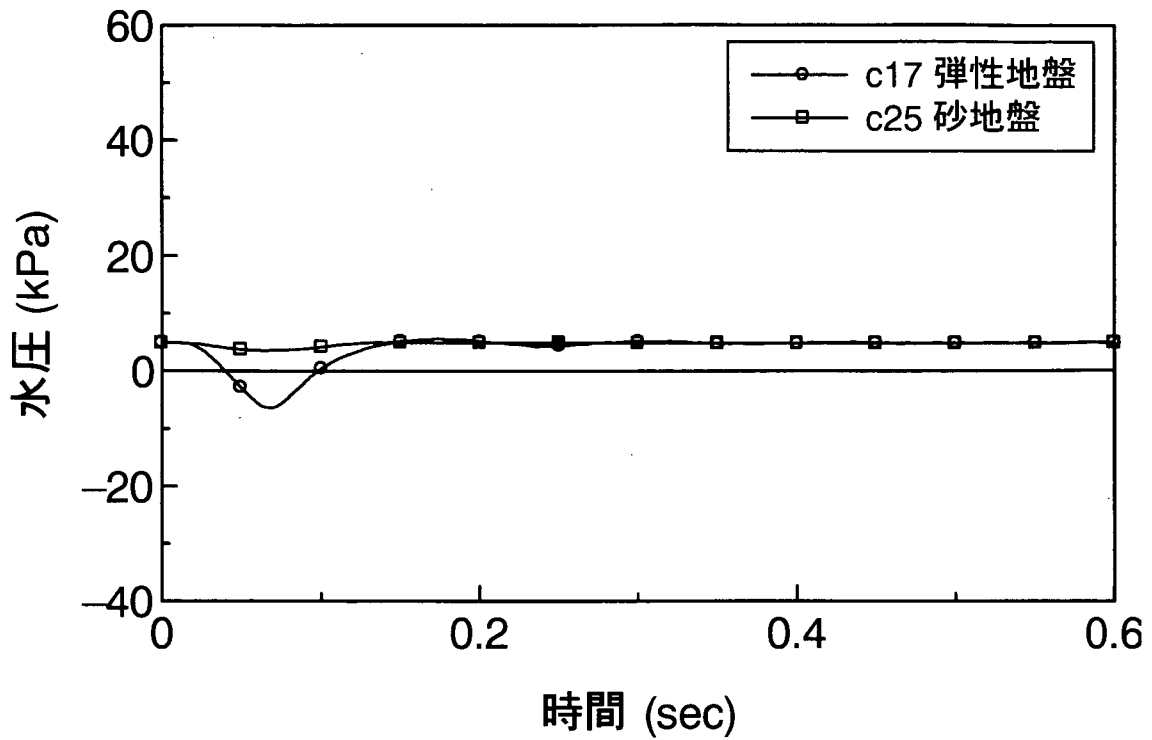
(e) W5



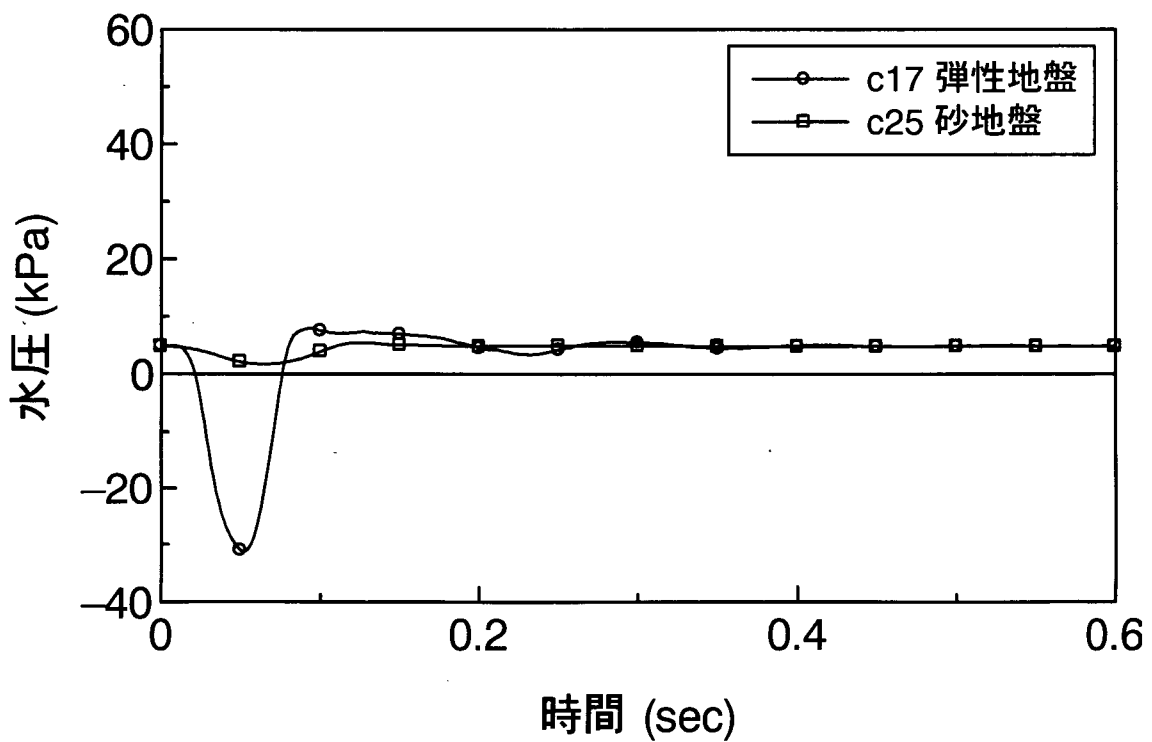
(f) W6

図-付 3.3.4-3 水深 $h=500$ mm, 弾性地盤(止水ゴム)

3.4 地盤条件の影響

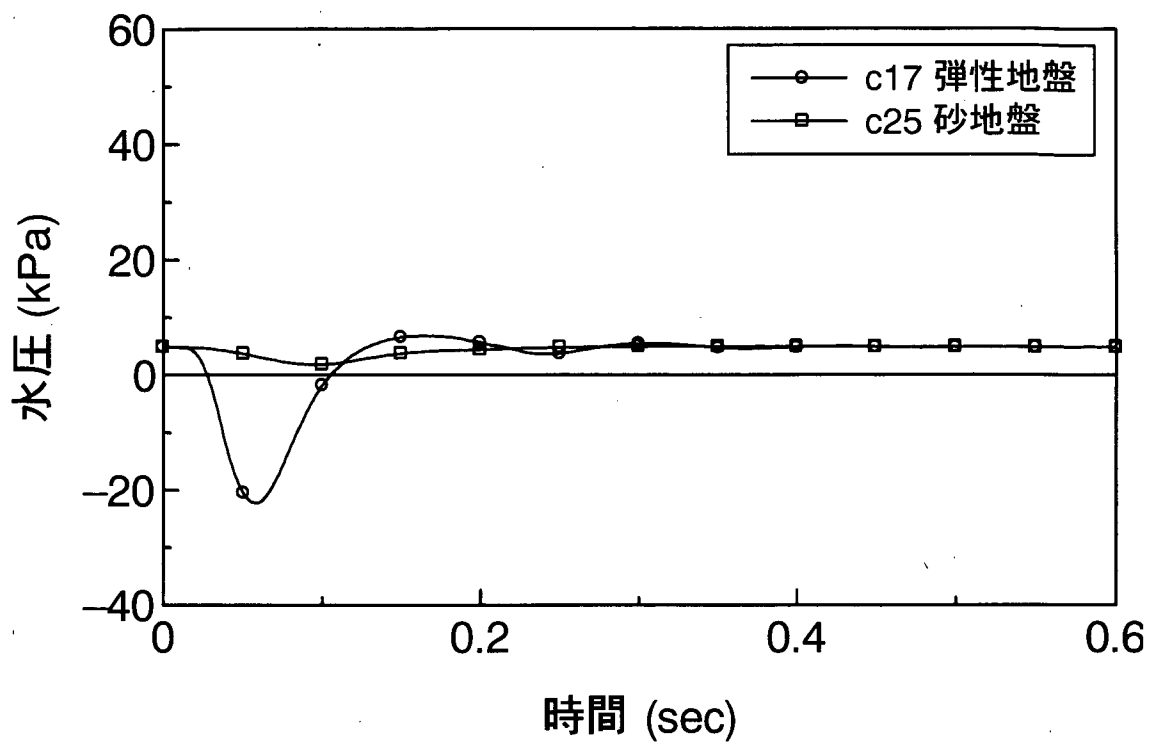


(a) W1

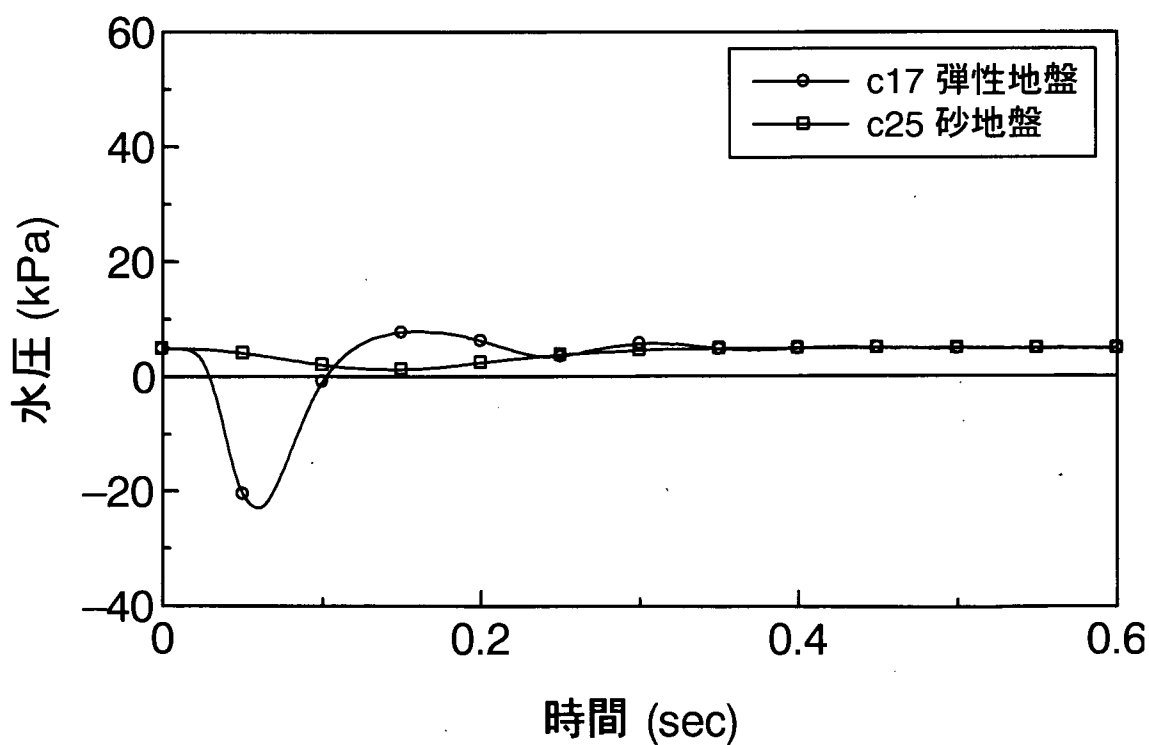


(b) W2

図-付 3.4-1 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

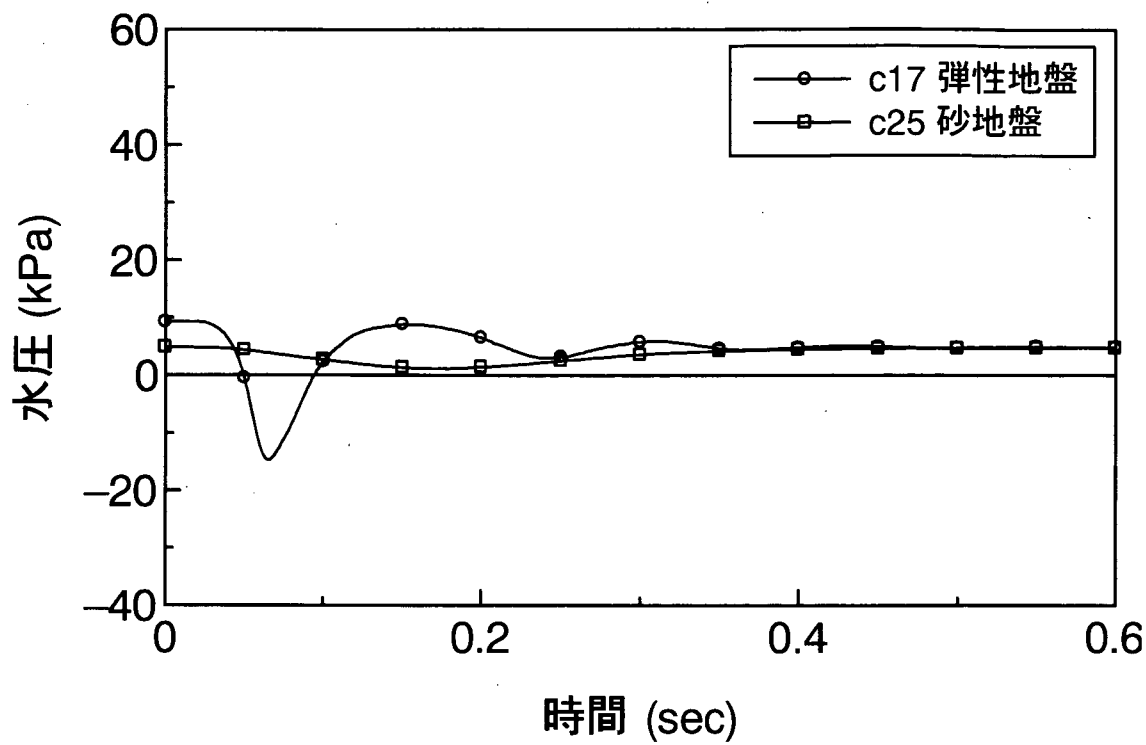


(c) W3

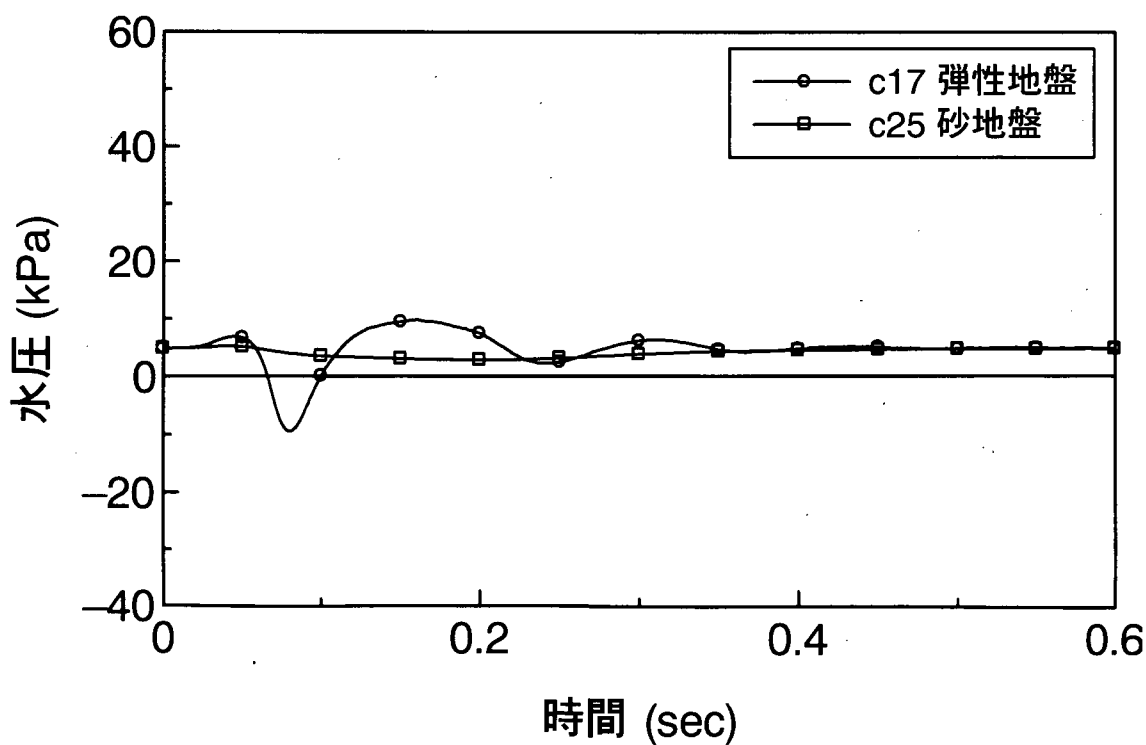


(d) W4

圖一付 3.4-2 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

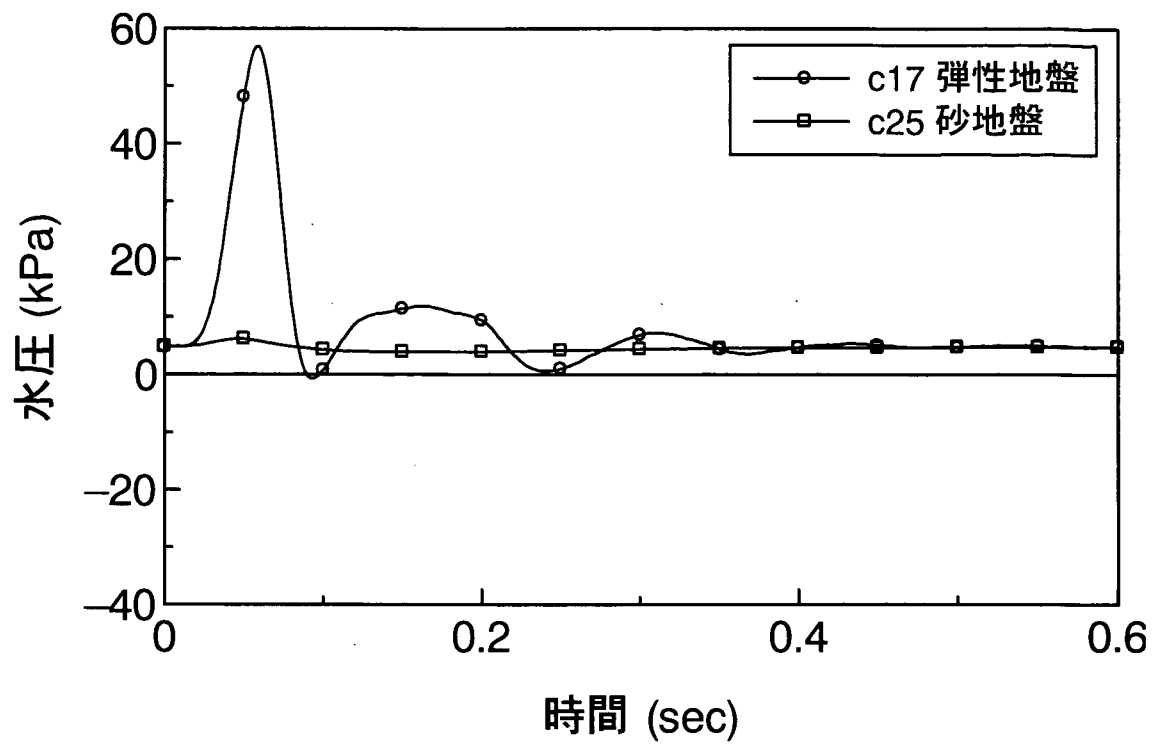


(e) W5



(f) W6

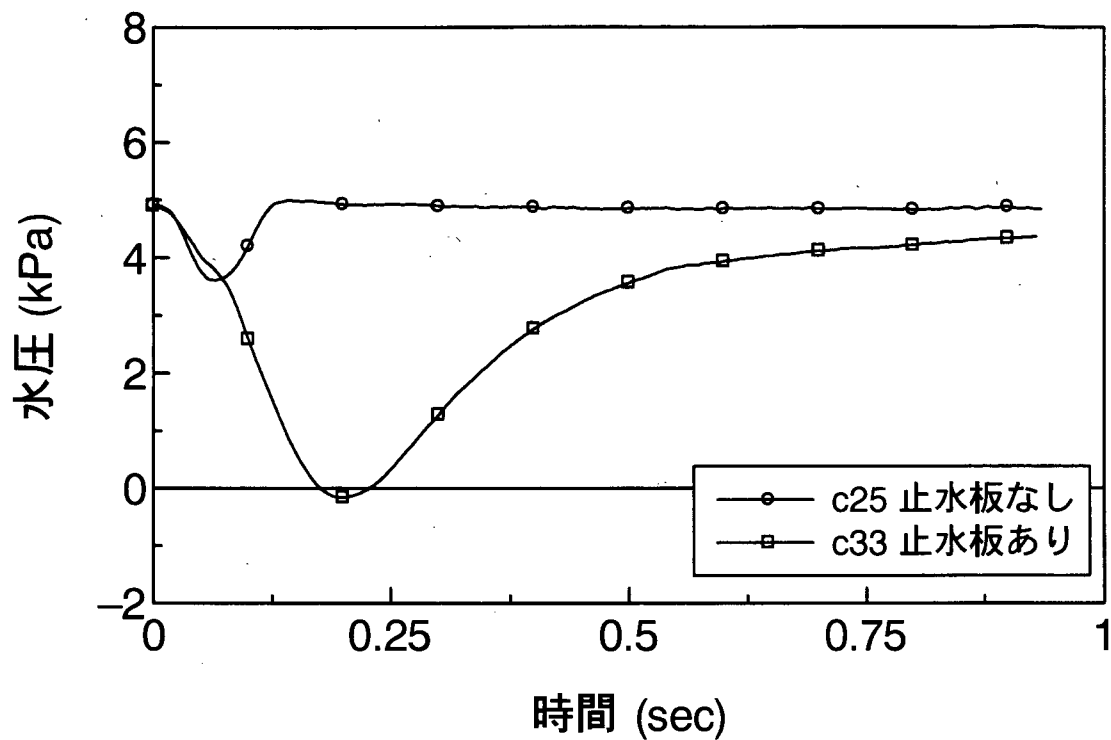
圖一付 3.4-3 水深 $h=500\text{mm}$, 回轉角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$



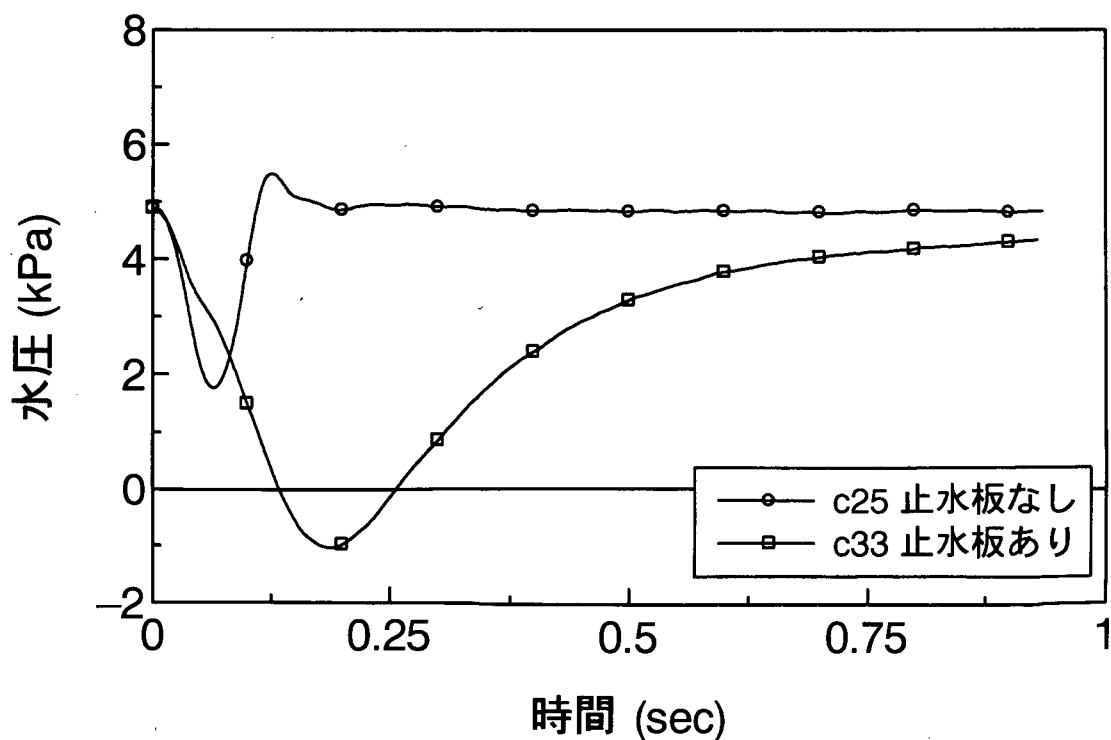
(g) W7

図-付 3.4-4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

3.5 止水条件の影響(砂地盤)

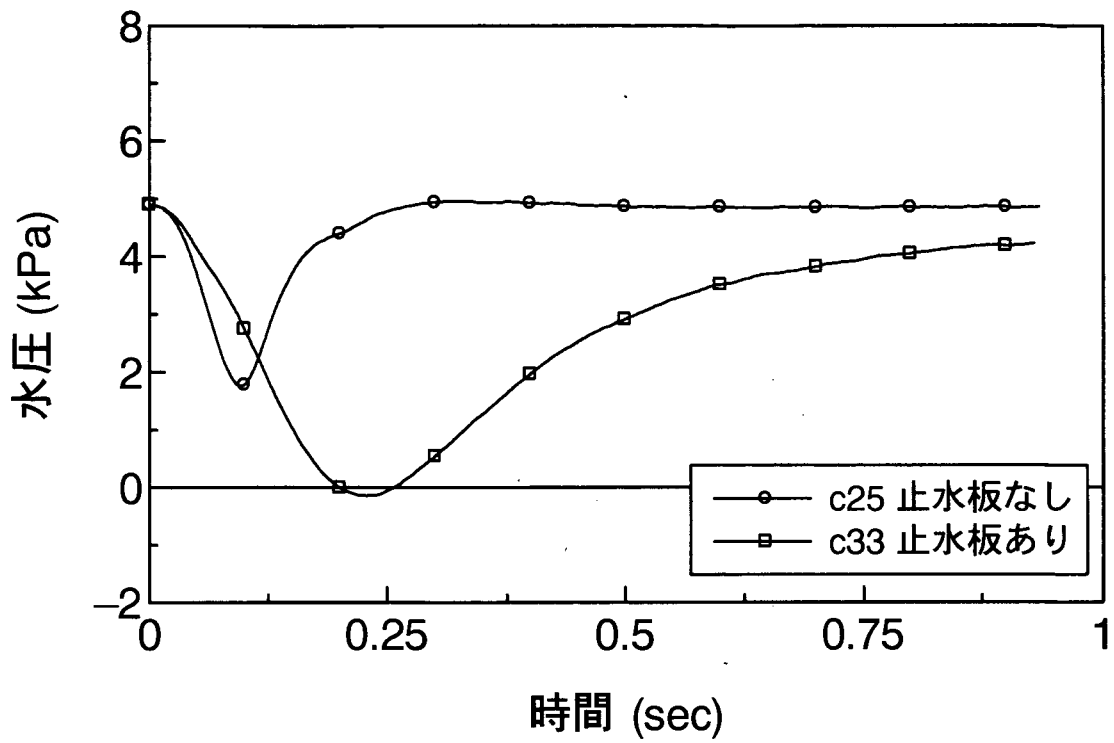


(a) W1

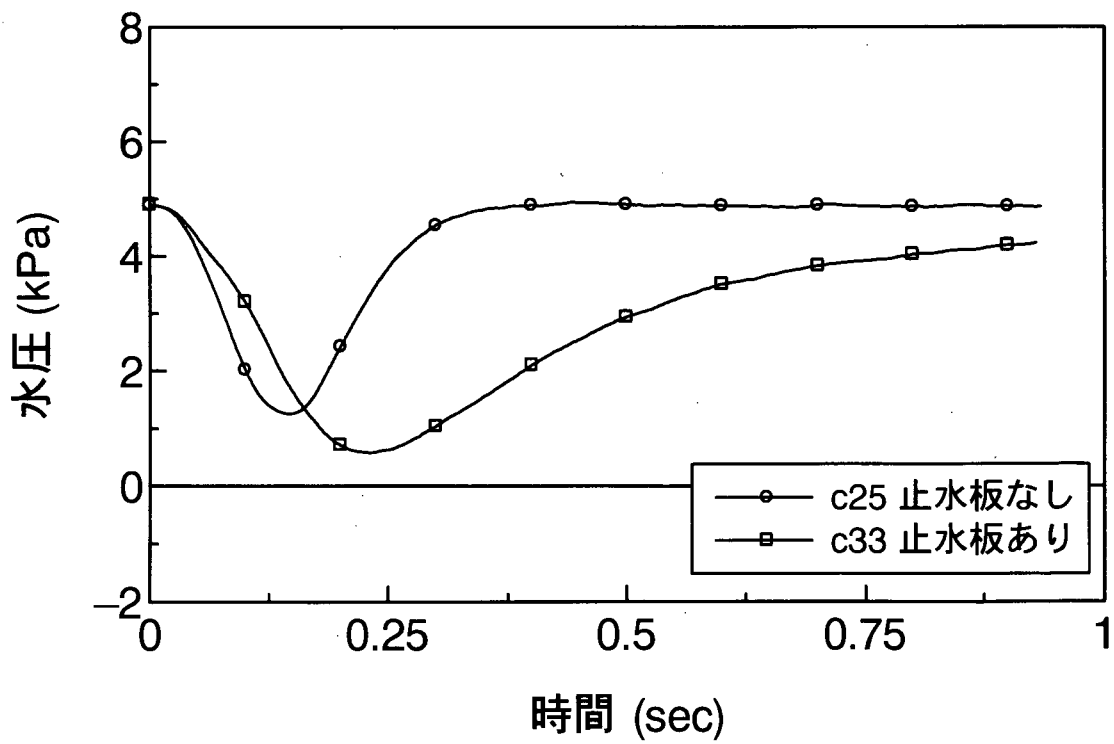


(b) W2

図-付 3.5-1 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

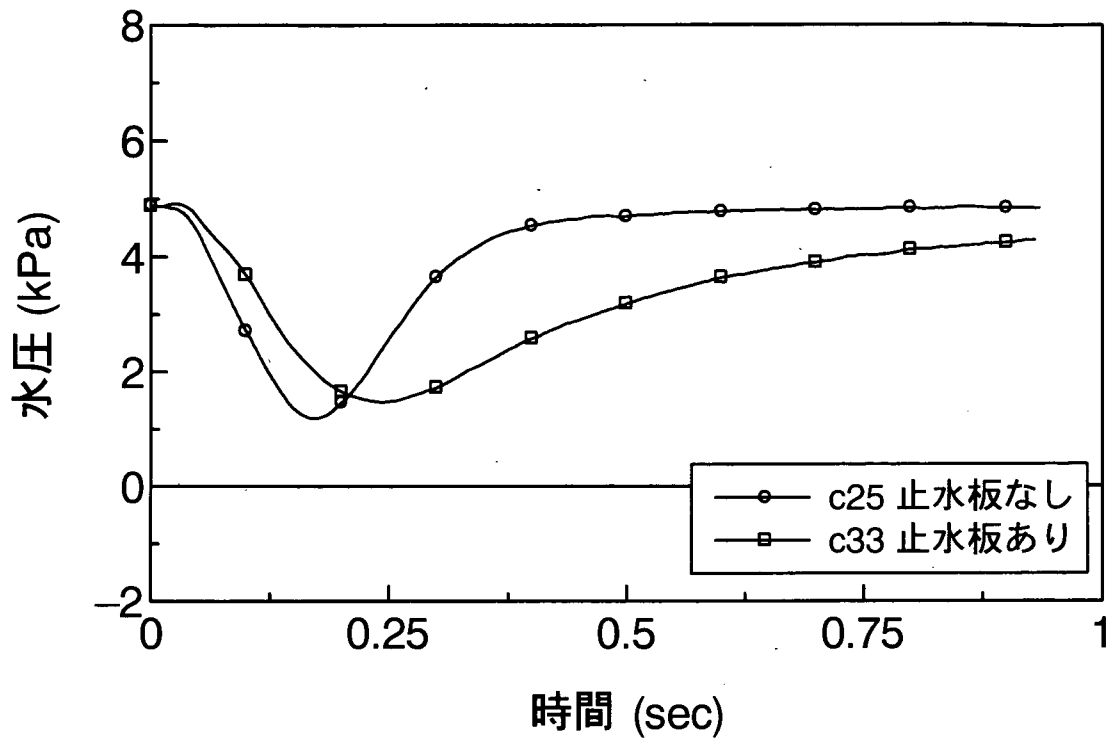


(c) W3

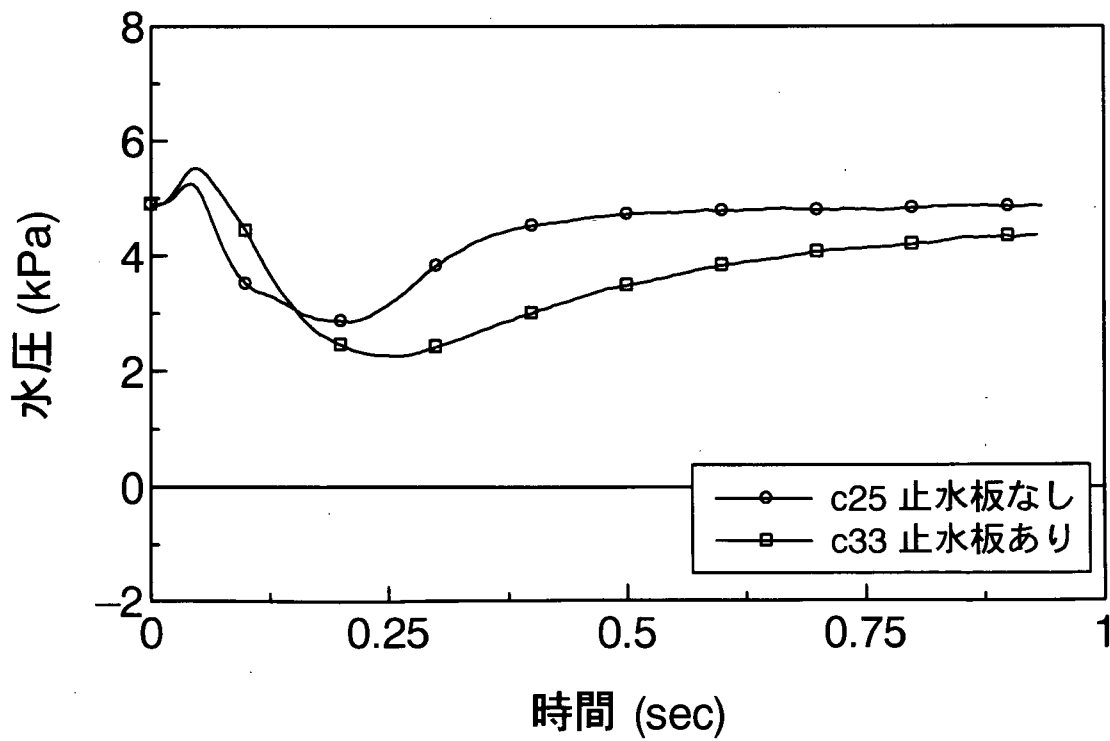


(d) W4

図-付 3.5-2 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

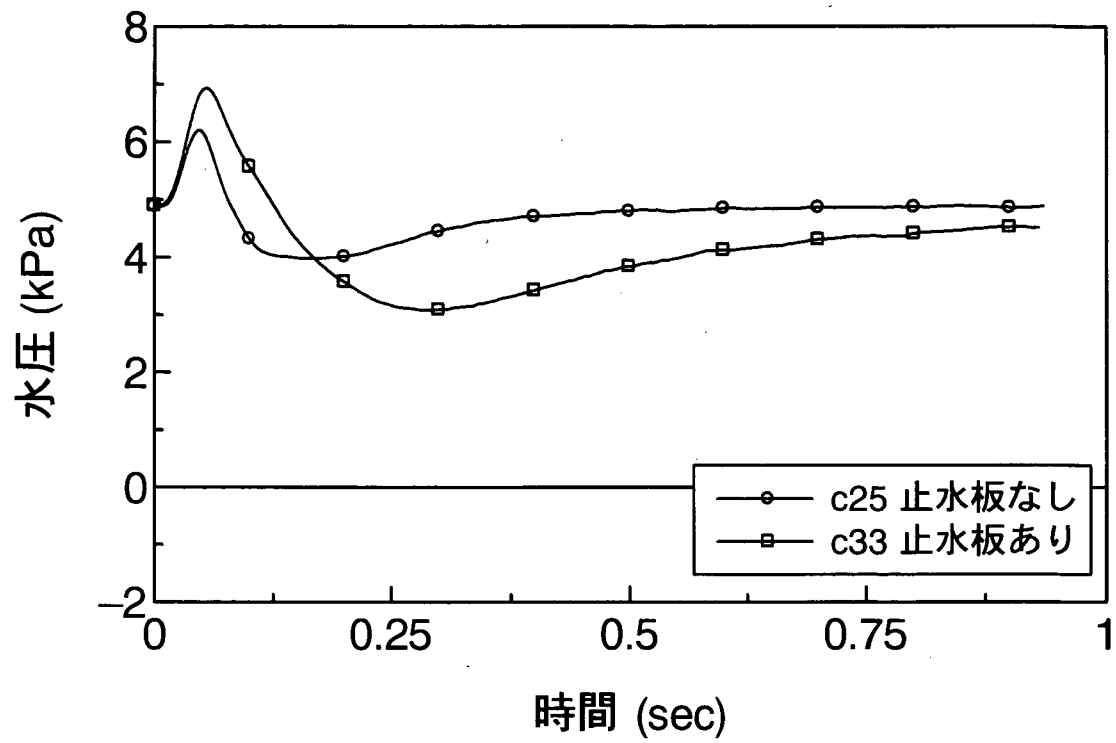


(e) W5



(f) W6

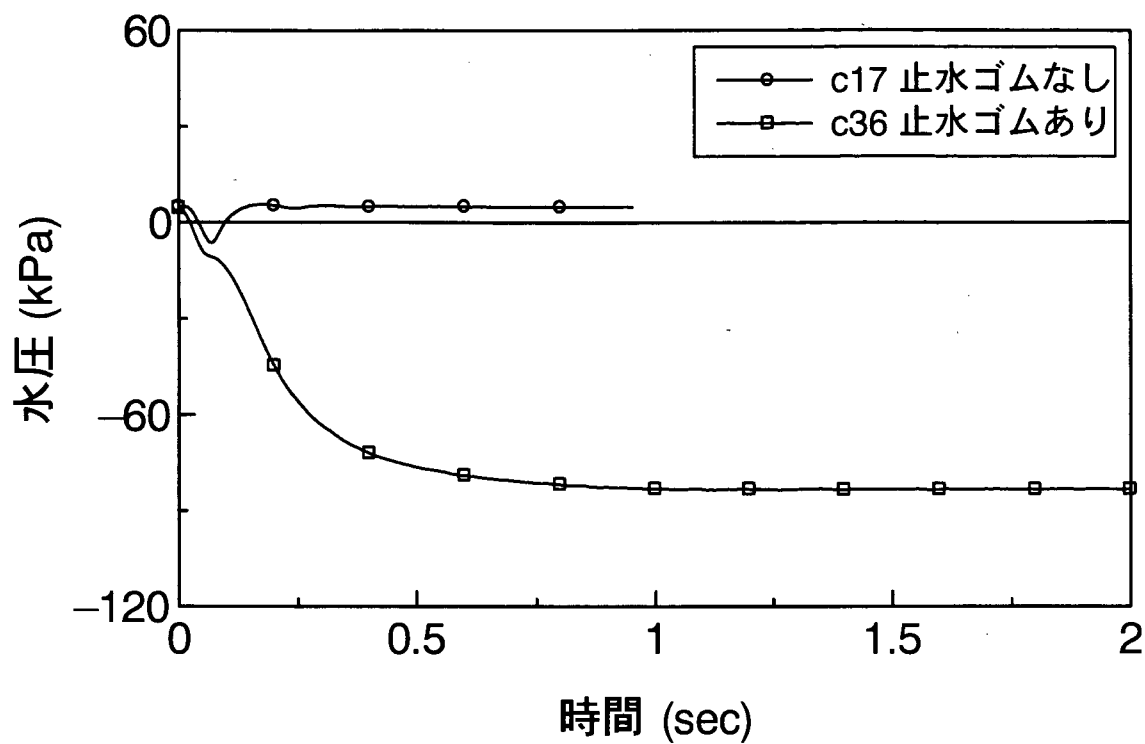
図-付 3.5-3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤



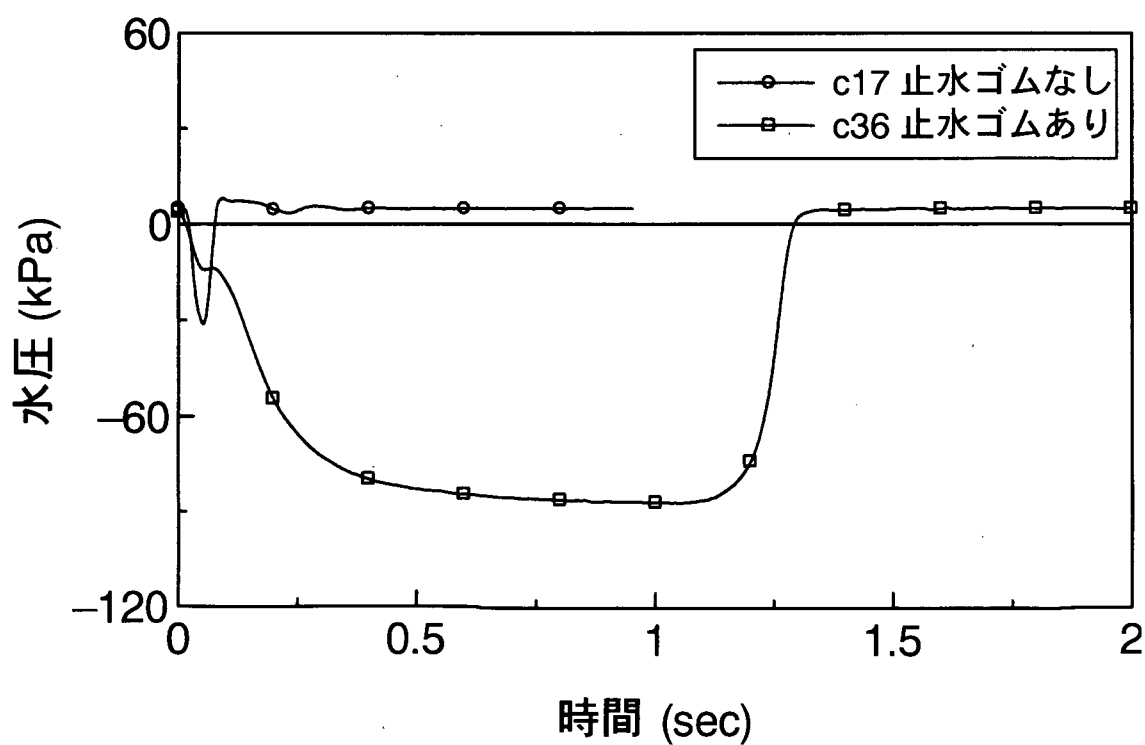
(g) W7

図-付 3.5-4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

3.6 止水条件の影響(弾性地盤)

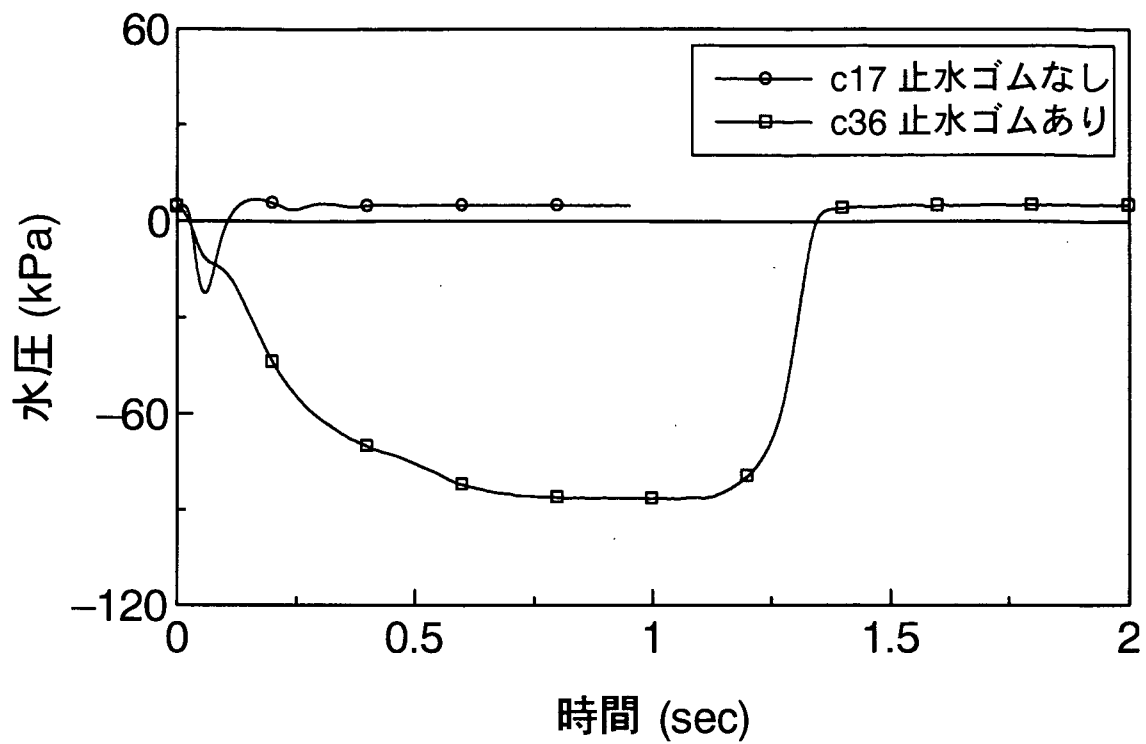


(a) W1

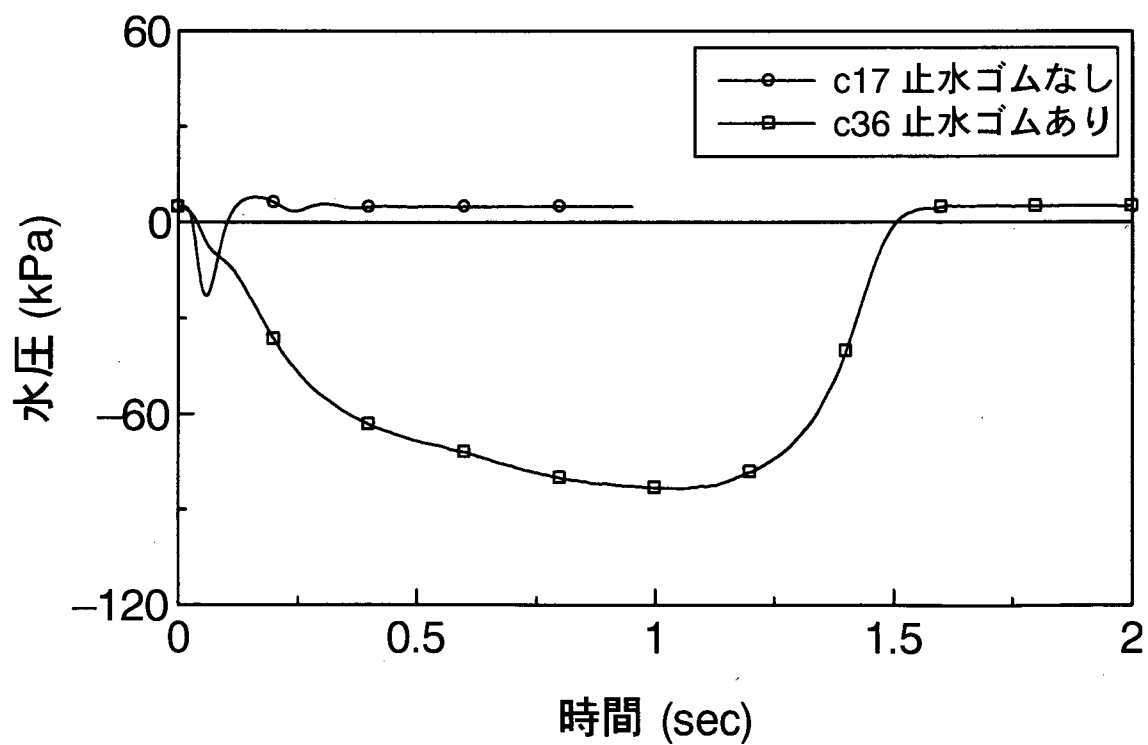


(b) W2

図-付 3.6-1 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤

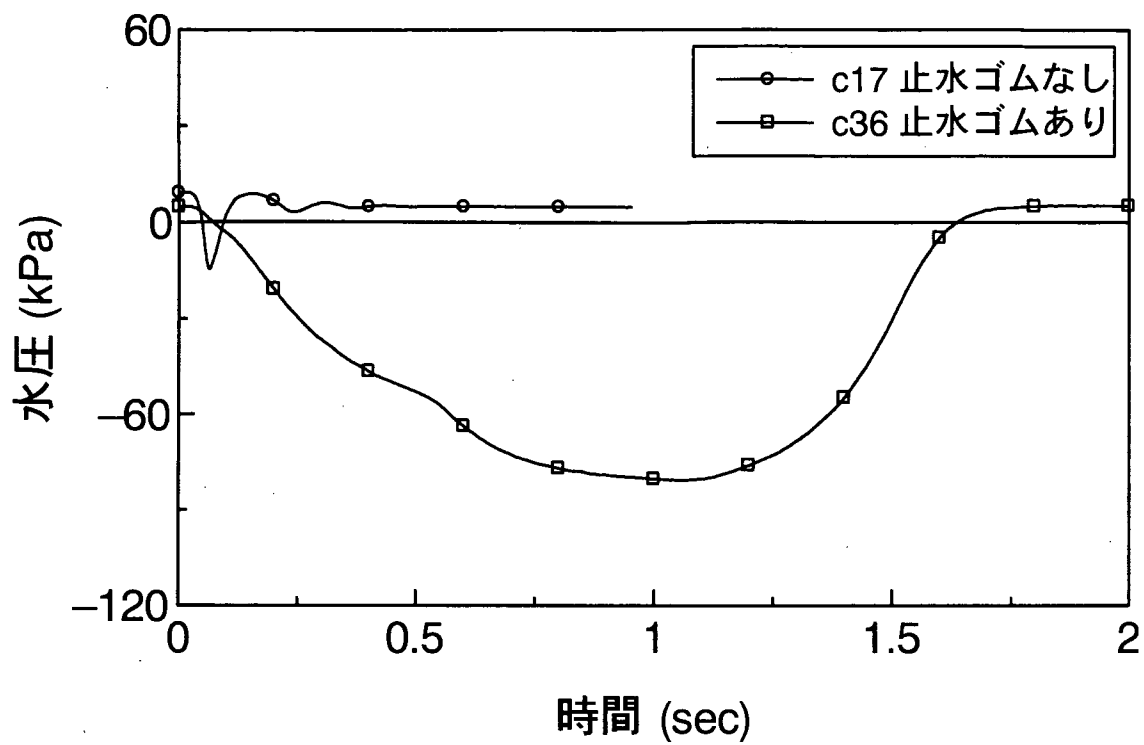


(c) W3

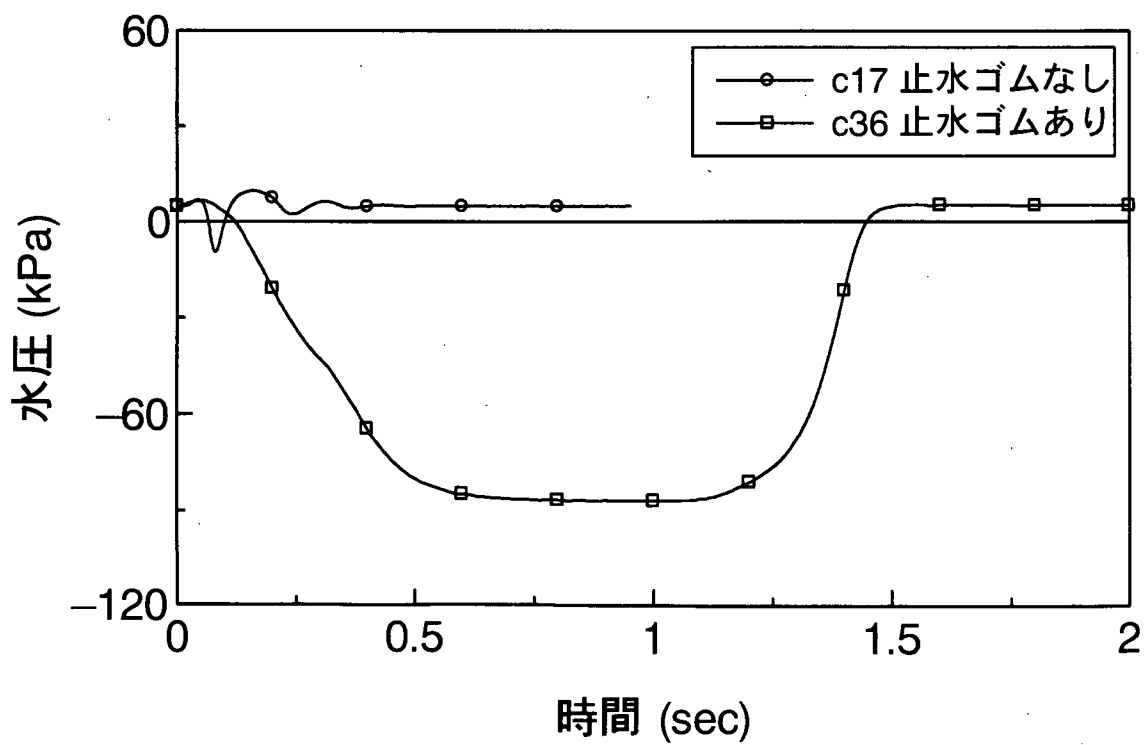


(d) W4

図-付 3.6-2 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤



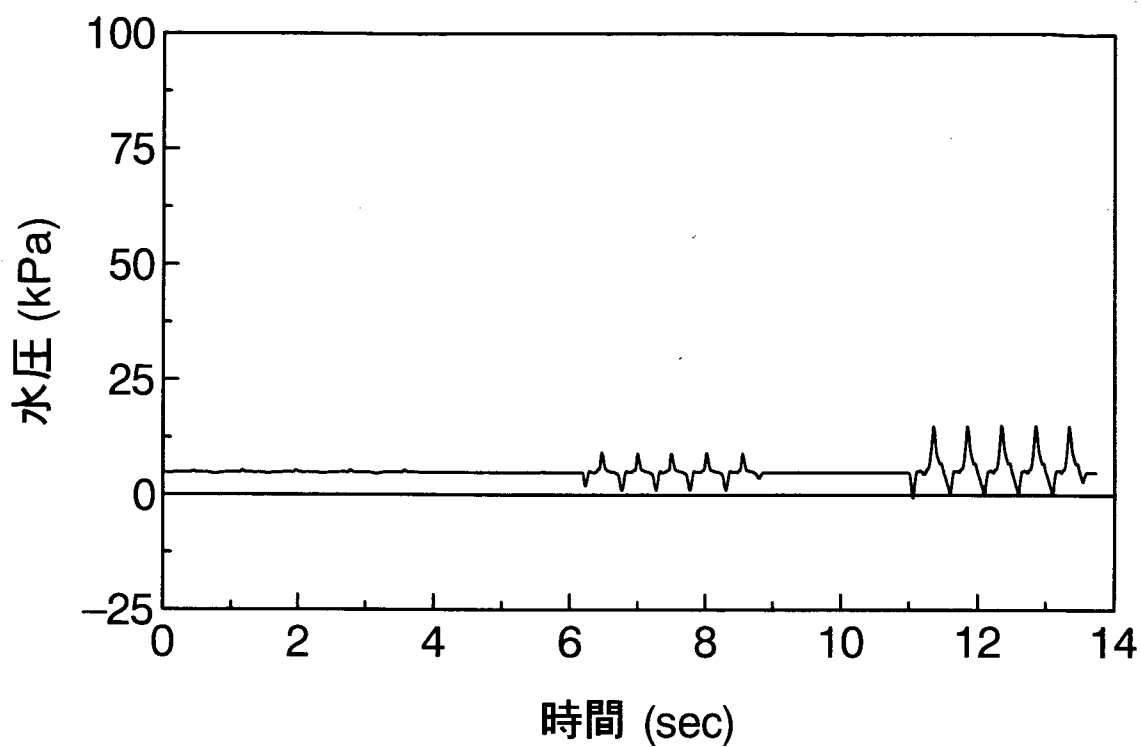
(e) W5



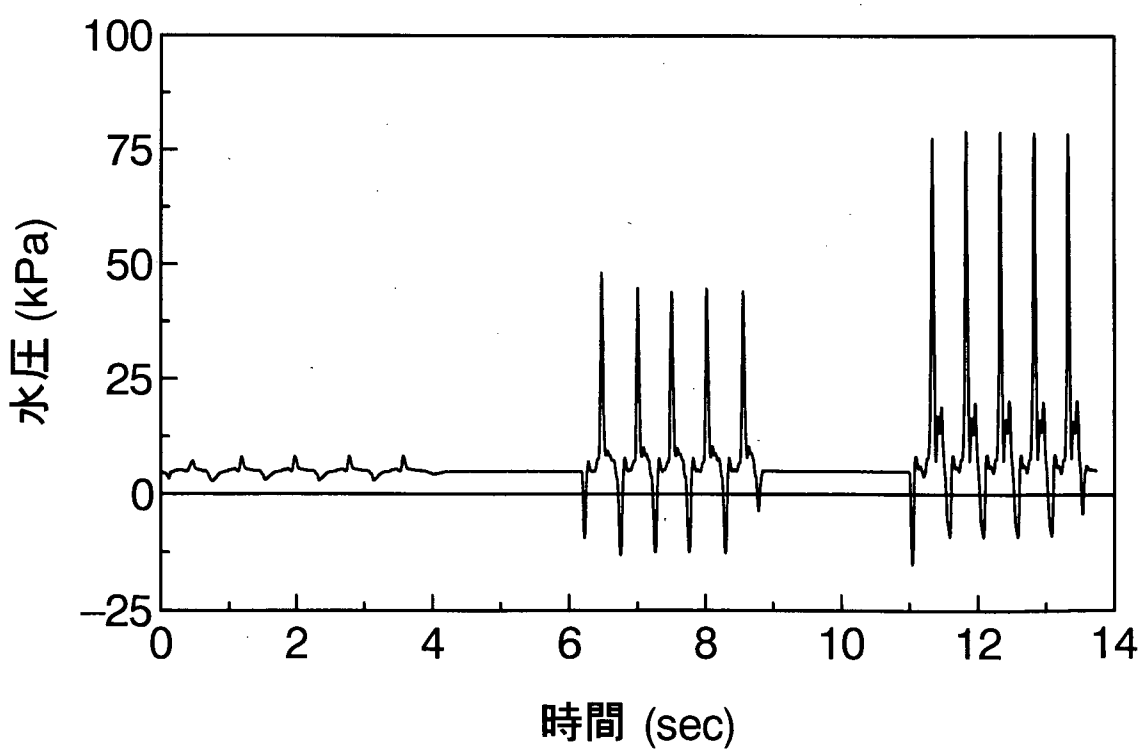
(f) W6

図-付 3.6-3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤

3.7 繰返し载荷の影響

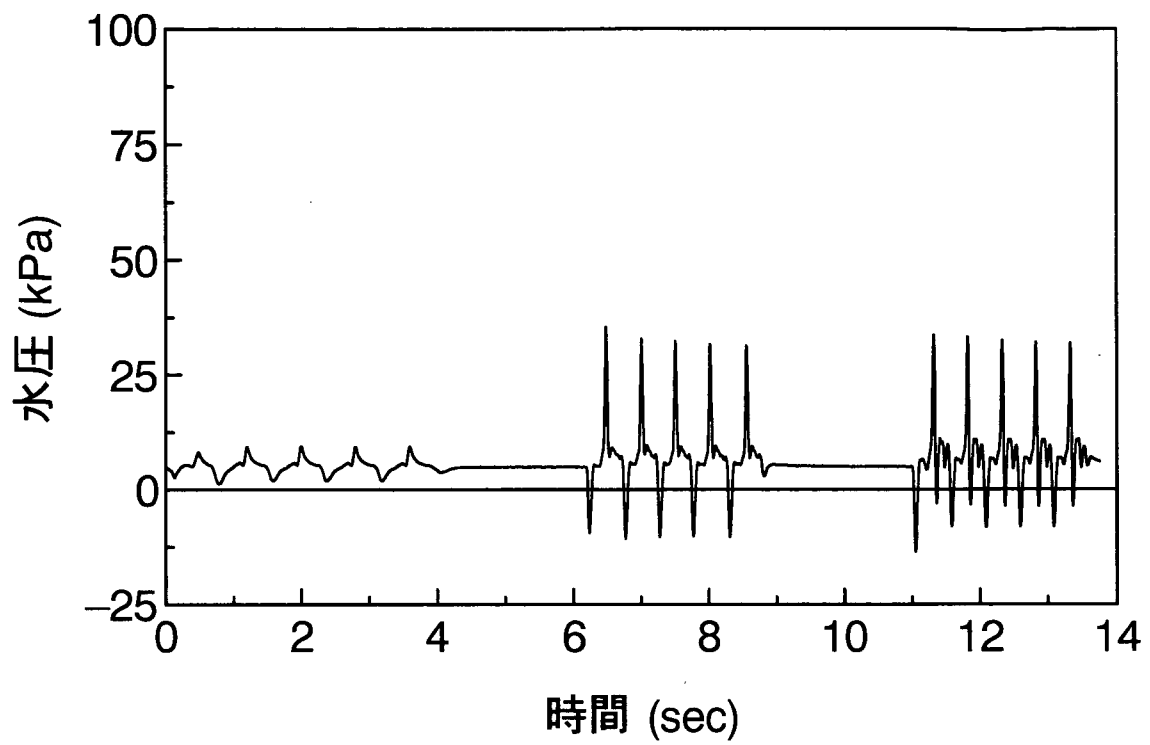


(a) W1

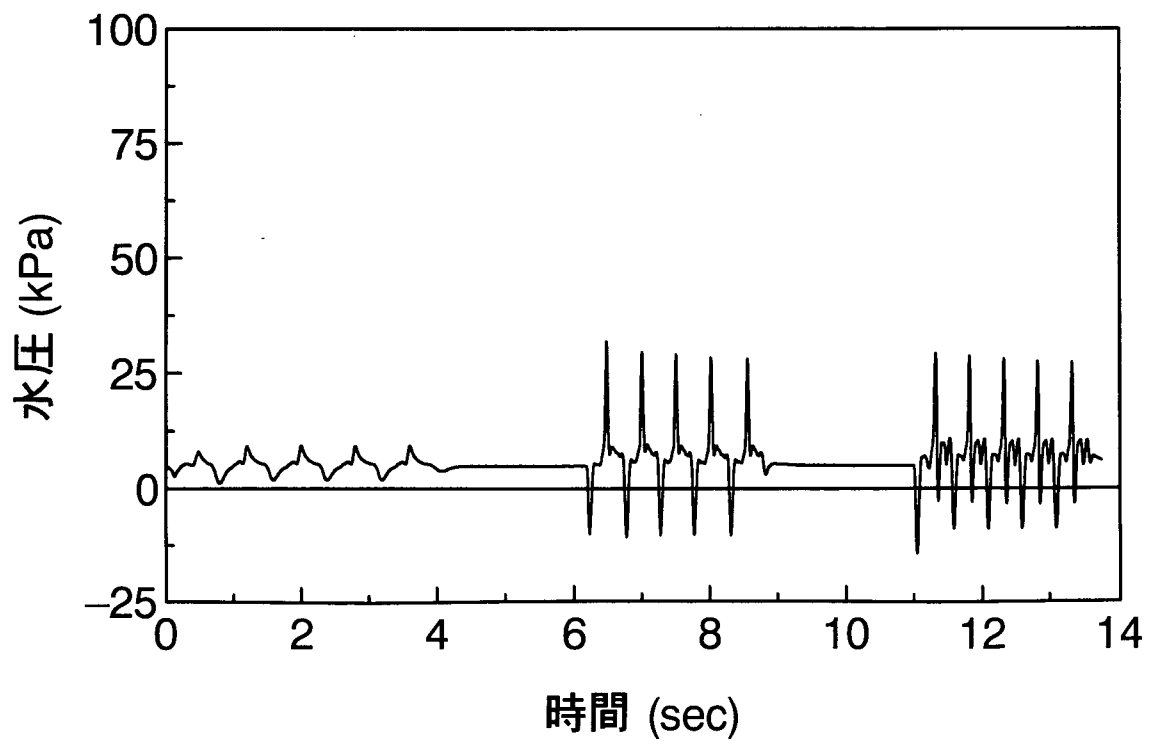


(b) W2

図-付 3.7.1-1 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

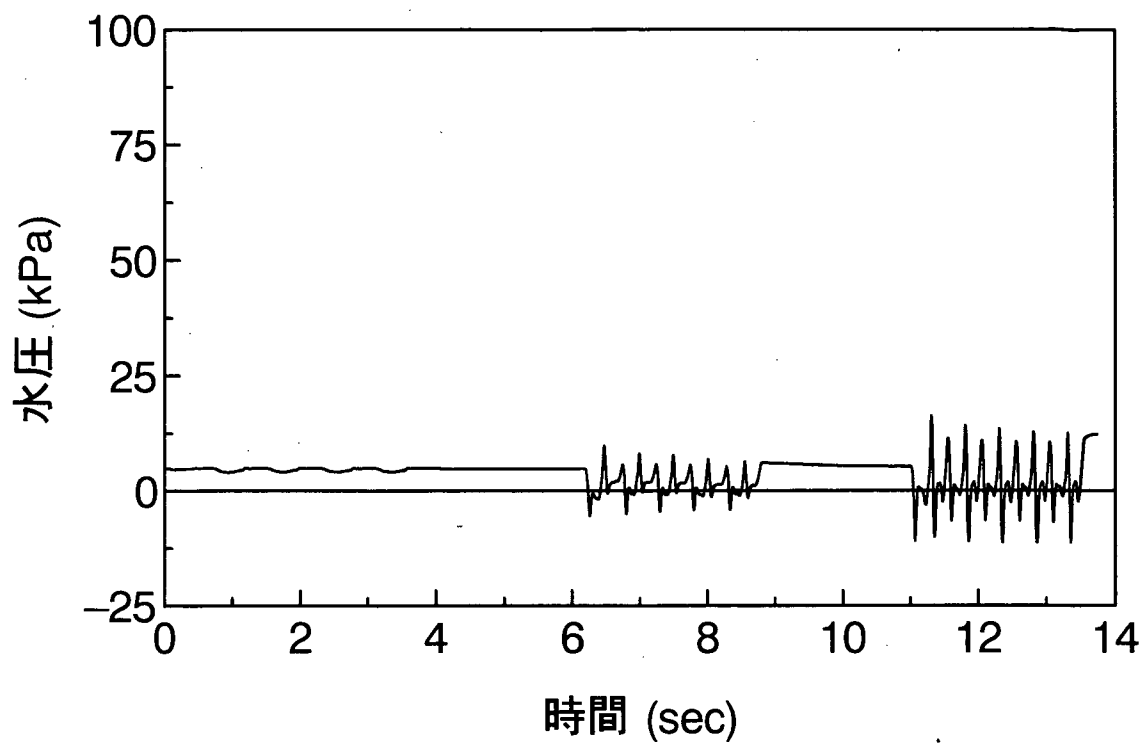


(c) W3

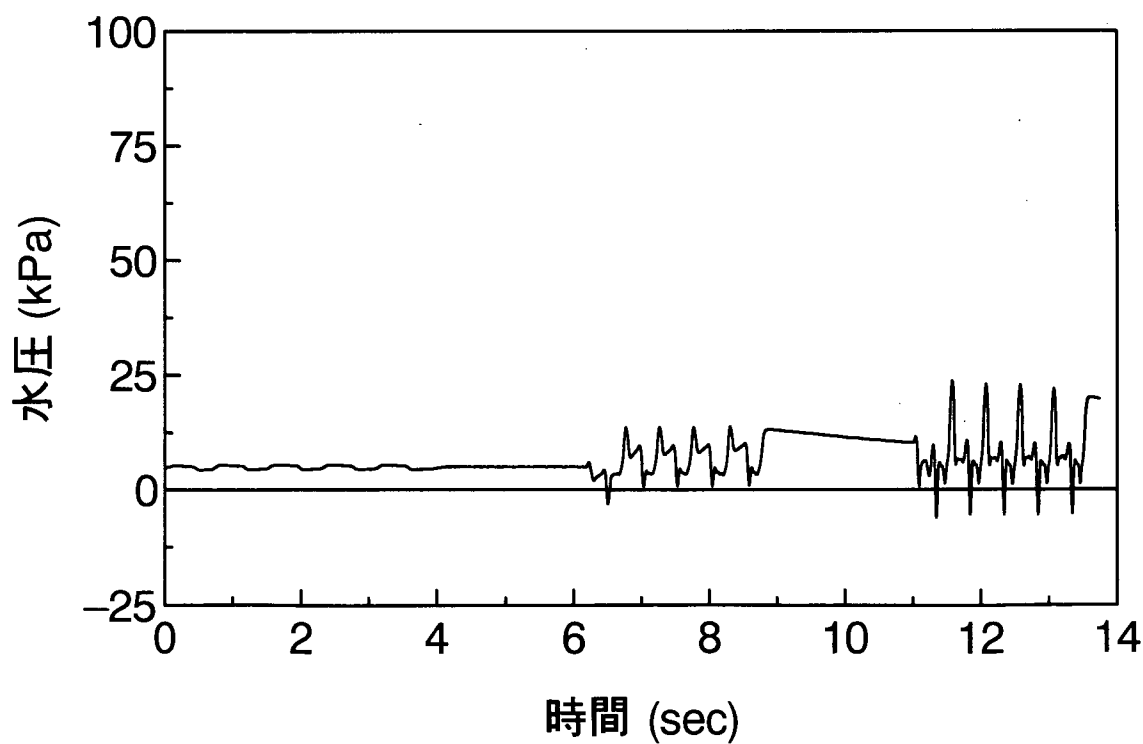


(d) W4

図-付 3.7.1-2 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

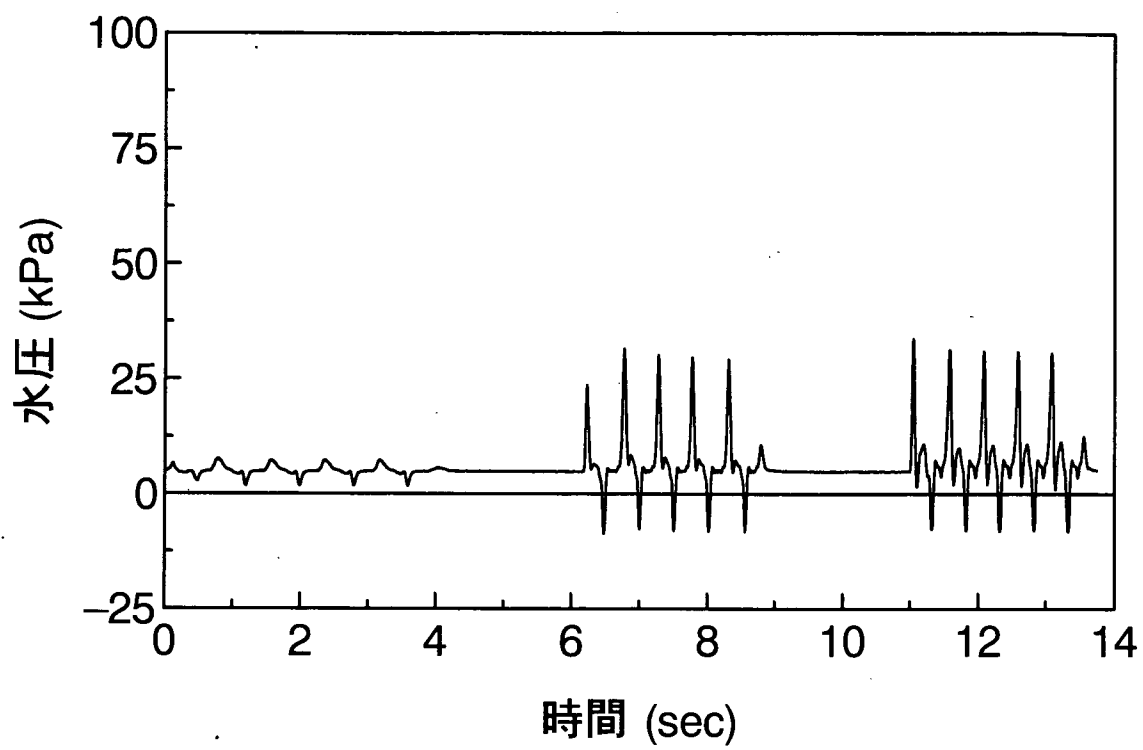


(e) W5



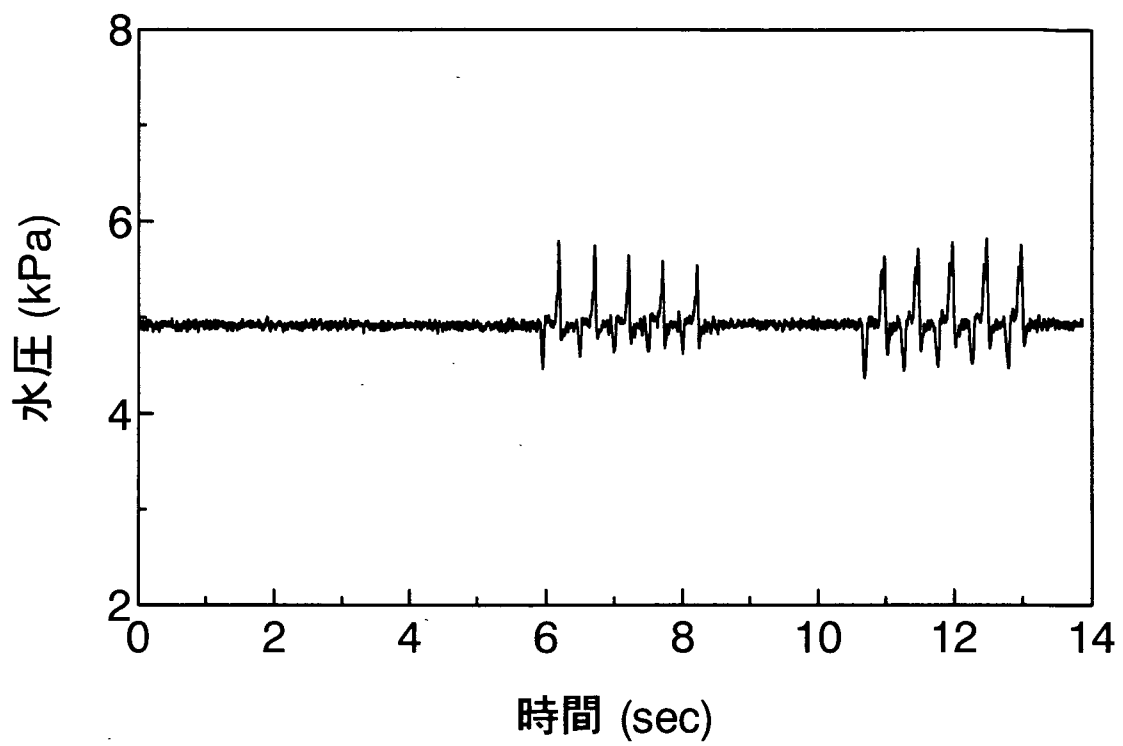
(f) W6

図一付 3.7.1-3 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

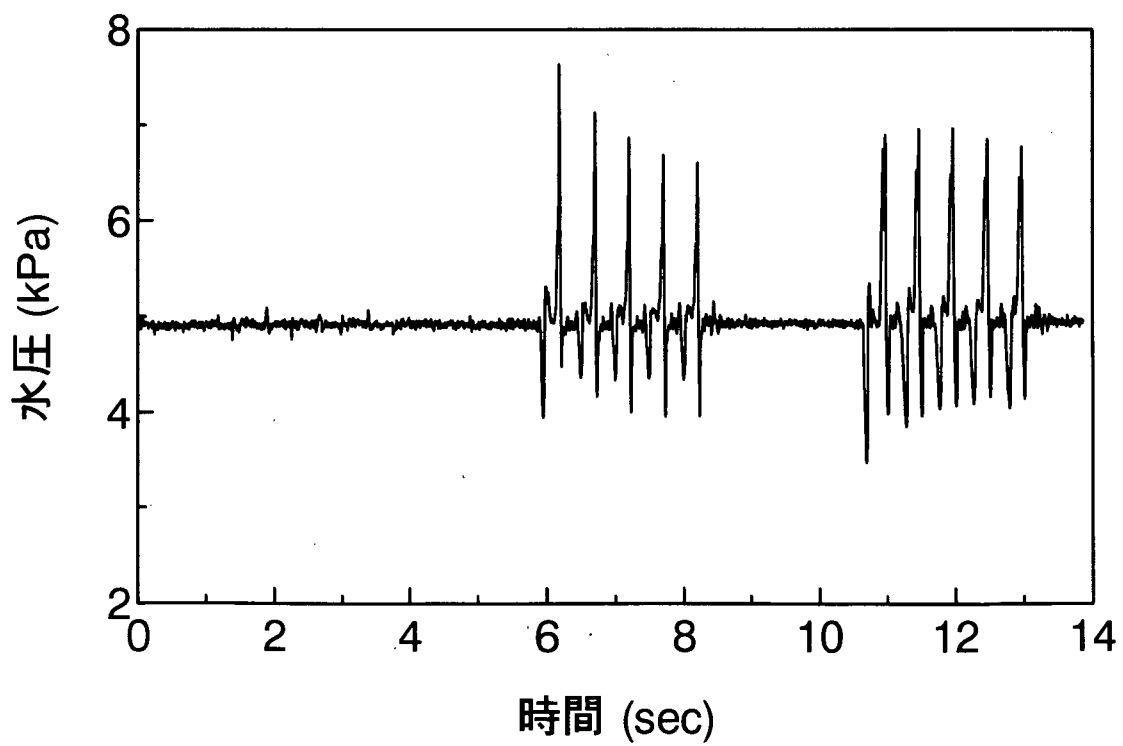


(g) W7

図一付 3.7.1-4 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

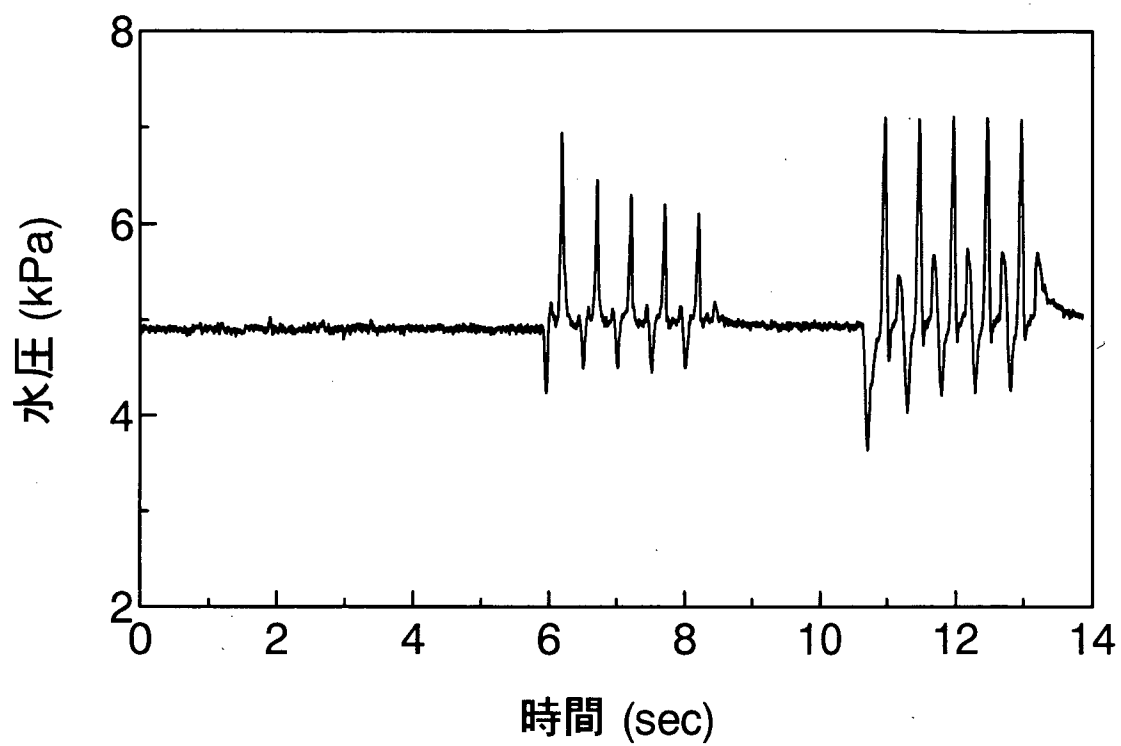


(a) W1

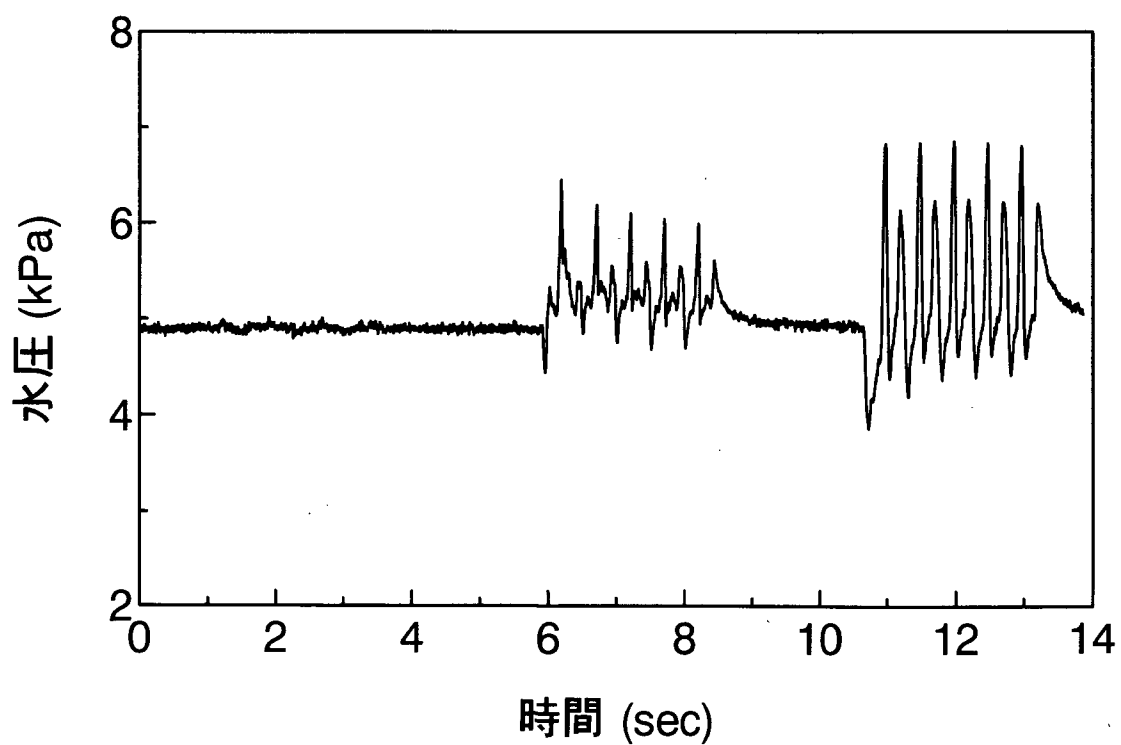


(b) W2

図-付 3.7.2-1 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

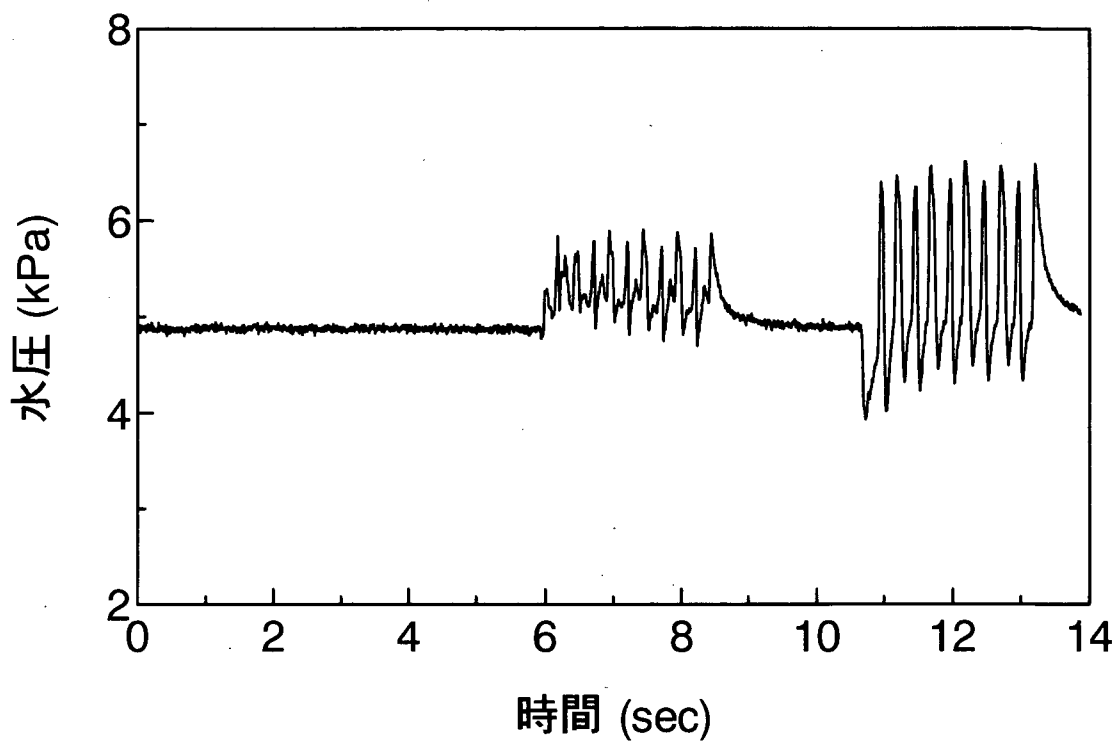


(c) W3

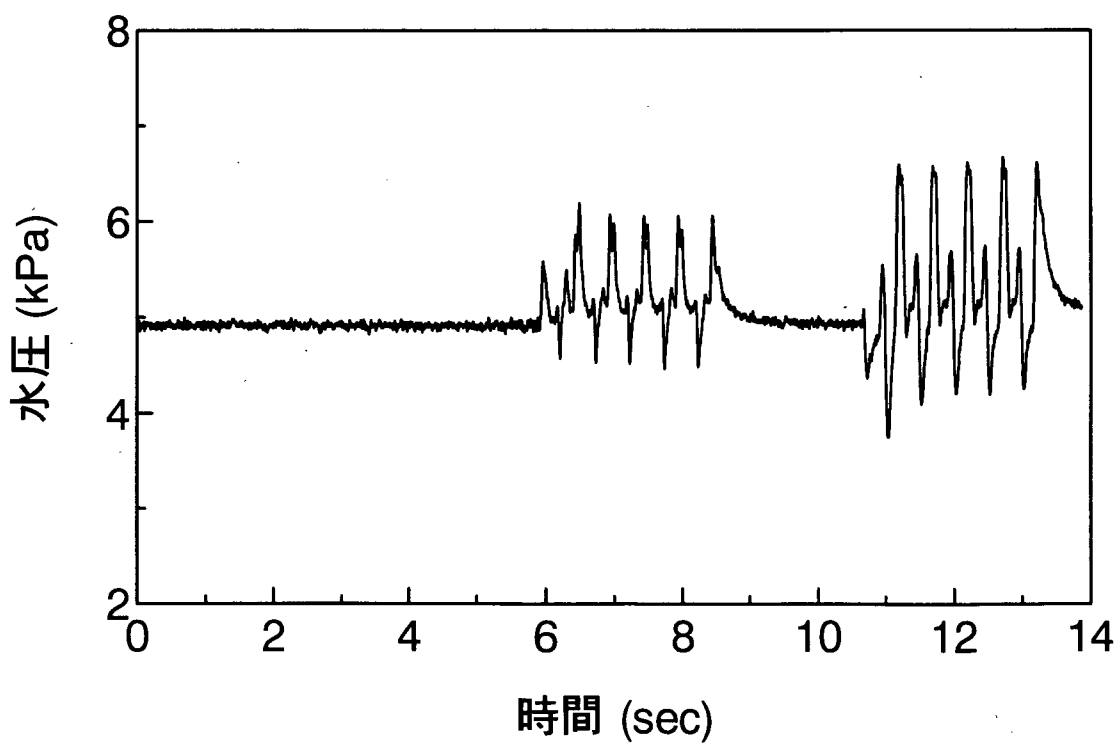


(d) W4

図-付 3.7.2-2 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

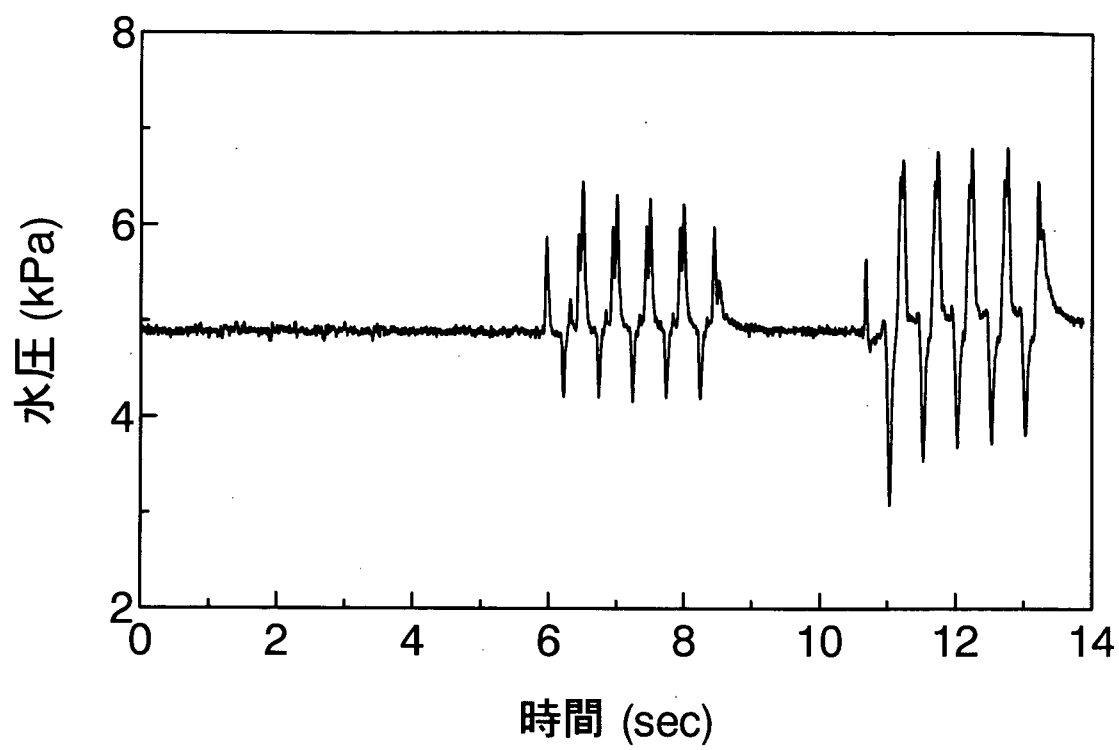


(e) W5



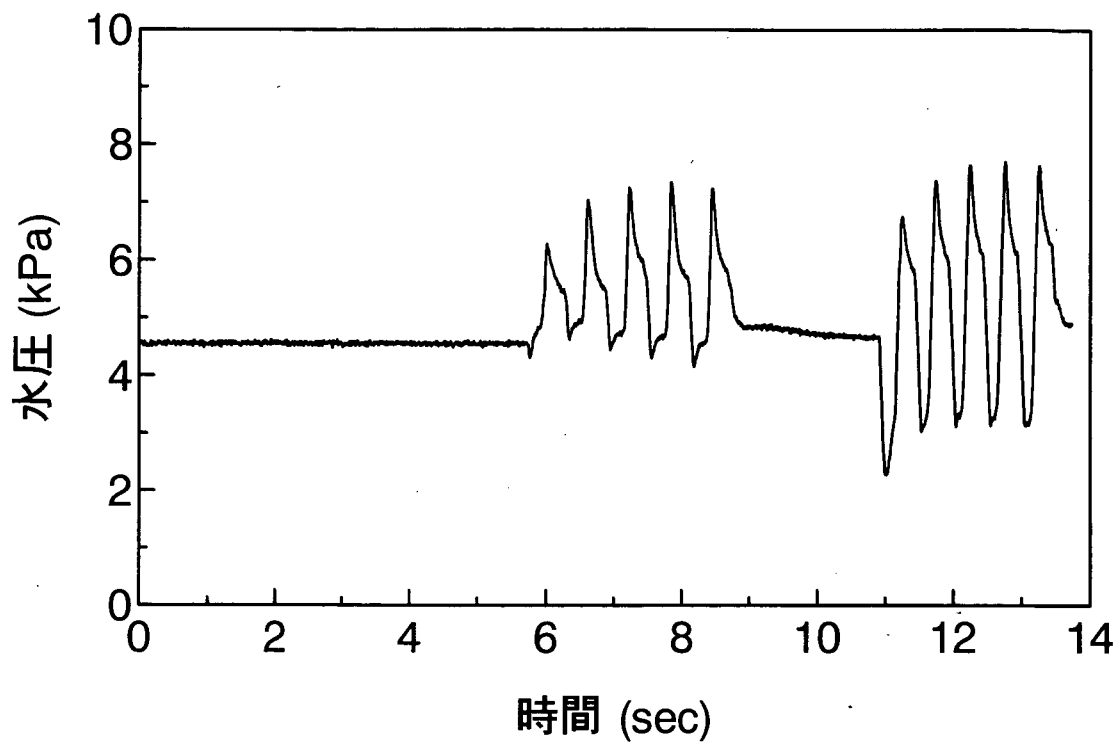
(f) W6

図一付 3.7.2-3 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

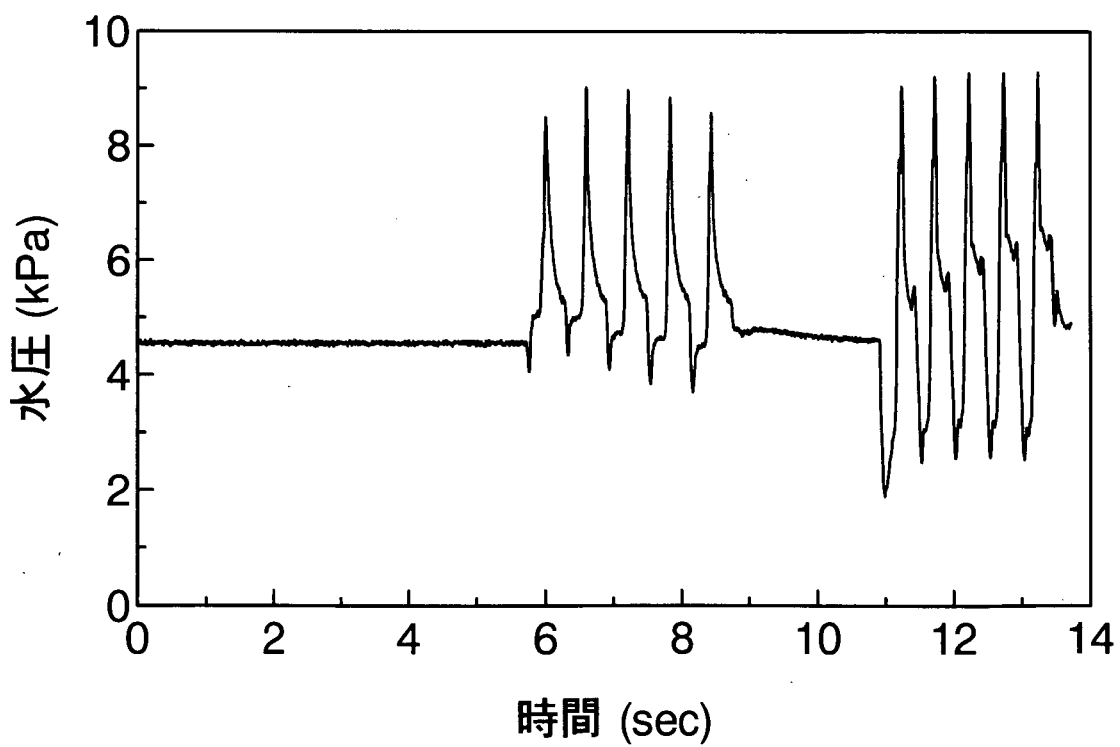


(g) W7

図-付 3.7.2-4 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

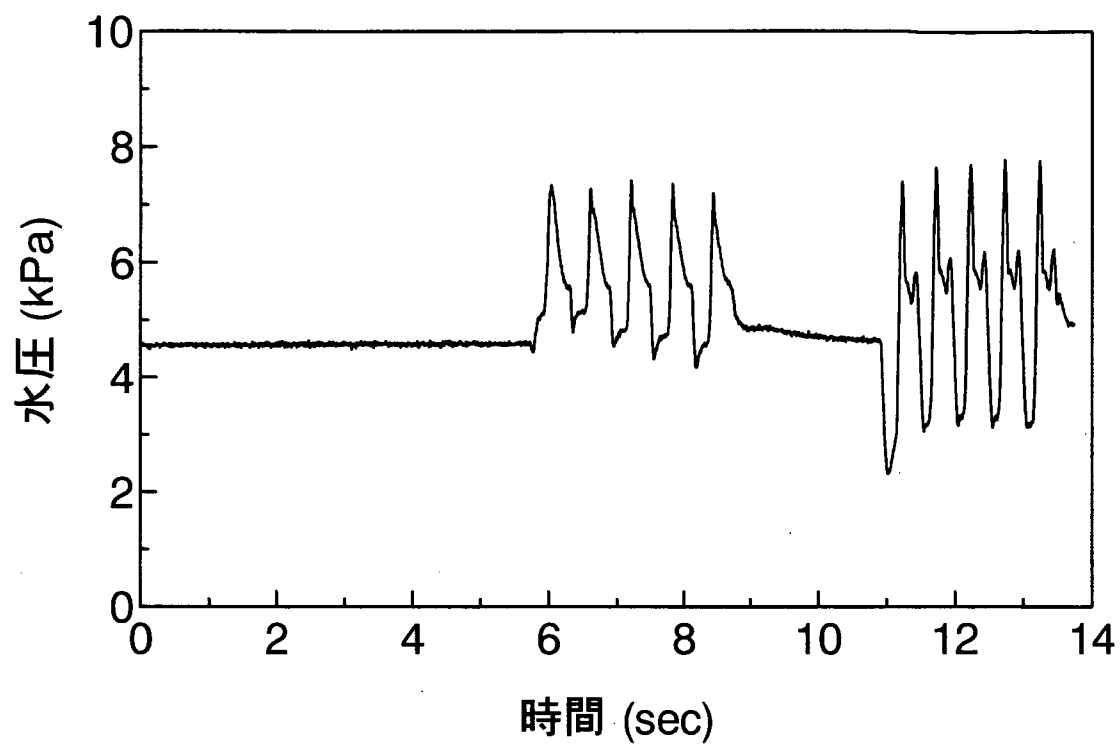


(a) W1

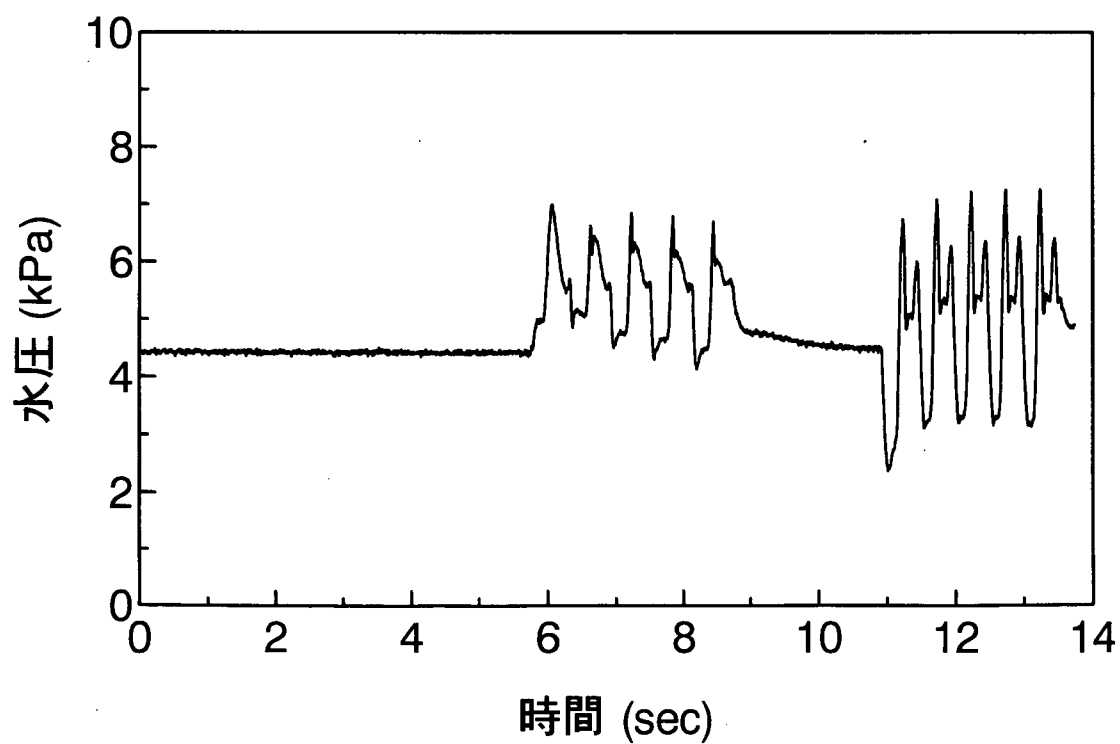


(b) W2

図-付 3.7.3-1 c34: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

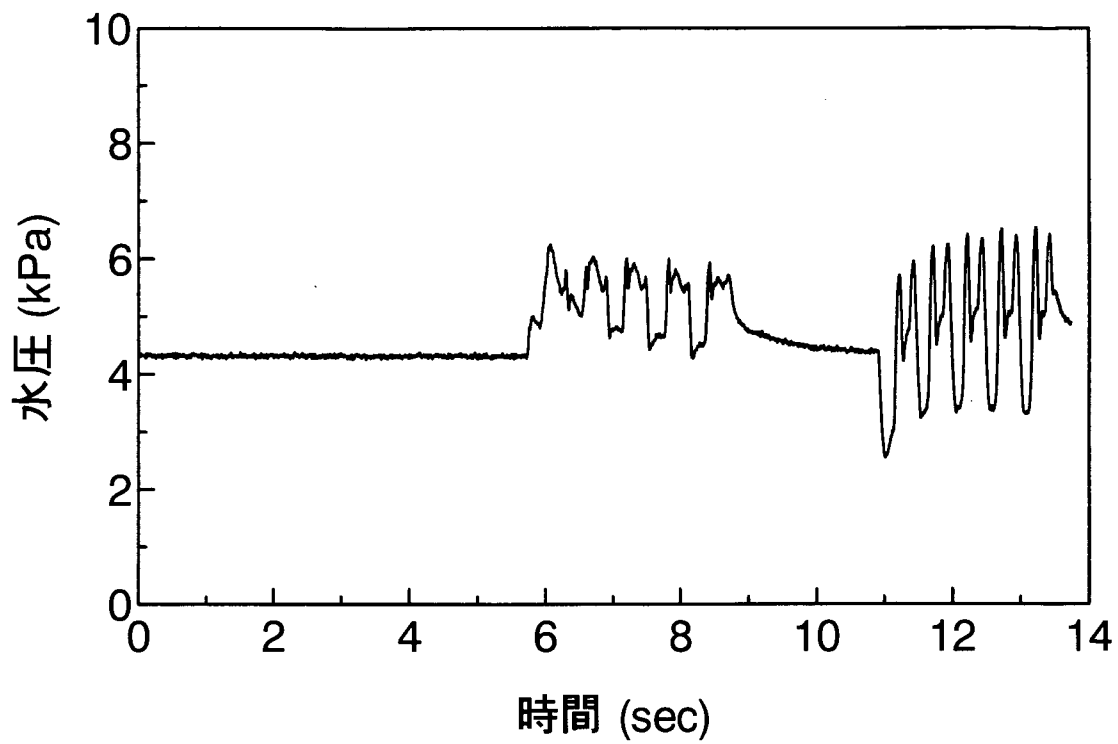


(c) W3

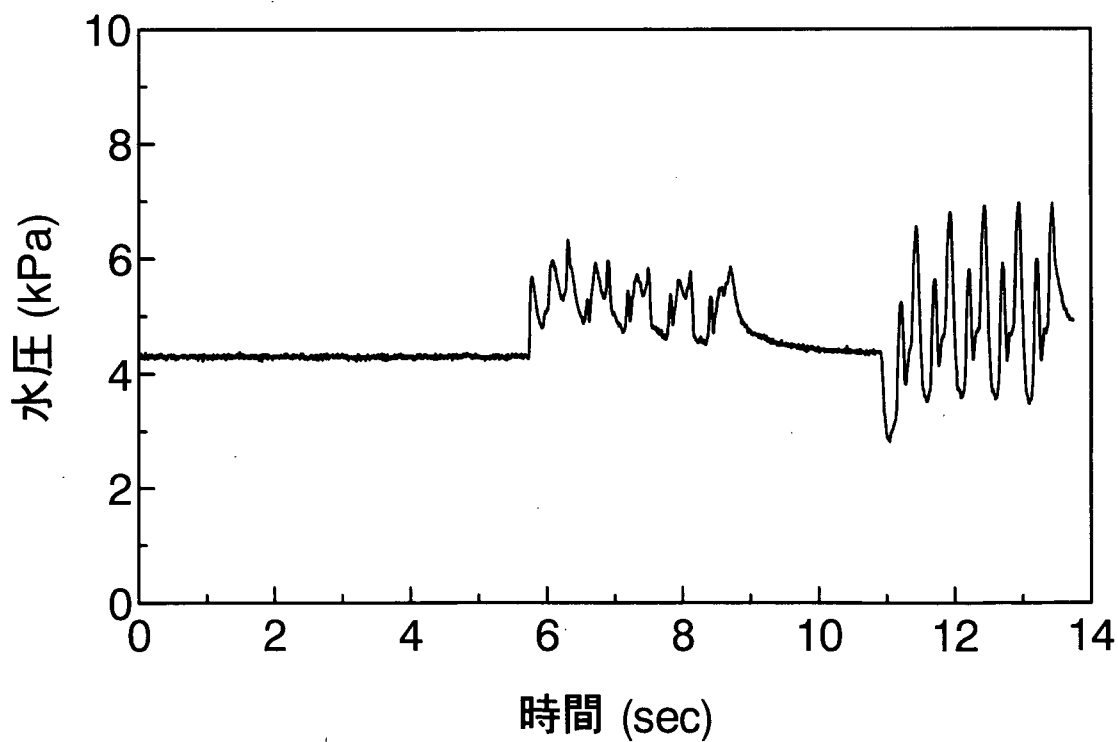


(d) W4

図-付 3.7.3-2 c34: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

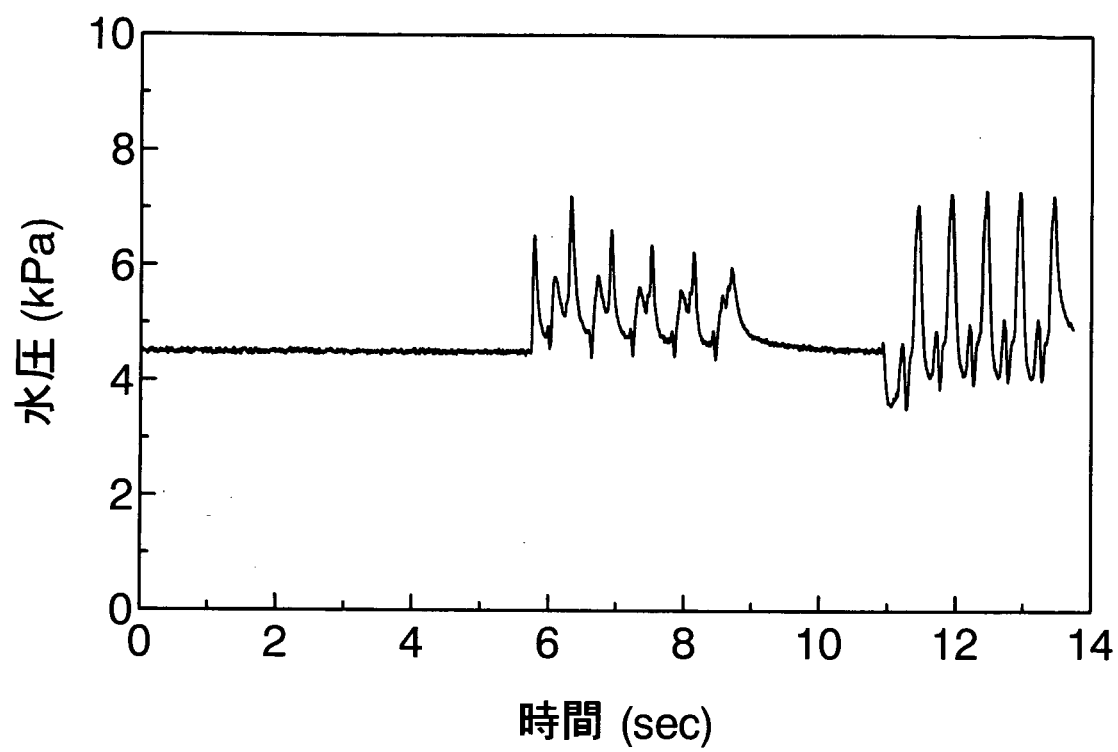


(e) W5



(f) W6

図一付 3.7.3-3 c34: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

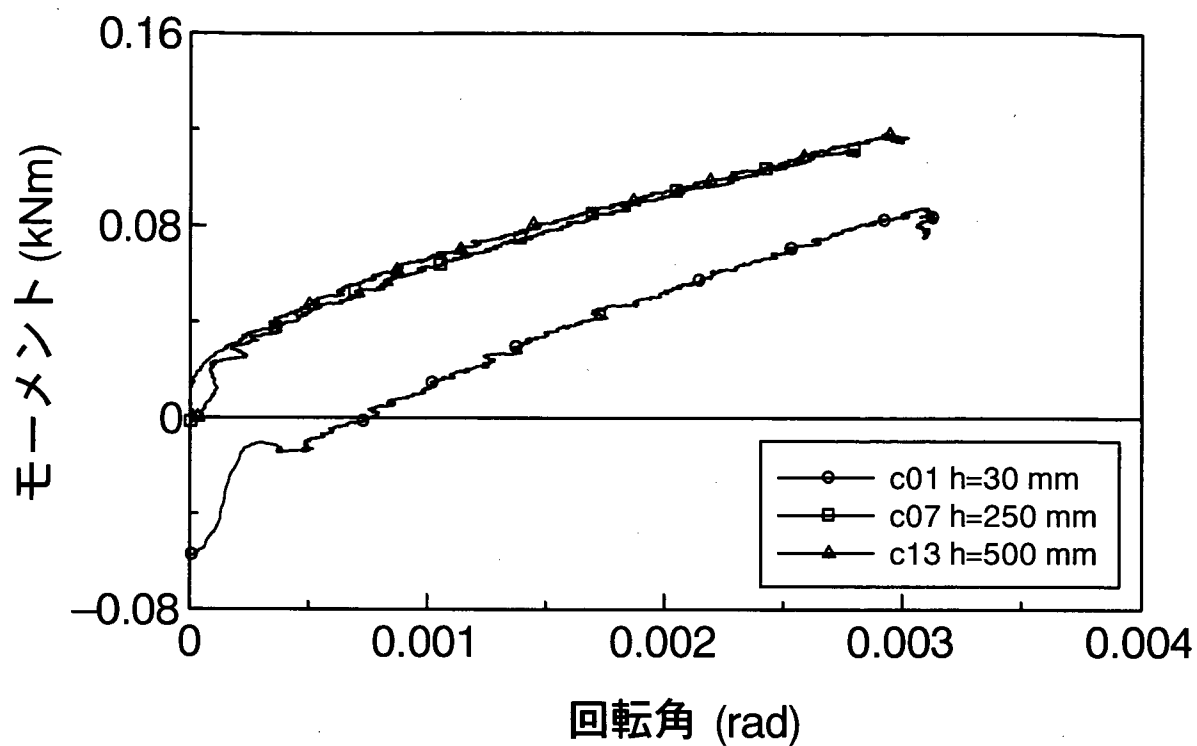


(g) W7

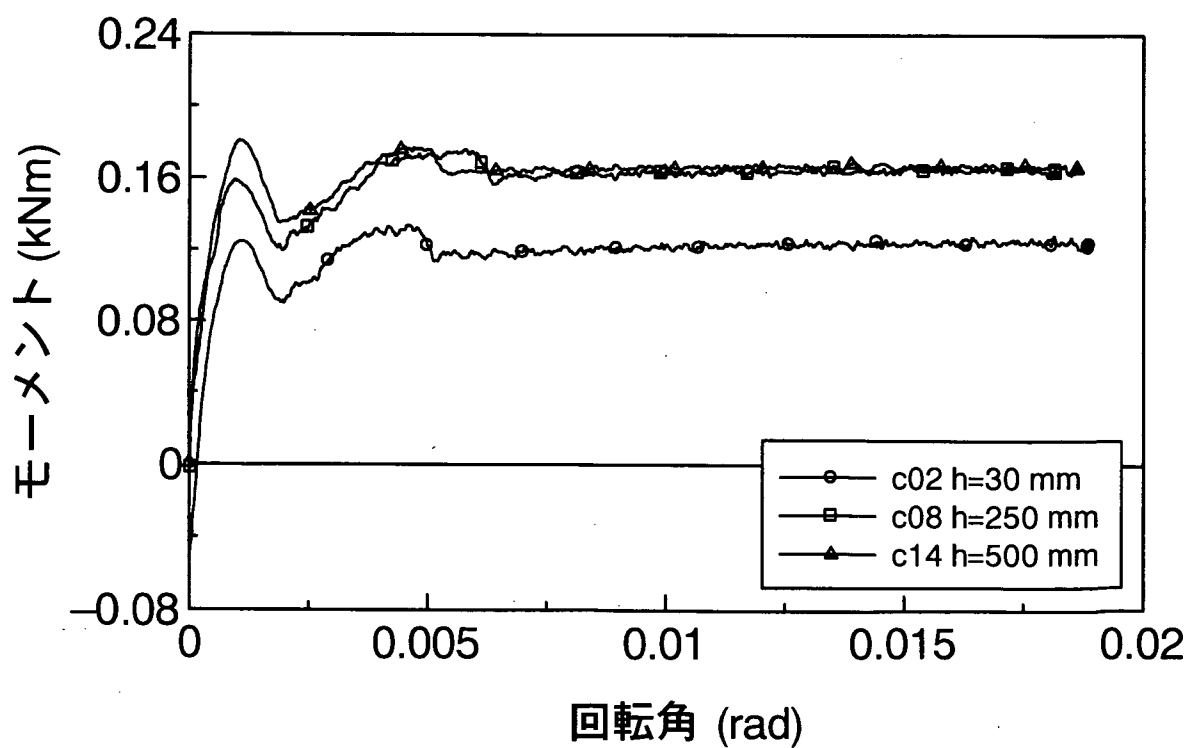
図-付 3.7.3-4 c34: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

4. モーメント～回転角 関係

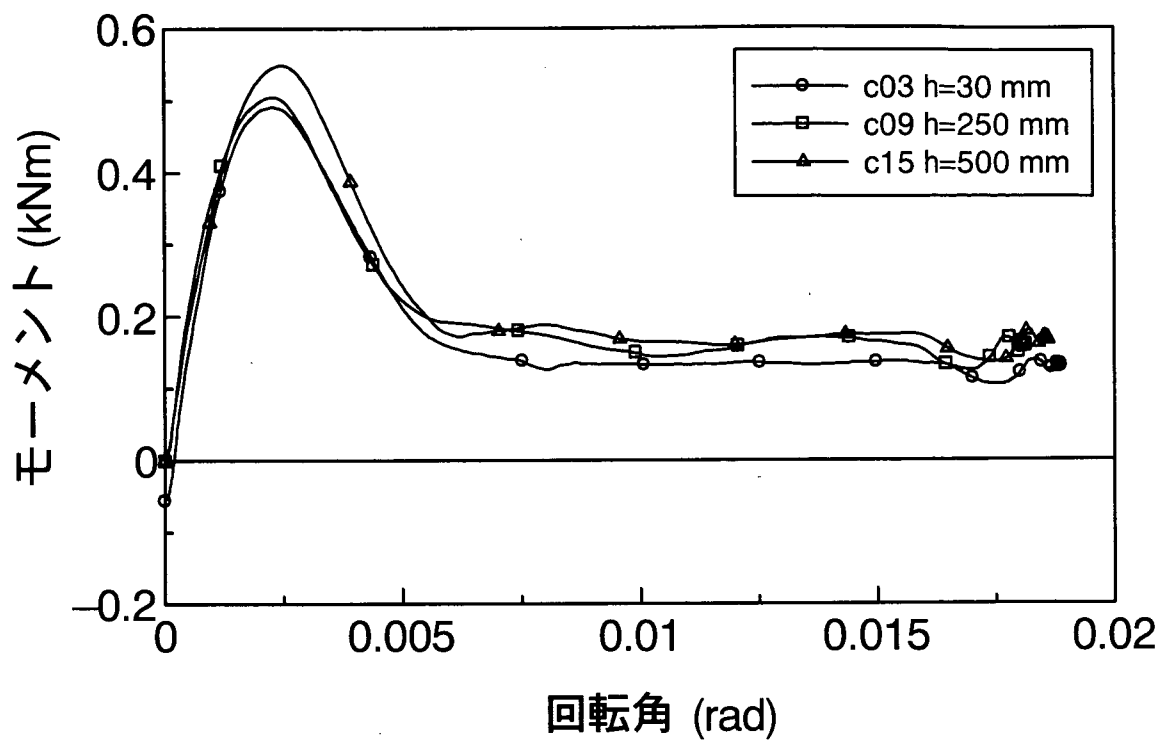
4.1 水深の影響



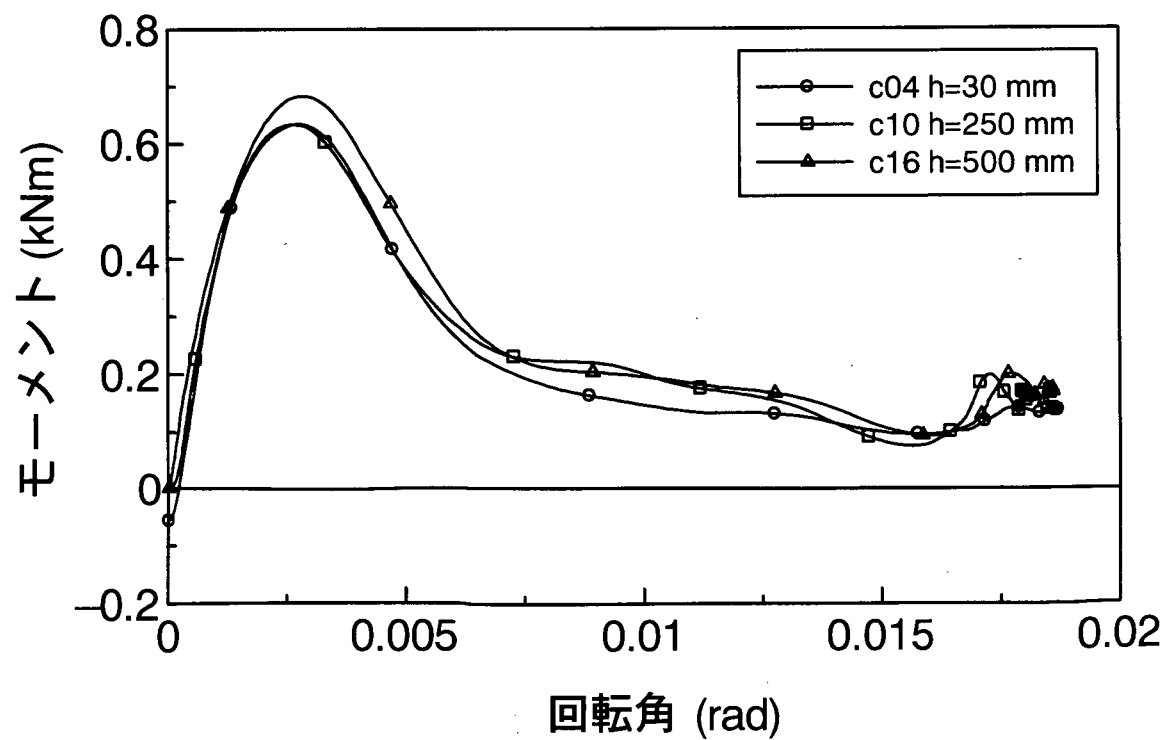
図一付 4.1.1 回転角速度 $\omega = 0.0001 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 4.1.2 回転角速度 $\omega = 0.005 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 4.1.3 回転角速度 $\omega = 0.05 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤



図一付 4.1.4 回転角速度 $\omega = 0.1 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤

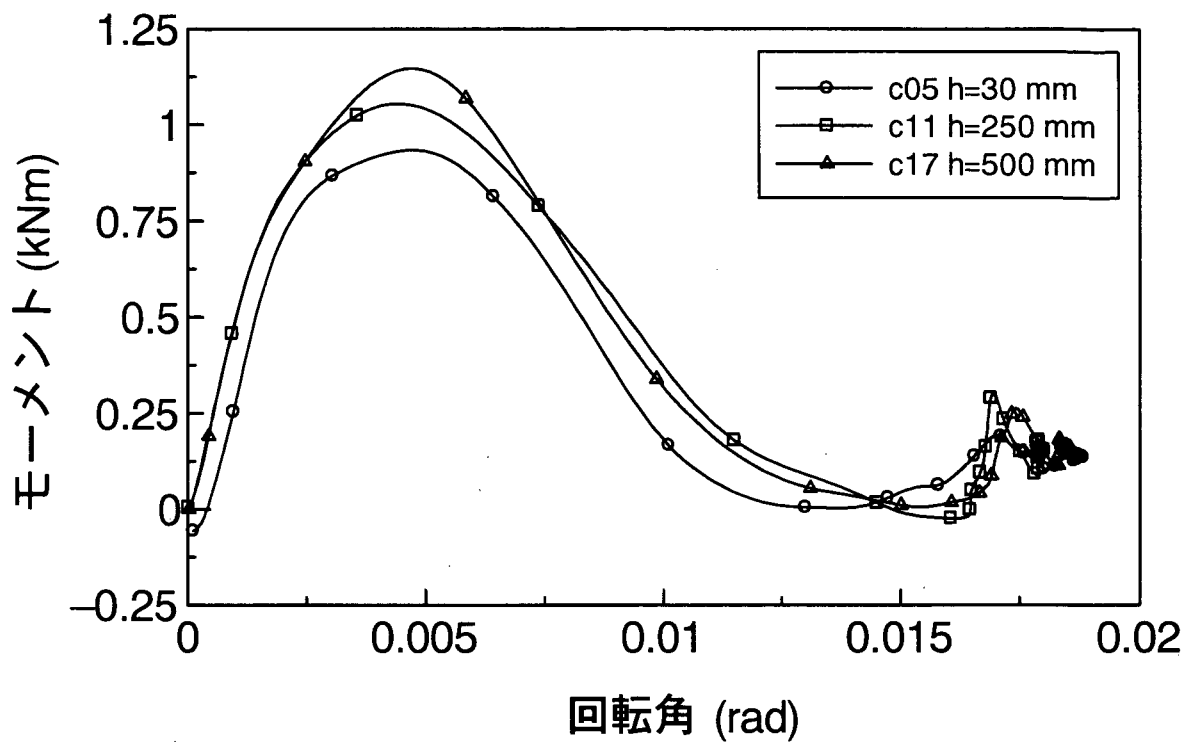


図-付 4.1.5 回転角速度 $\omega = 0.2 \text{ rad/sec}$, 弾性地盤

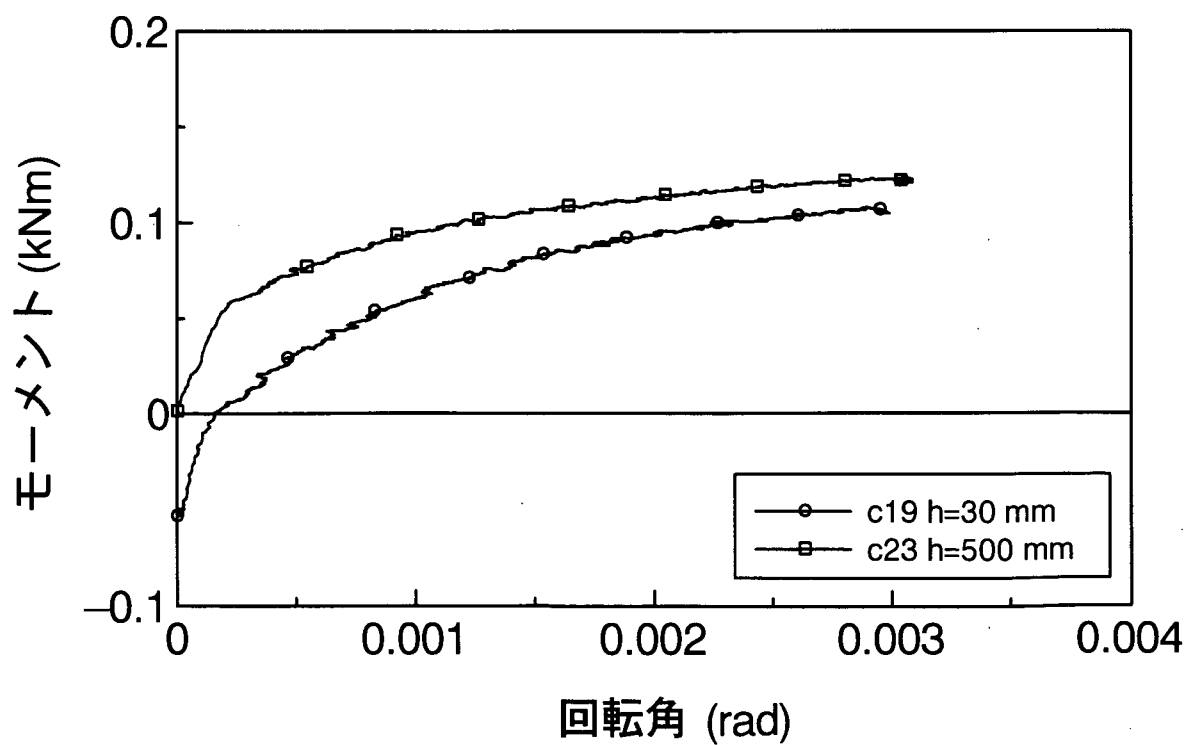


図-付 4.1.6 回転角速度 $\omega = 0.005 \text{ rad/sec}$, 砂地盤

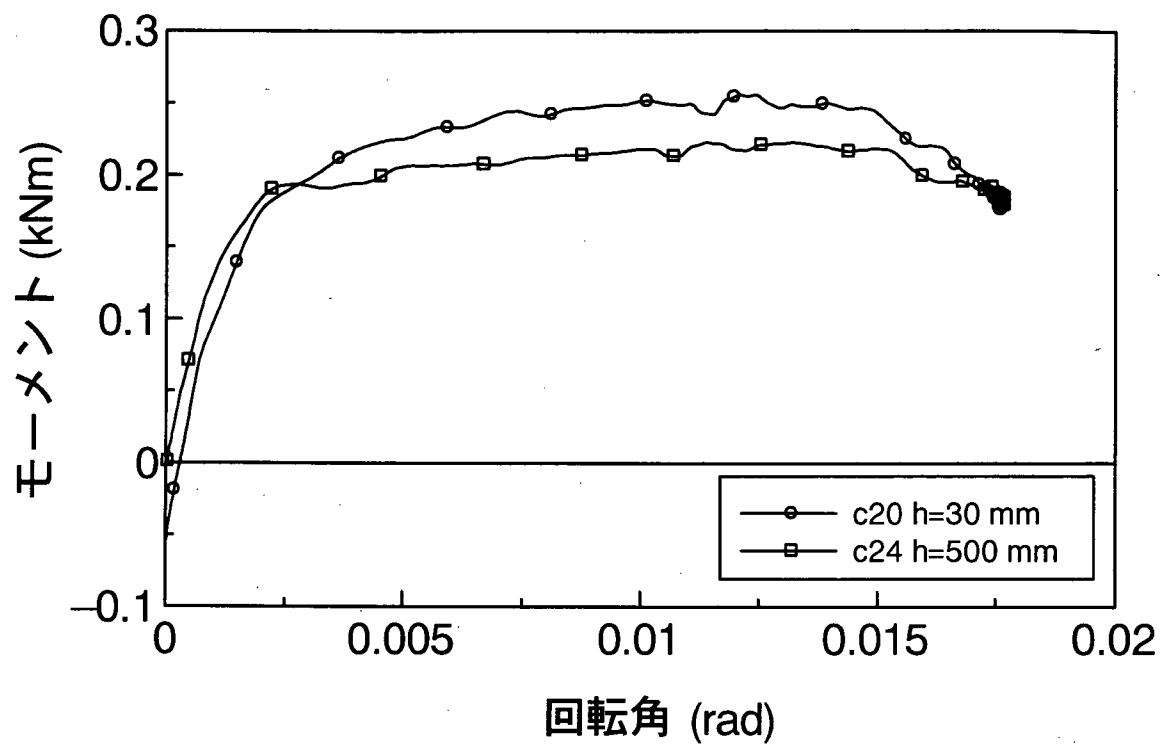


図-付 4.1.7 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤

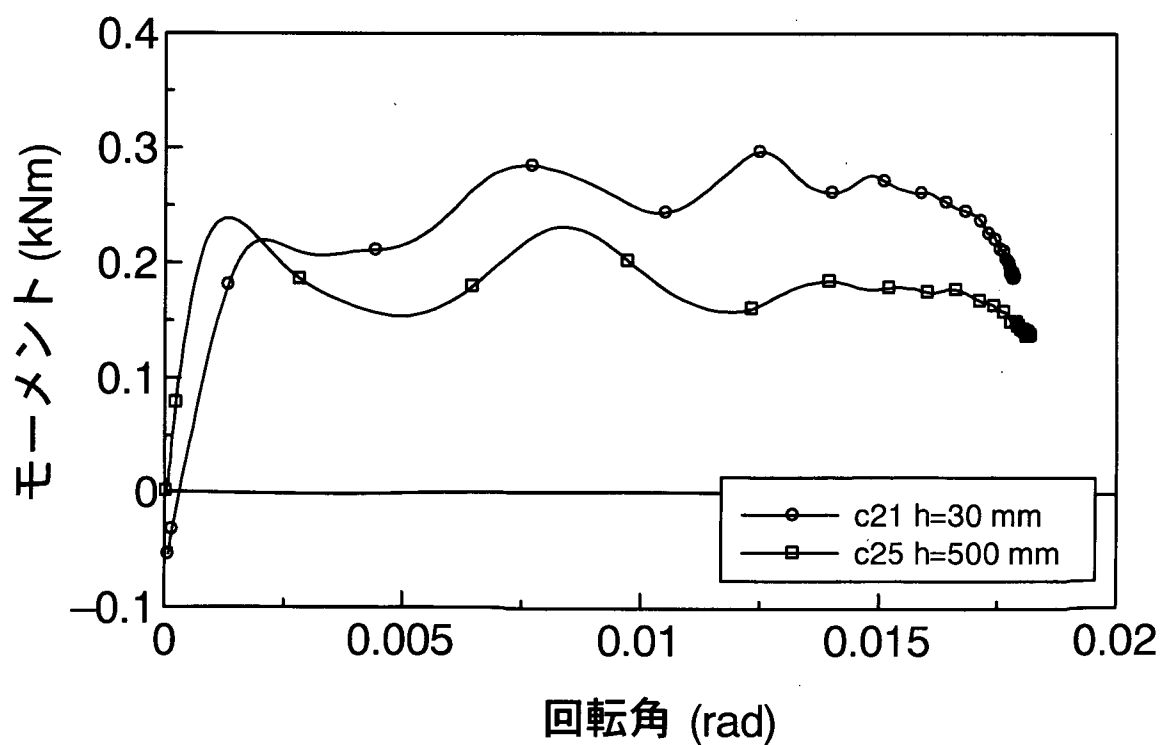


図-付 4.1.8 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤

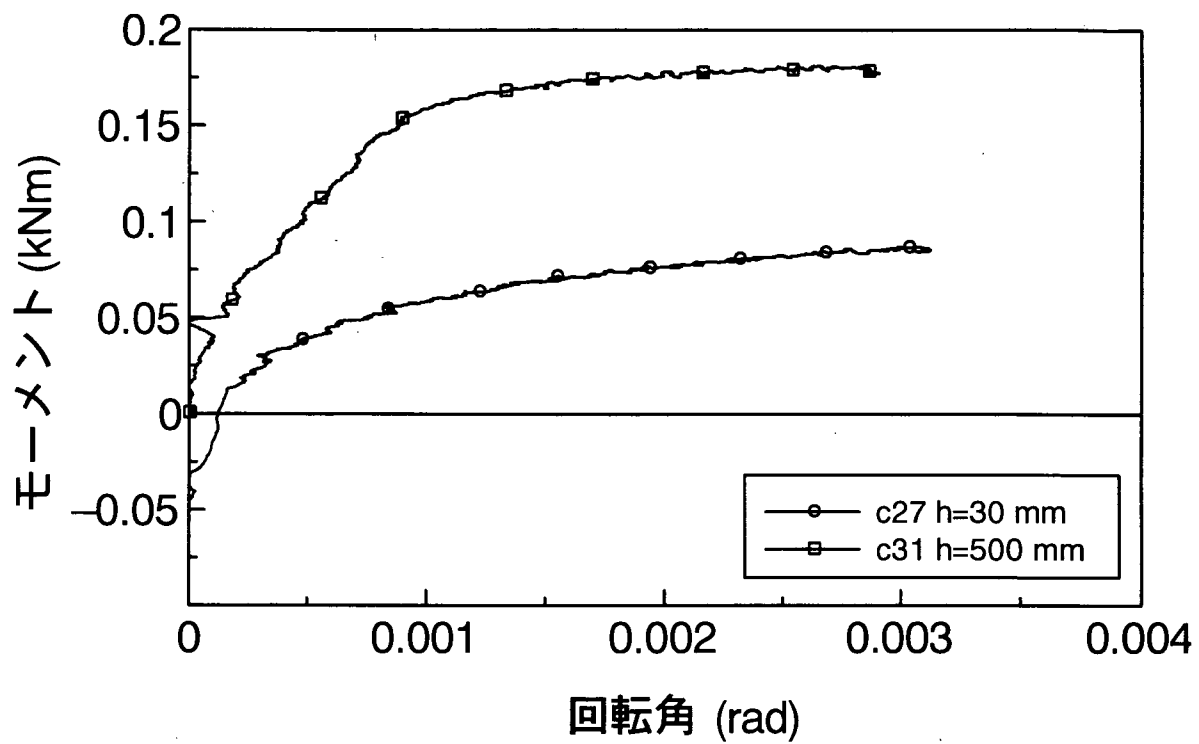


図-付 4.1.9 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

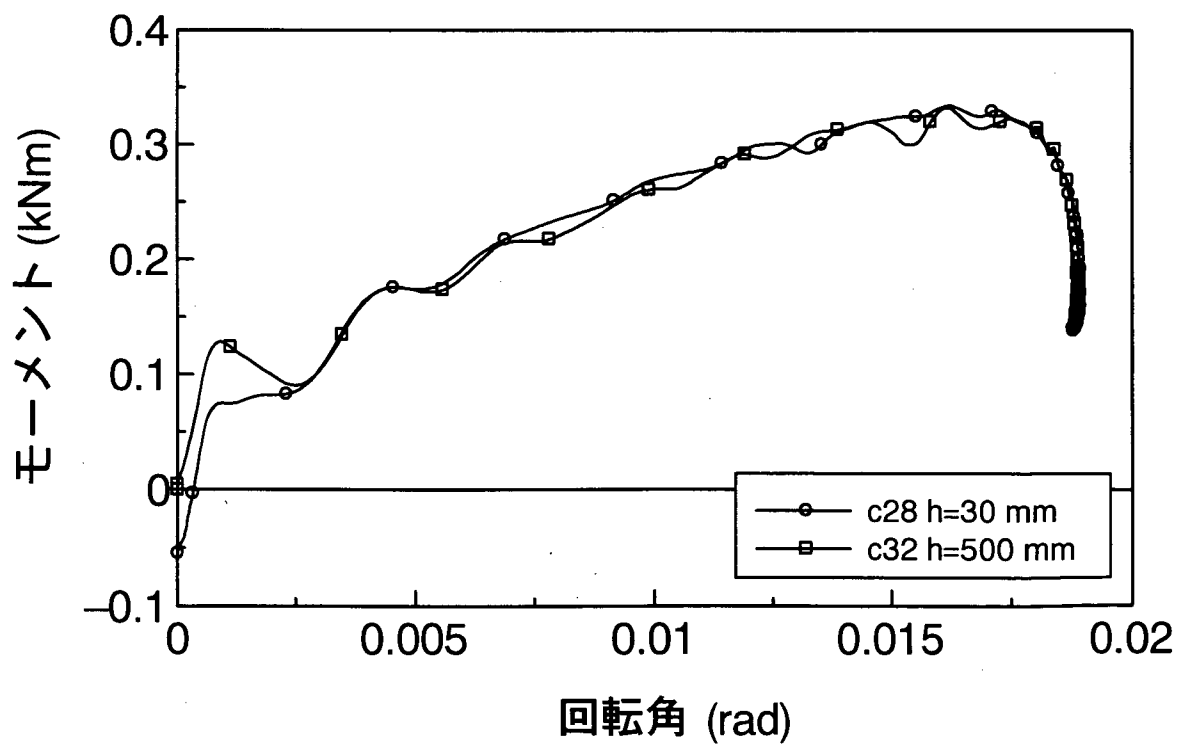


図-付 4.1.10 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

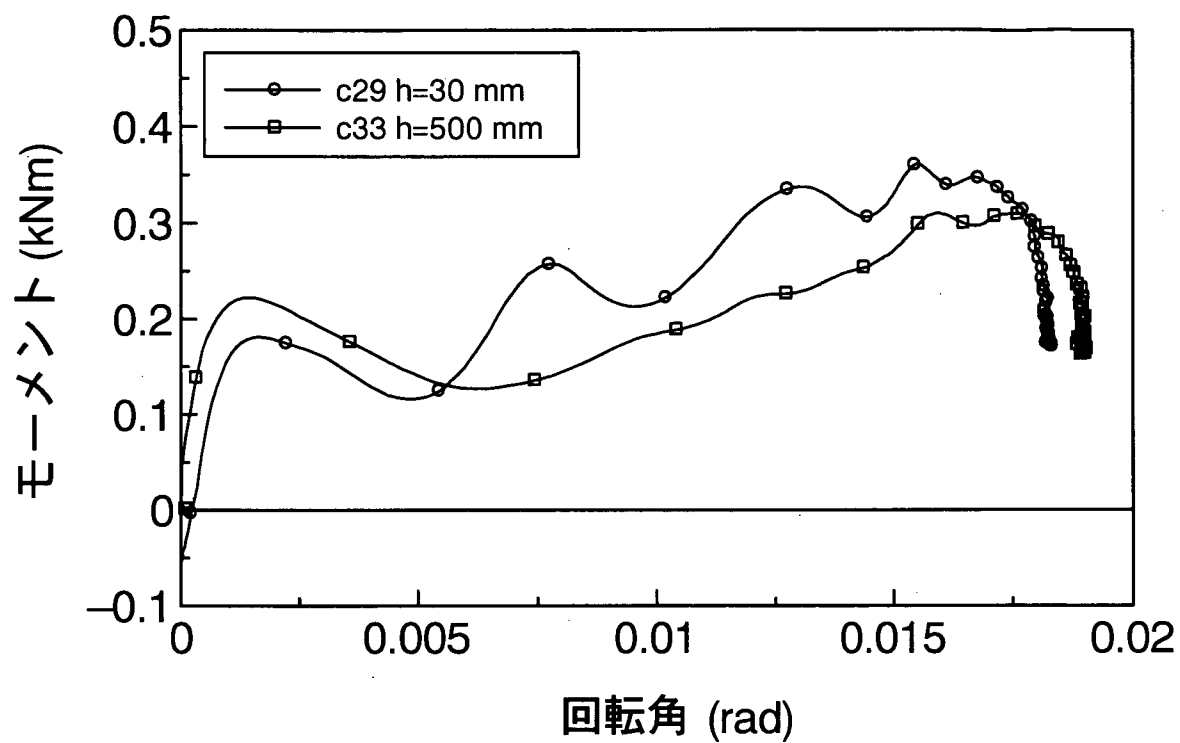


図-付 4.1.11 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)

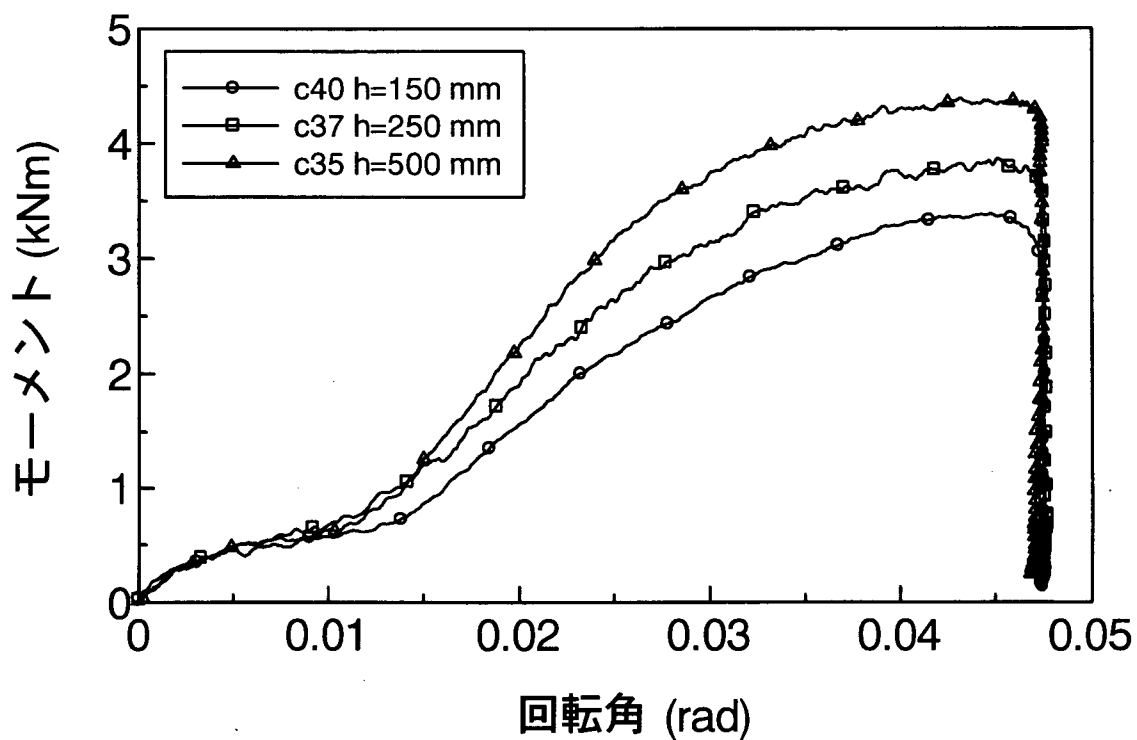
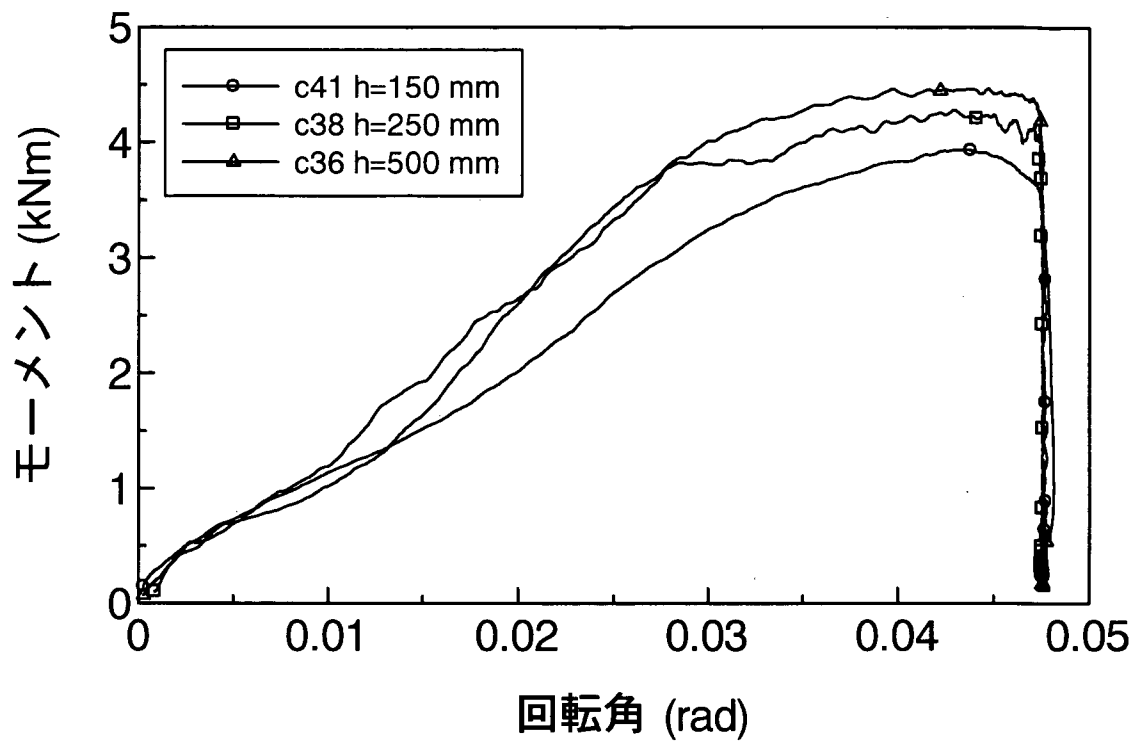


図-付 4.1.12 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)



図一付 4.1.13 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

4.2 回転角速度の影響

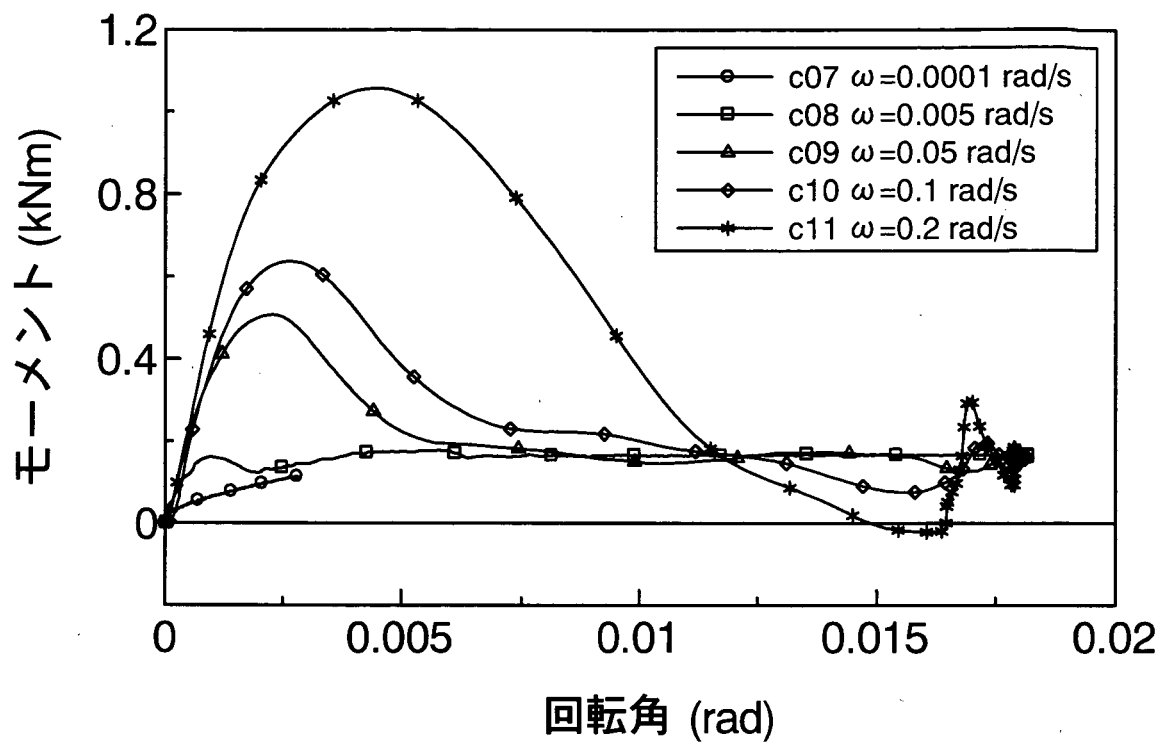


図-付 4.2.1 水深 $h=250\text{mm}$, 弾性地盤

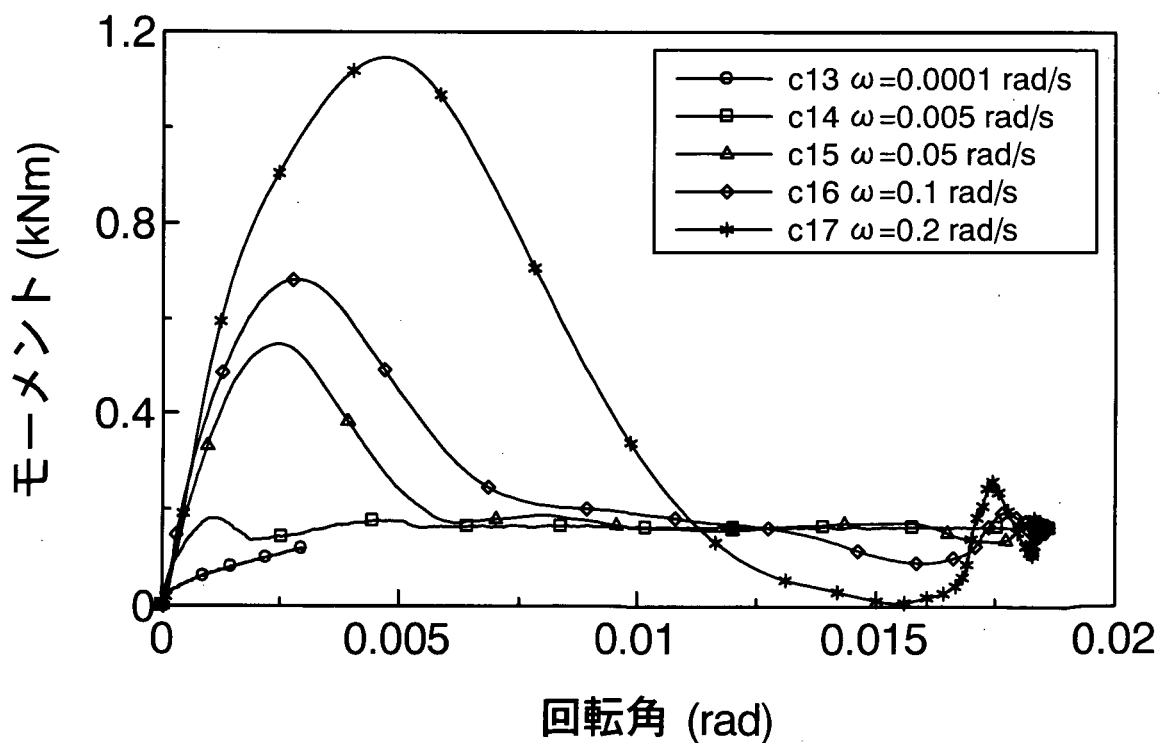


図-付 4.2.2 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

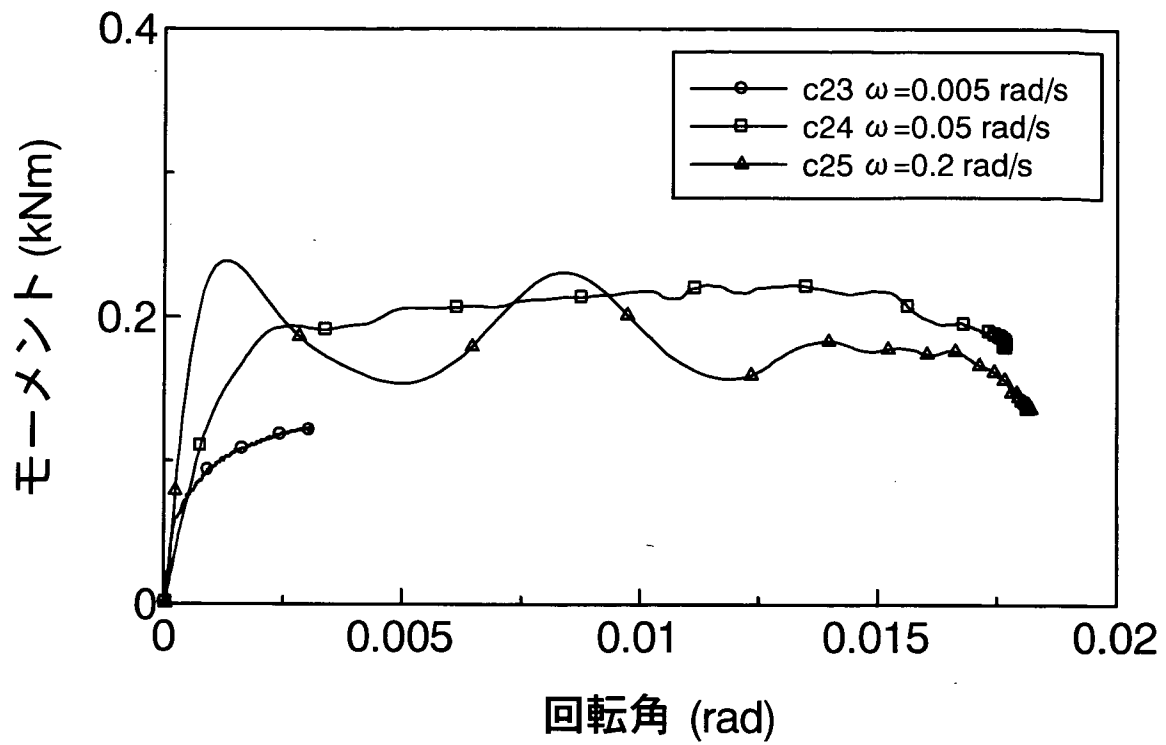


図-付 4.2.3 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤

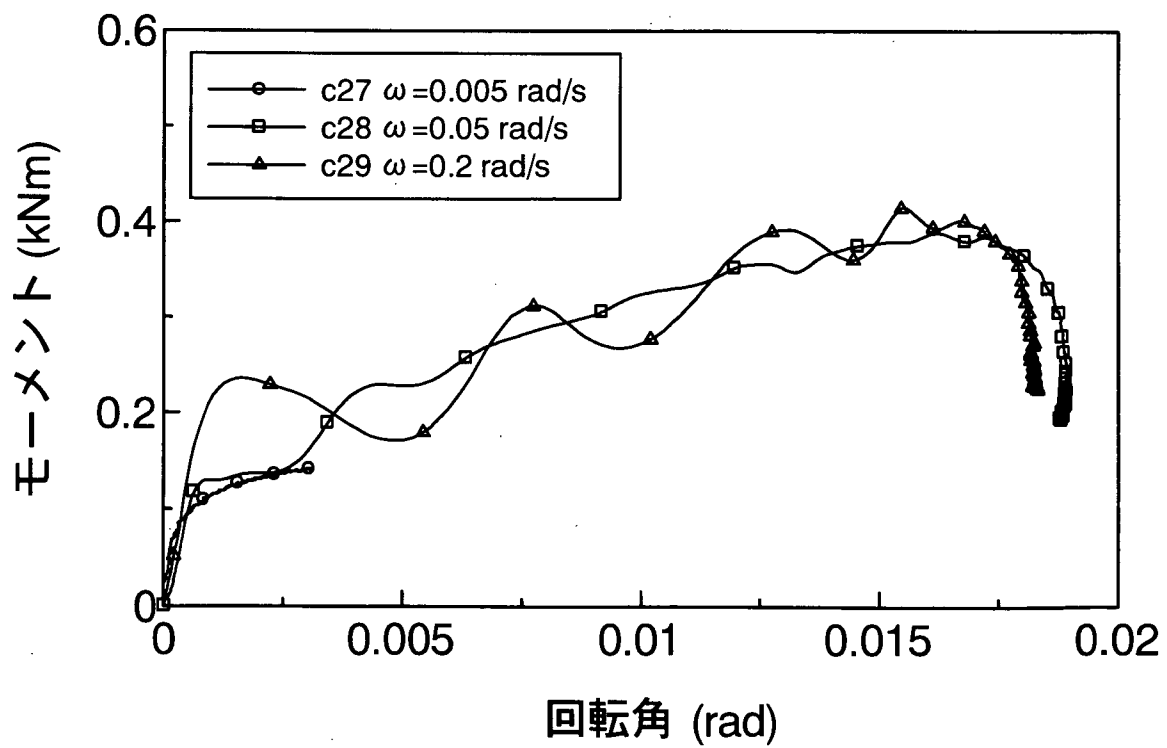


図-付 4.2.4 水深 $h=30\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

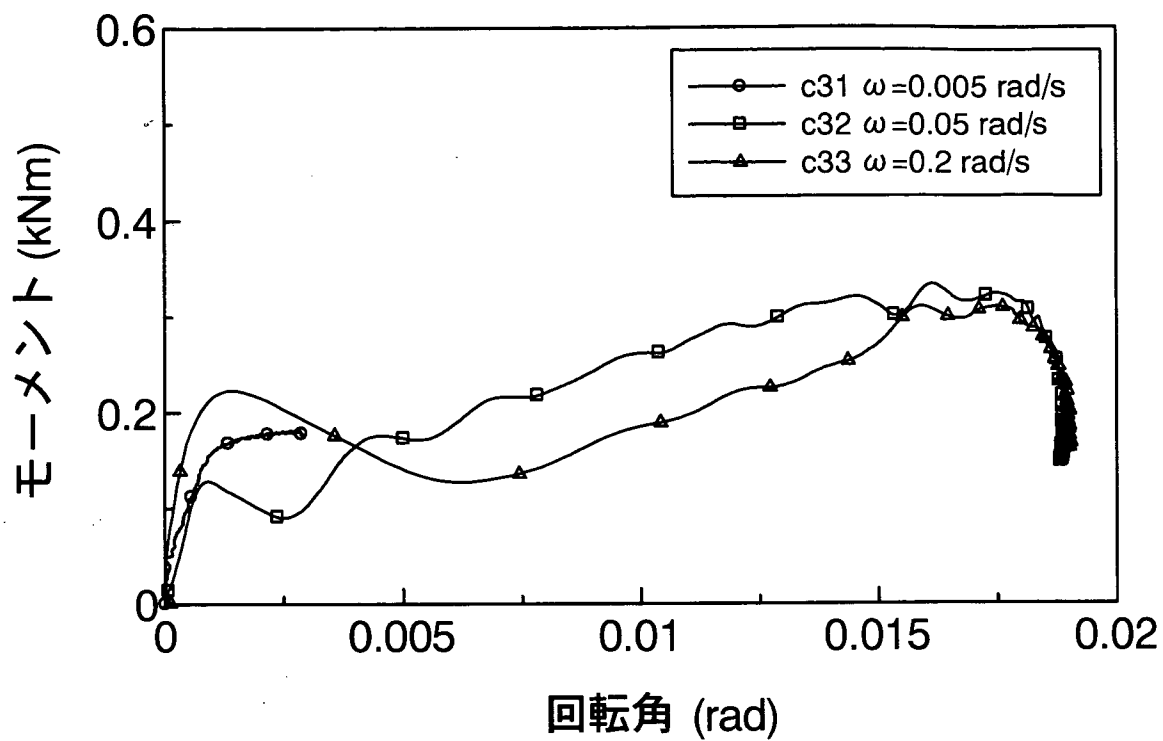


図-付 4.2.5 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

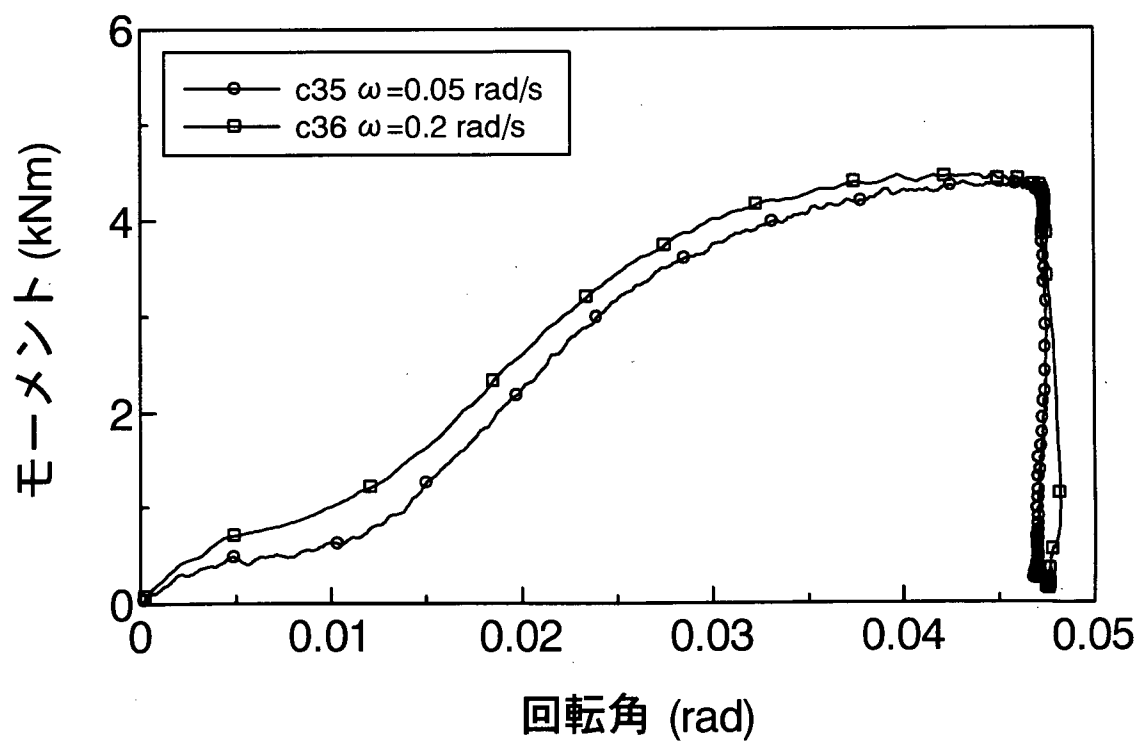


図-付 4.2.6 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)

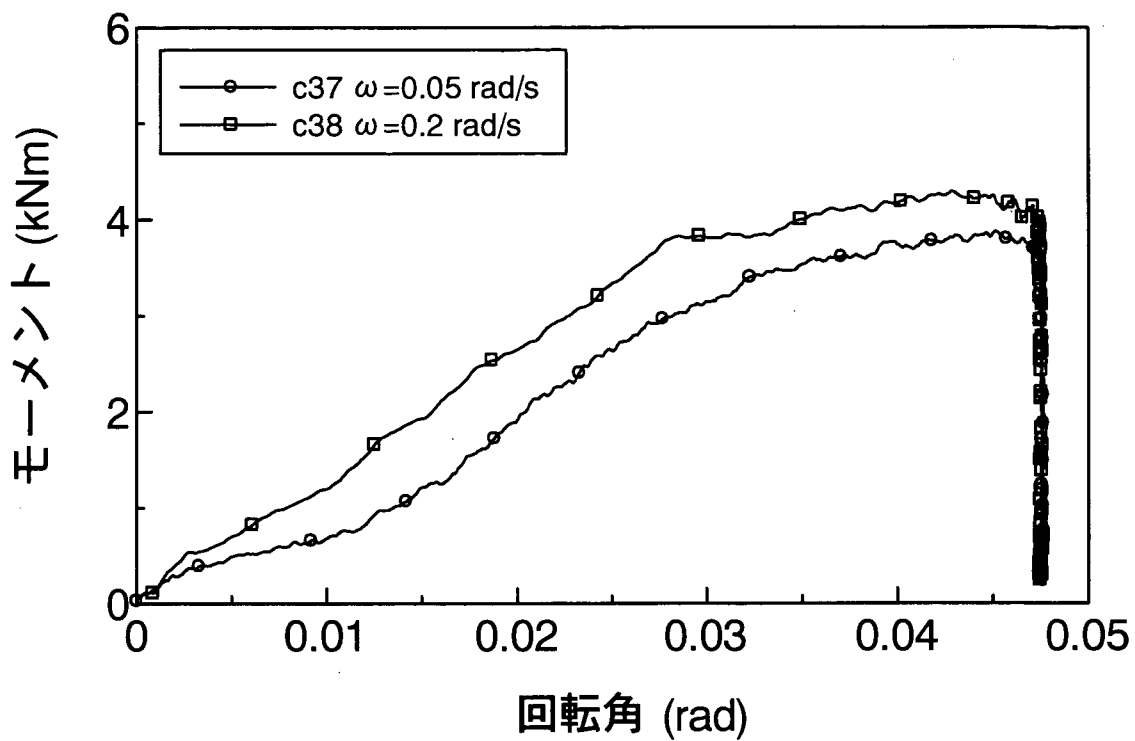


図-付 4.2.7 水深 $h=250$ mm, 弾性地盤(止水ゴムあり)

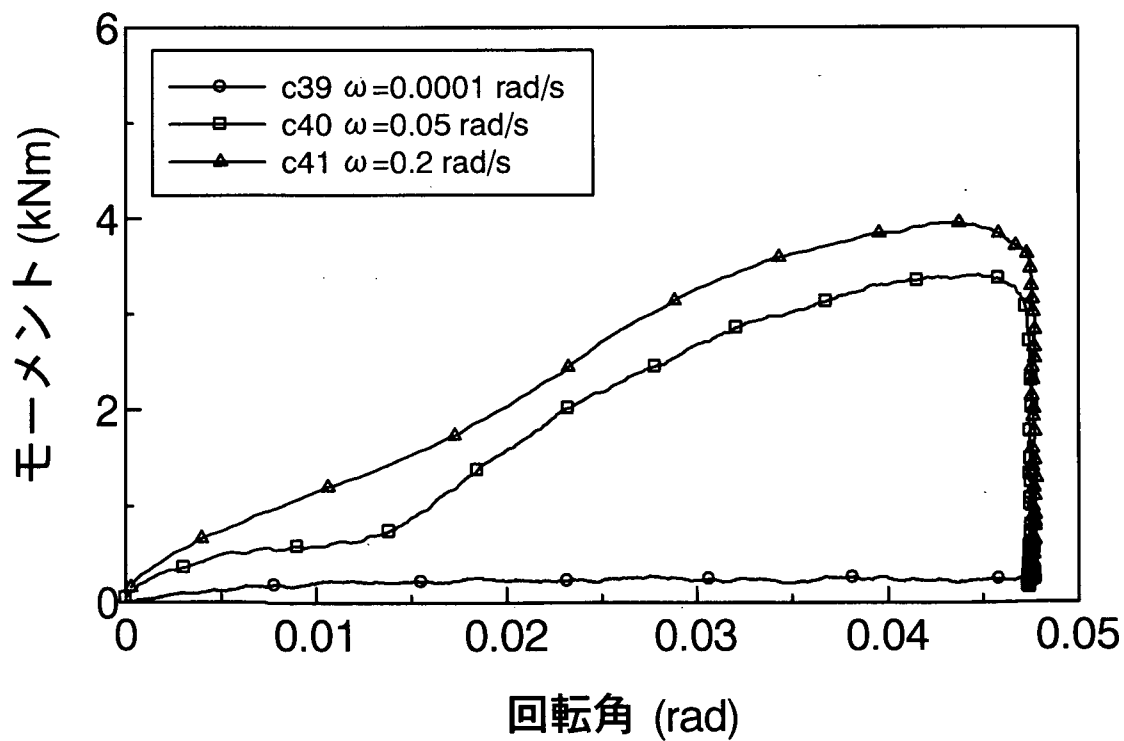


図-付 4.2.8 水深 $h=150$ mm, 弾性地盤(止水ゴムあり)

4.3 地盤条件の影響

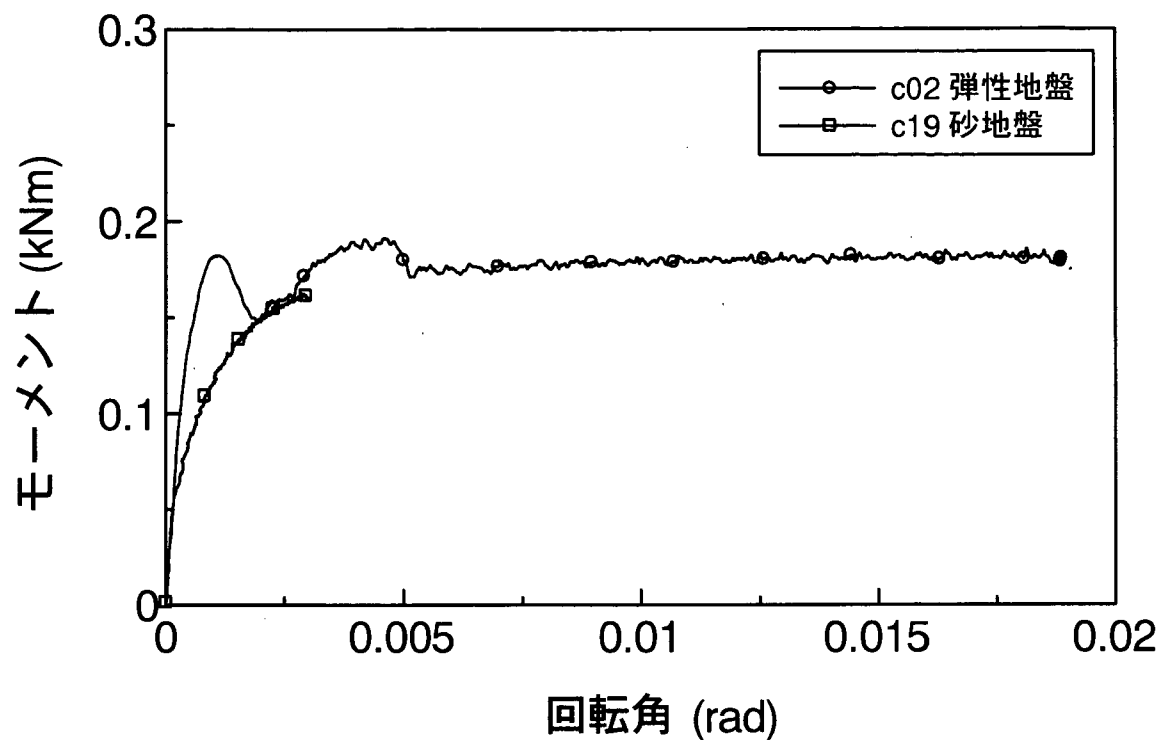


図-付 4.3.1 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$

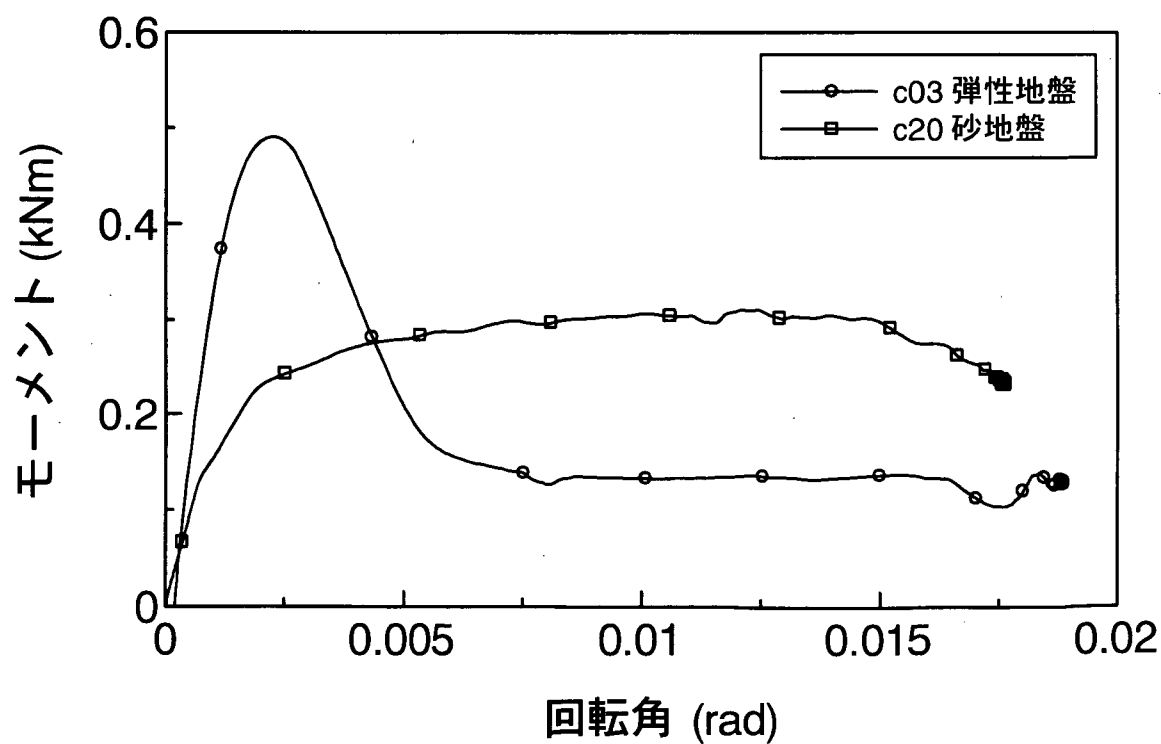


図-付 4.3.2 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

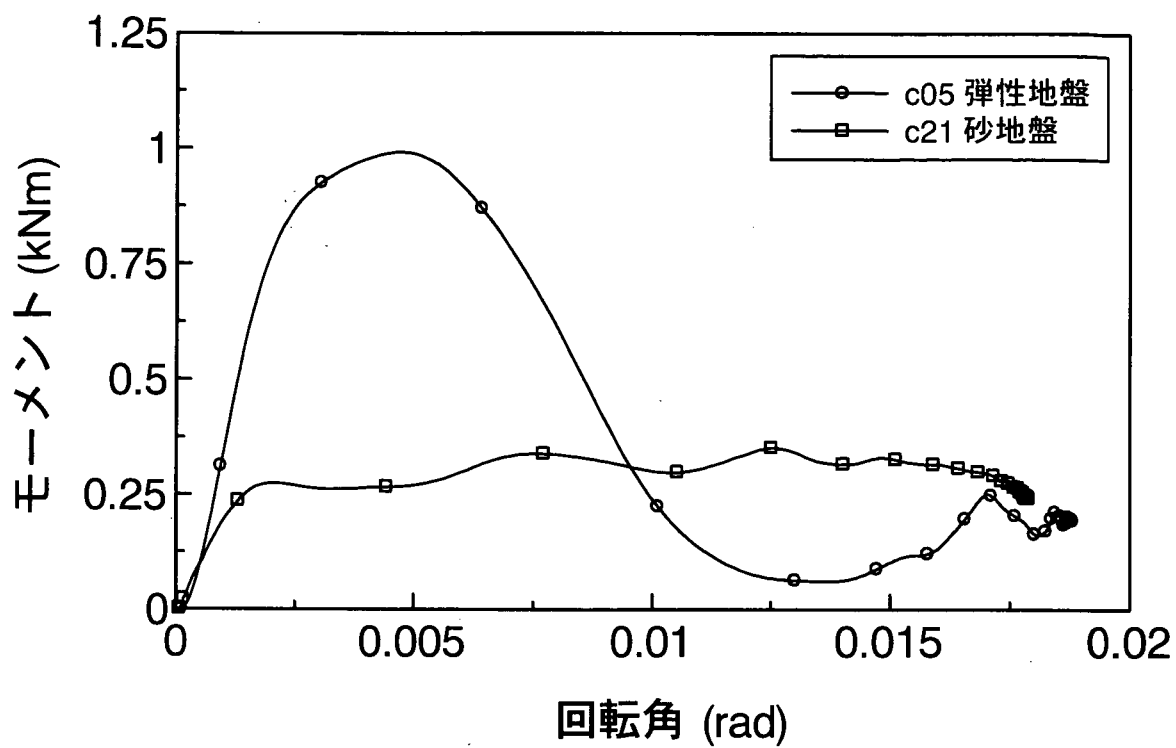


図-付 4.3.3 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

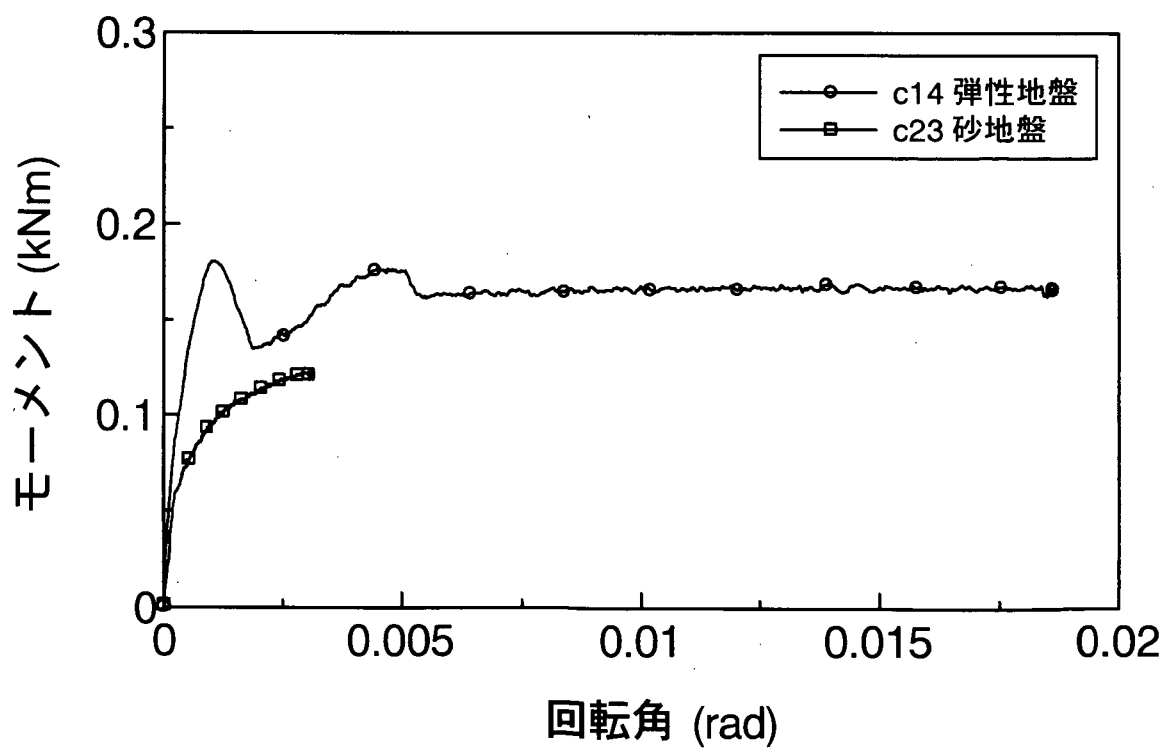
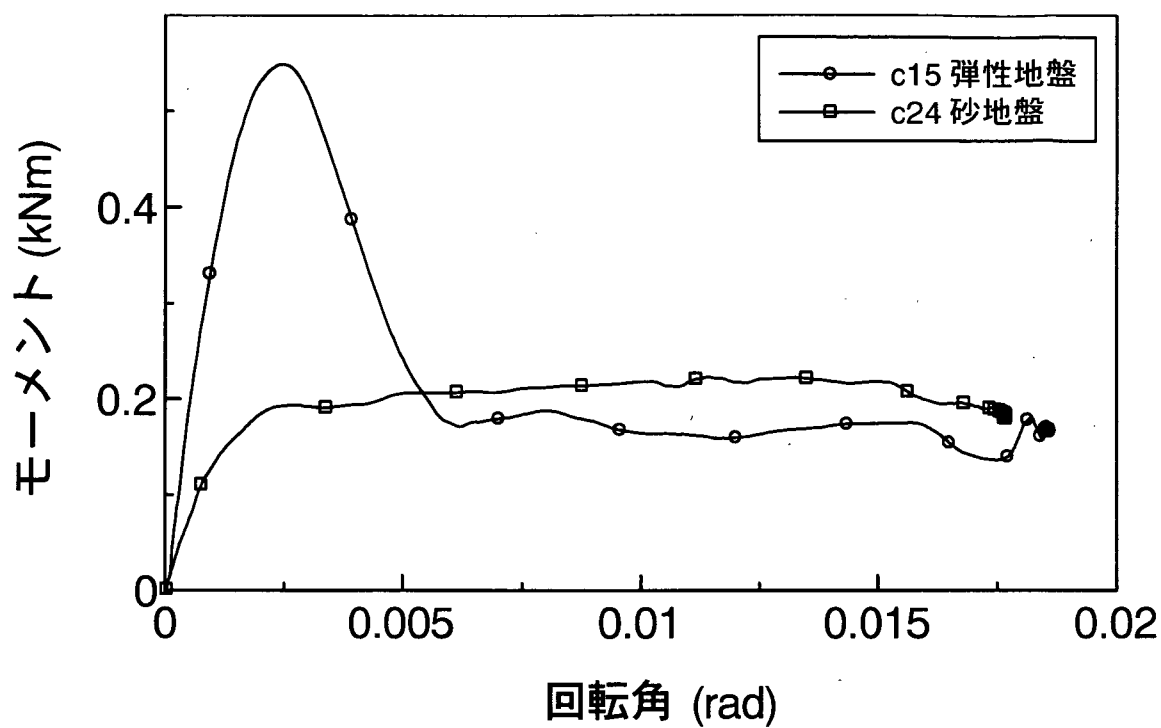
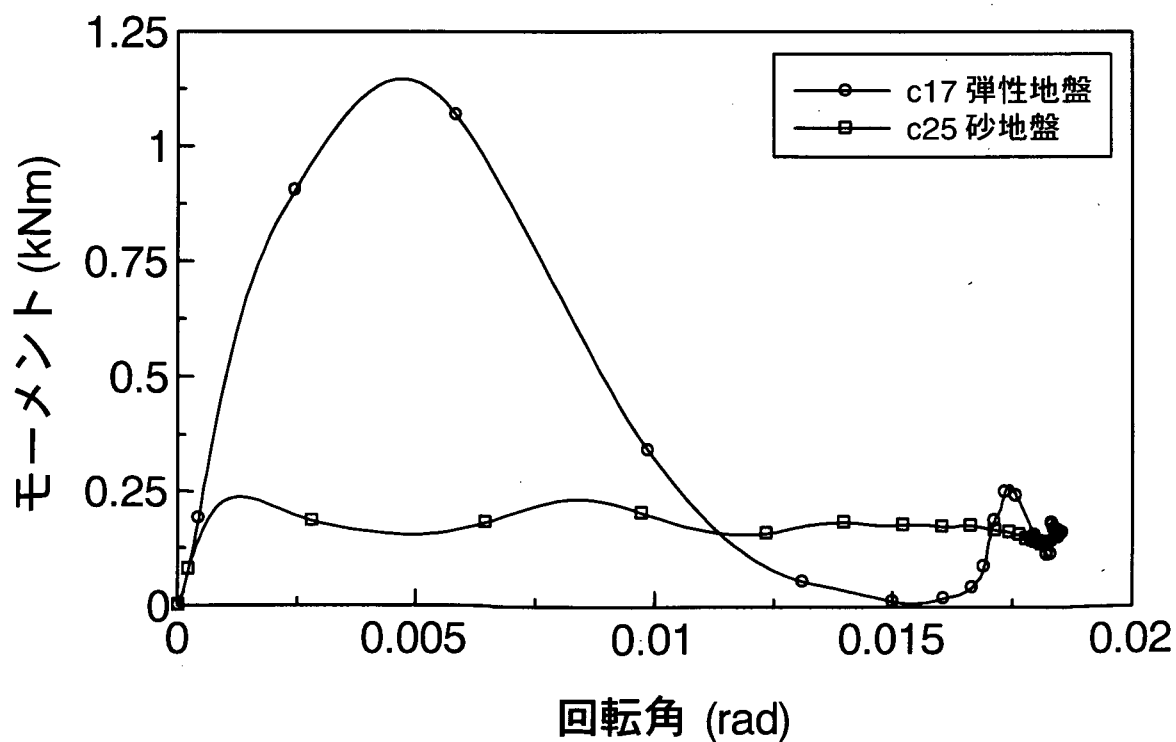


図-付 4.3.4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$



図一付 4.3.5 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$



図一付 4.3.6 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

4.4 止水条件の影響(砂地盤)

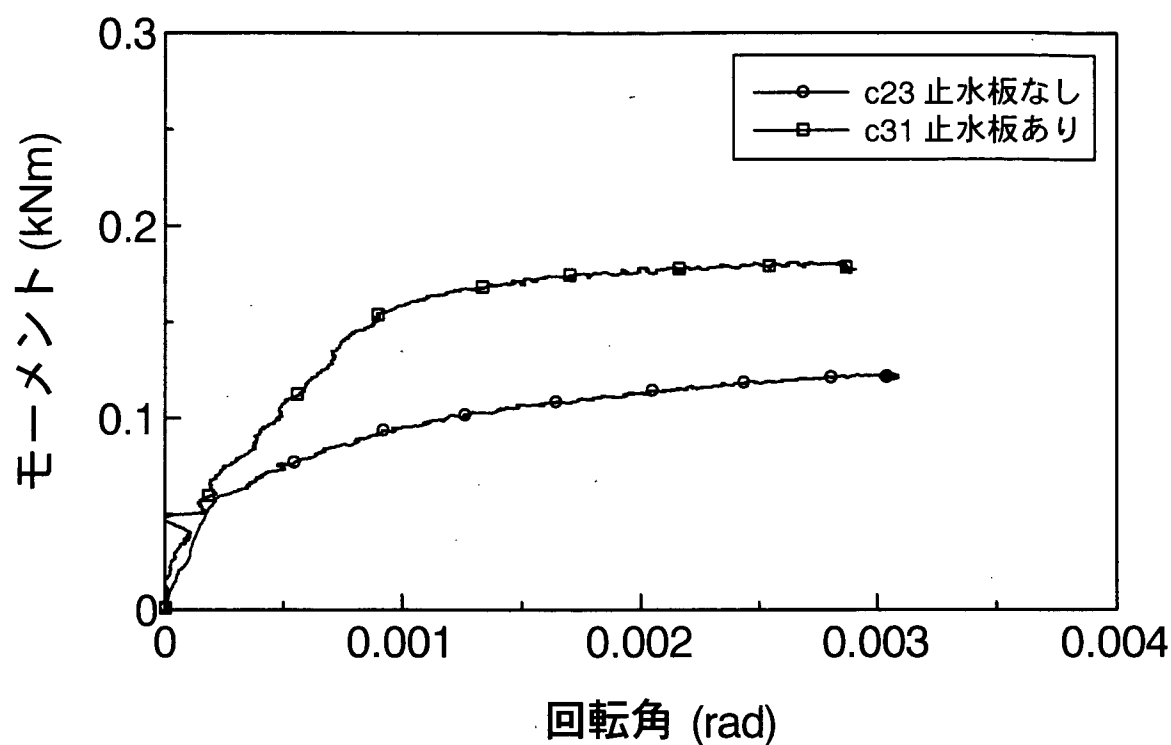


図-付 4.4.1 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$

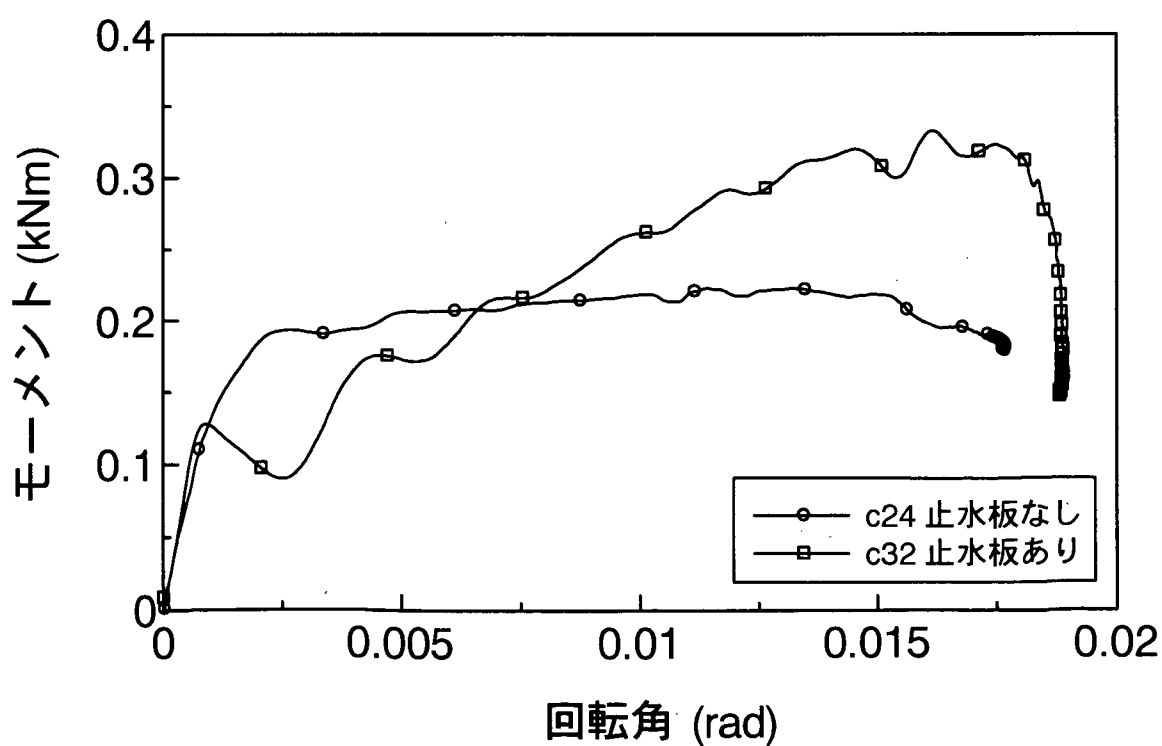


図-付 4.4.2 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

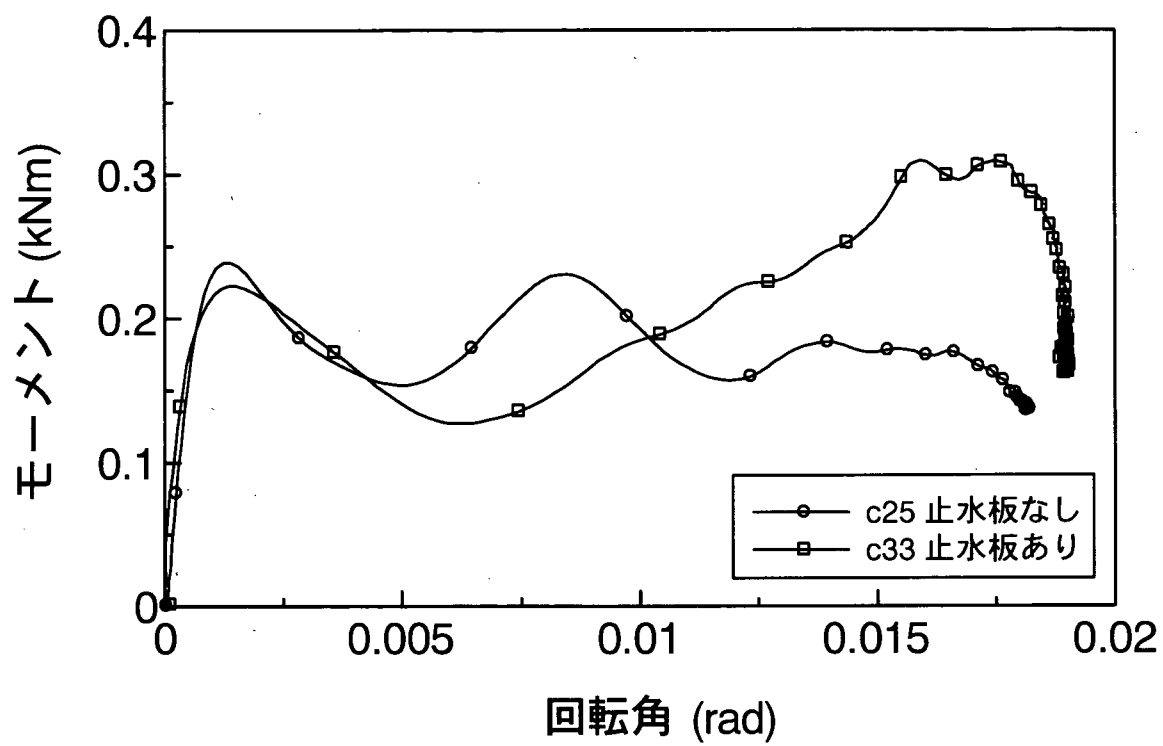


図-付 4.4.3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

4.5 止水条件の影響(弾性地盤)

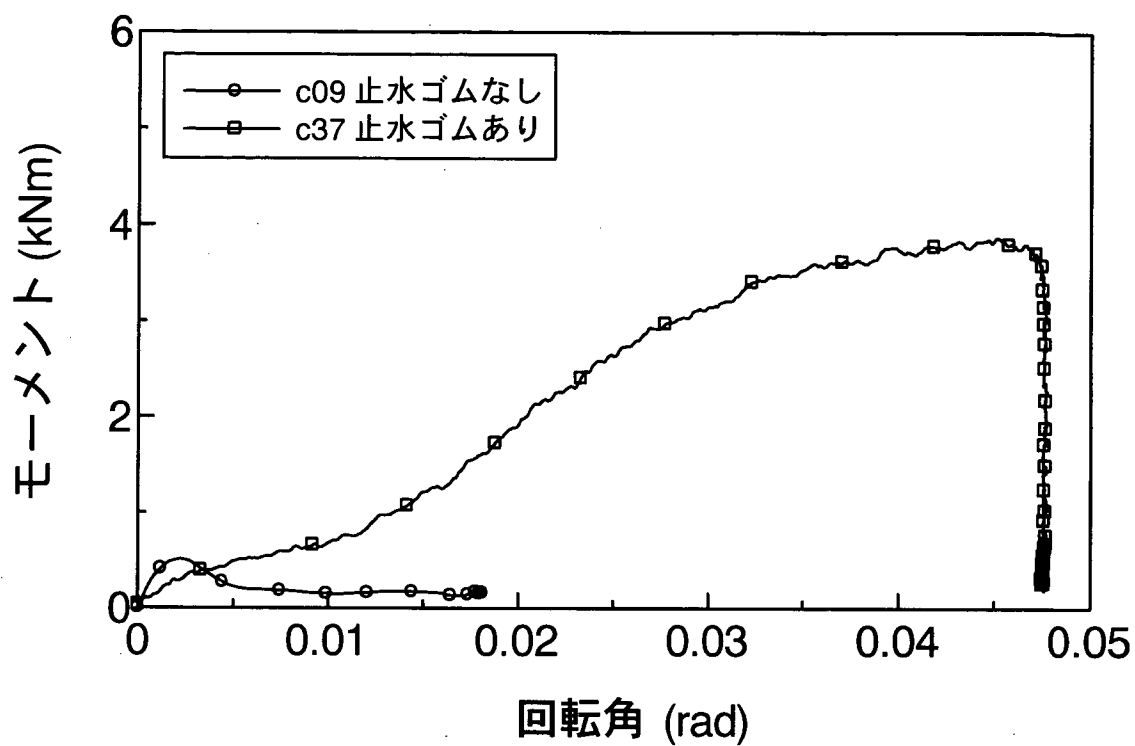


図-付 4.5.1 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

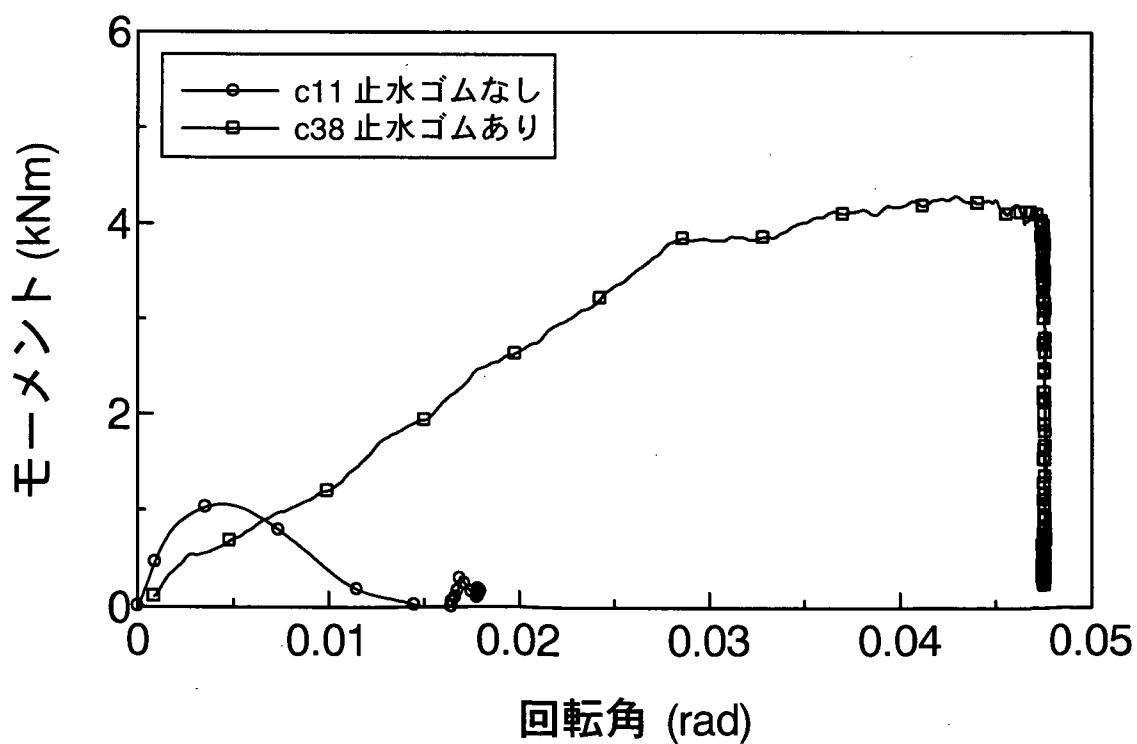


図-付 4.5.2 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

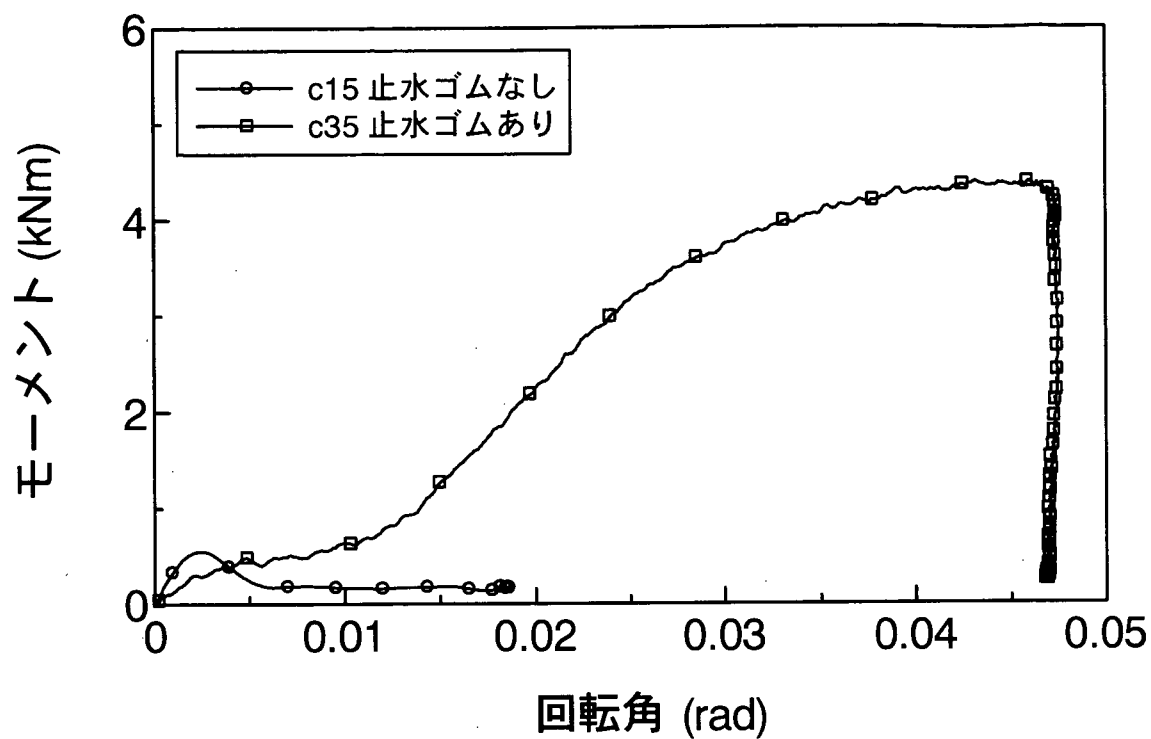


図-付 4.5.3 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$

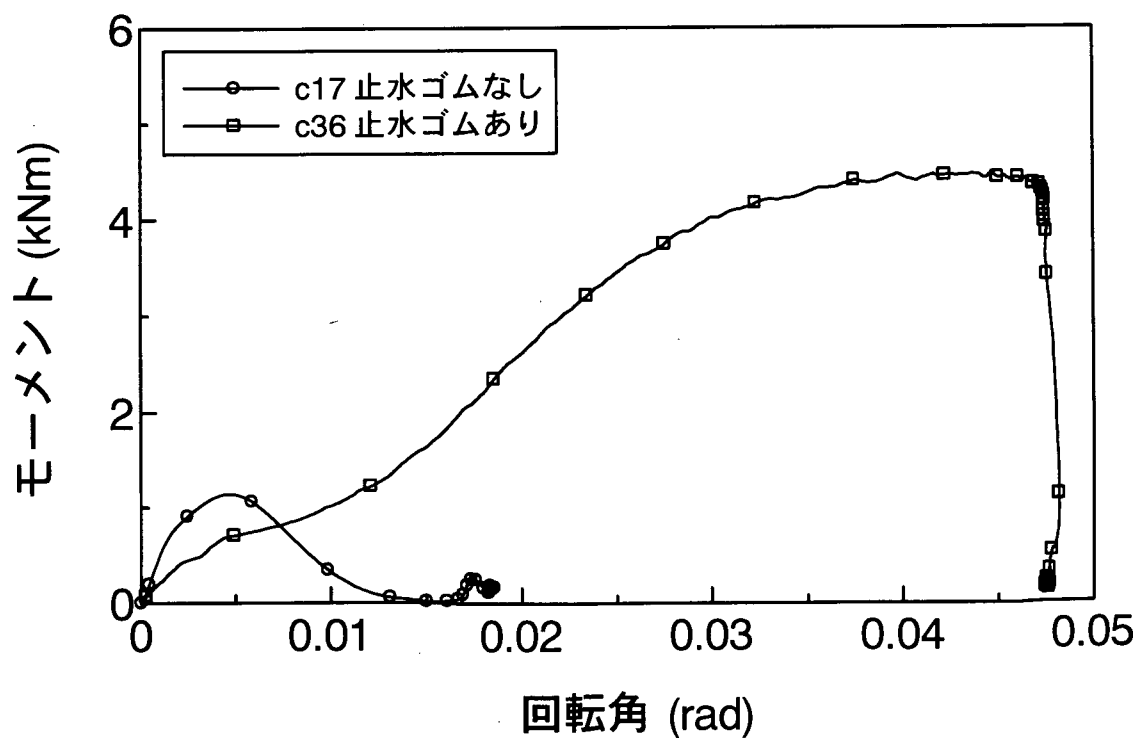
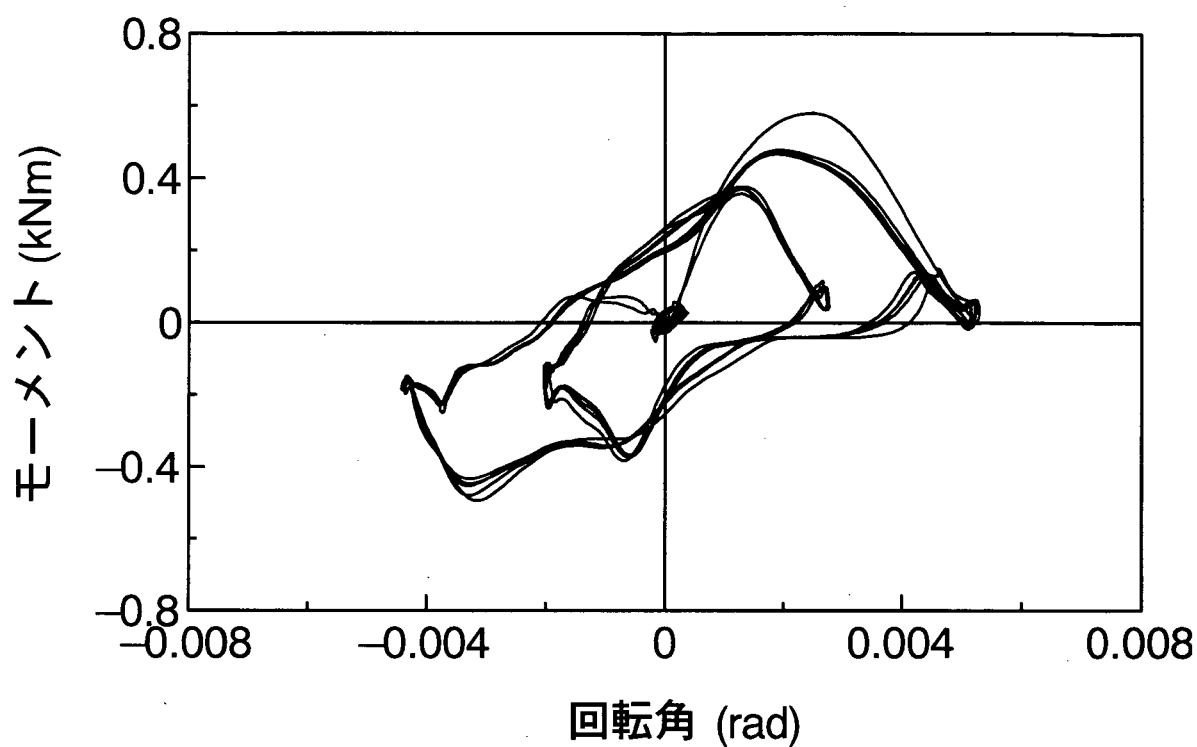
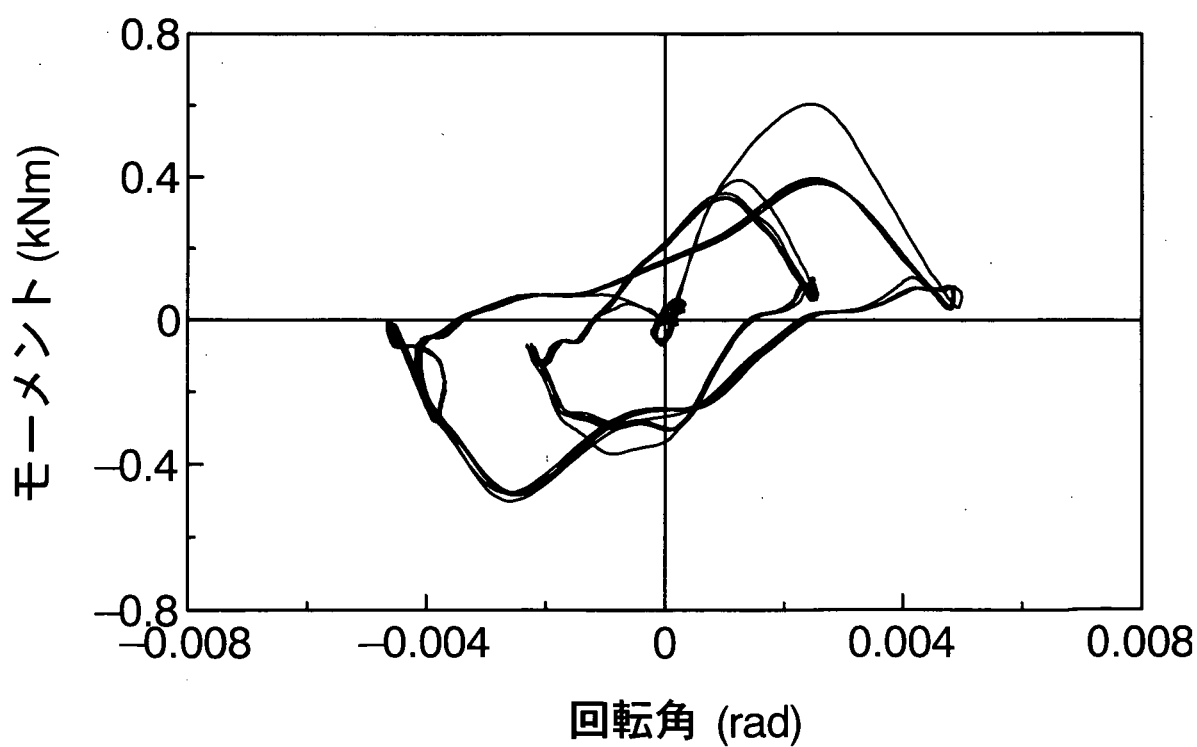


図-付 4.5.4 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$

4.6 繰返し载荷の影響



図一付 4.6.1 c06: 水深 $h=30\text{mm}$, 弾性地盤



図一付 4.6.2 c12: 水深 $h=250\text{mm}$, 弾性地盤

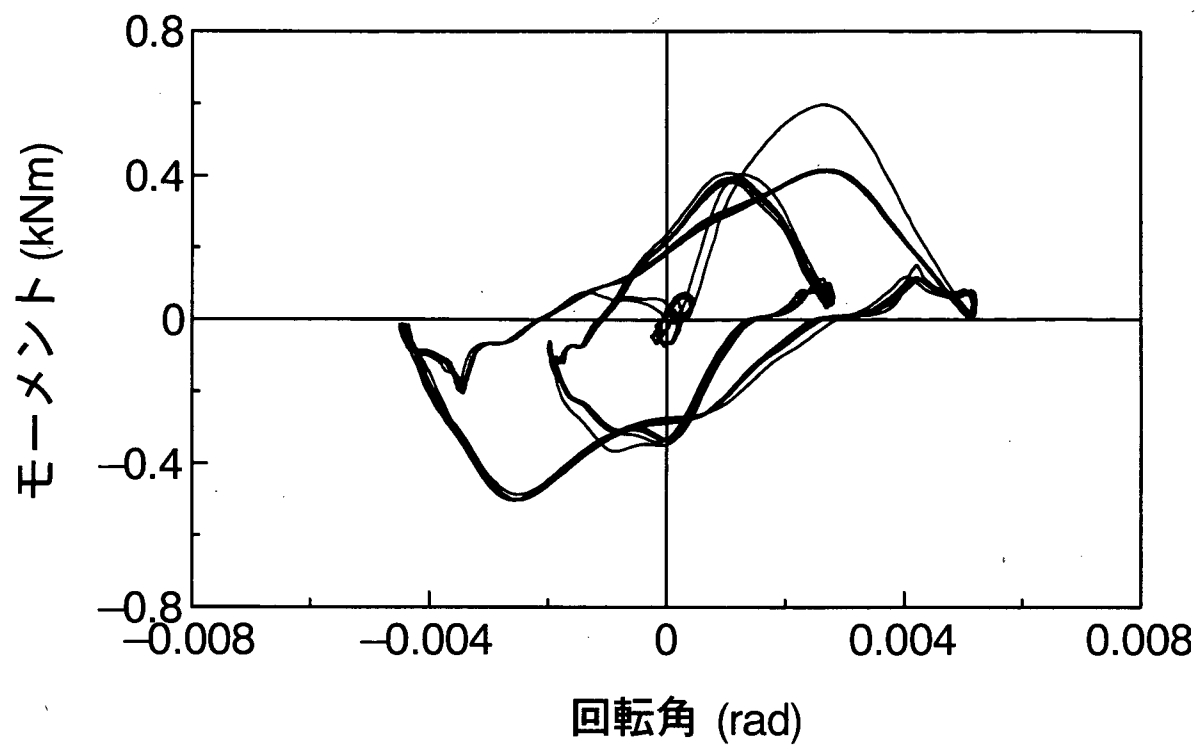


図-付 4.6.3 c18: 水深 $h=500\text{mm}$, 弾性地盤

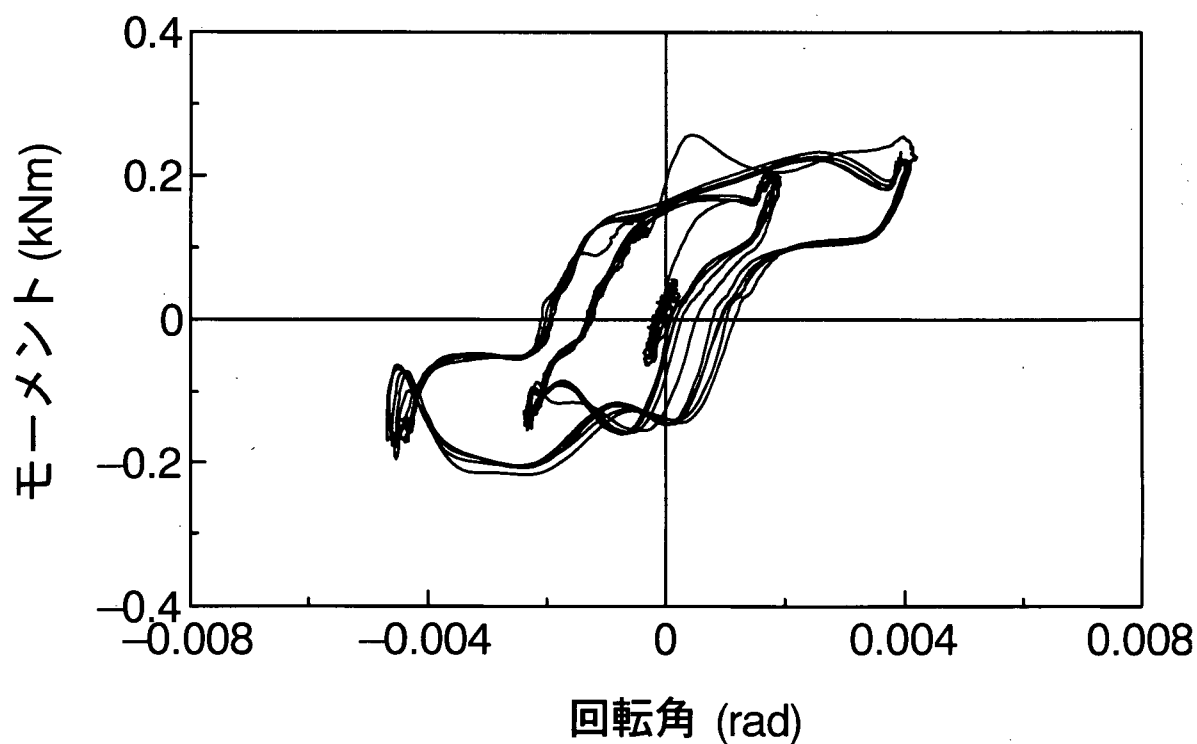
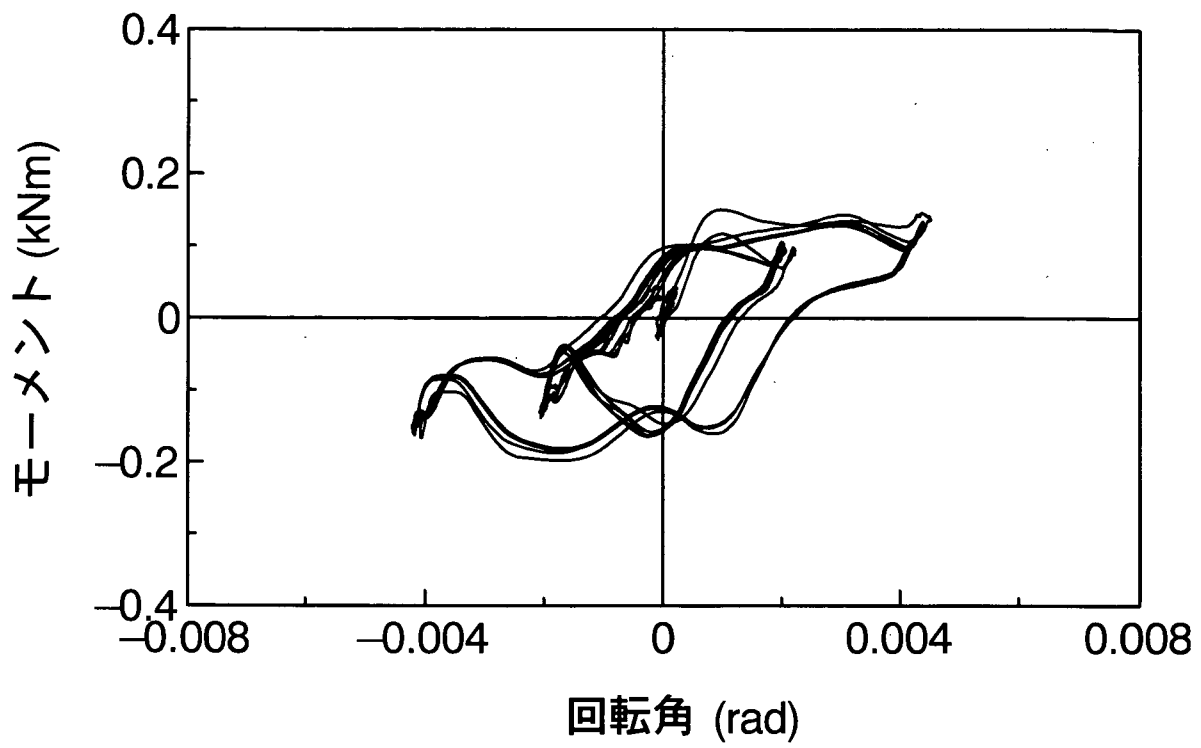
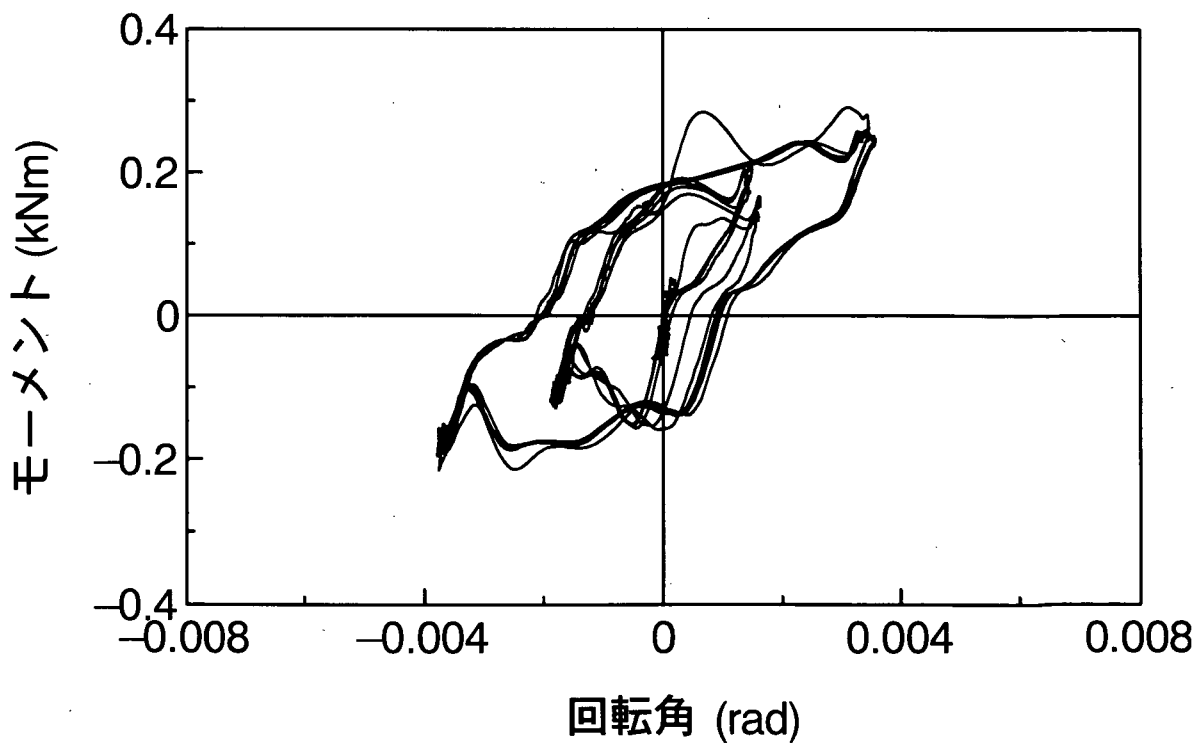


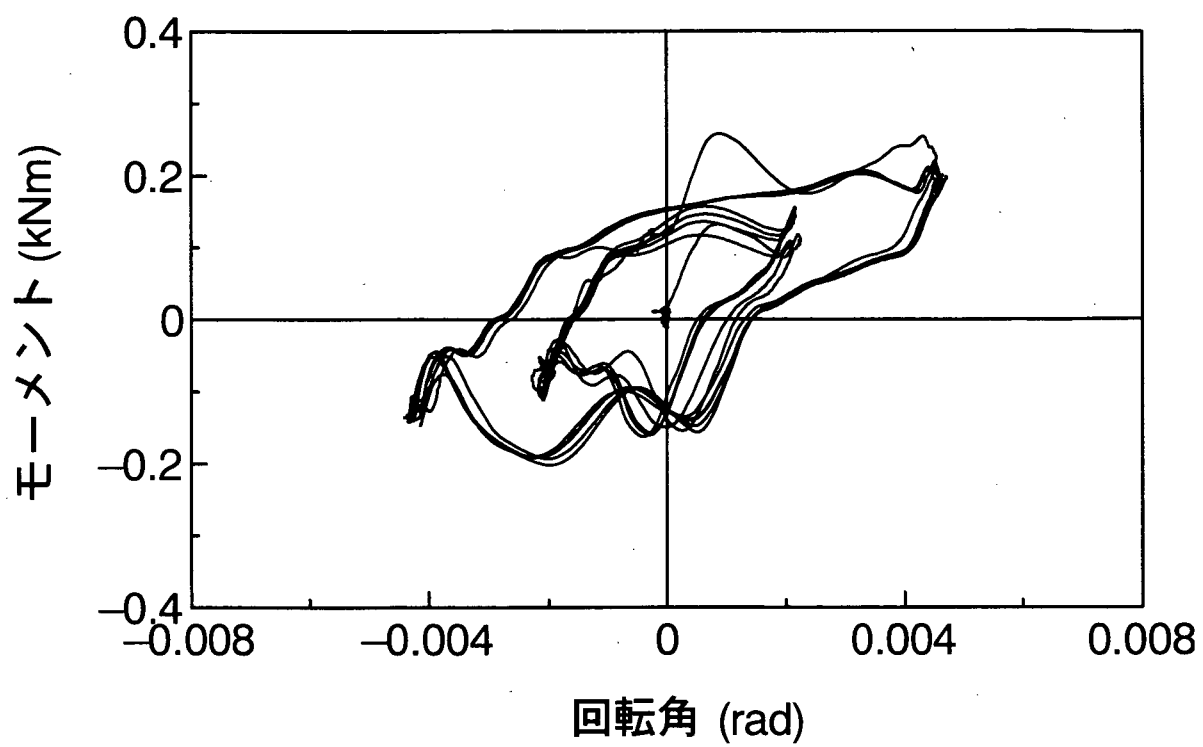
図-付 4.6.4 c22: 水深 $h=30\text{mm}$, 砂地盤



図一付 4.6.5 c26: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤



図一付 4.6.6 c30: 水深 $h=30\text{mm}$, 砂地盤 (止水板あり)



図一付 4.6.7 c34: 水深 $h=500\text{mm}$, 砂地盤(止水板あり)

5. モーメントピーク時の基礎底面下水圧分布

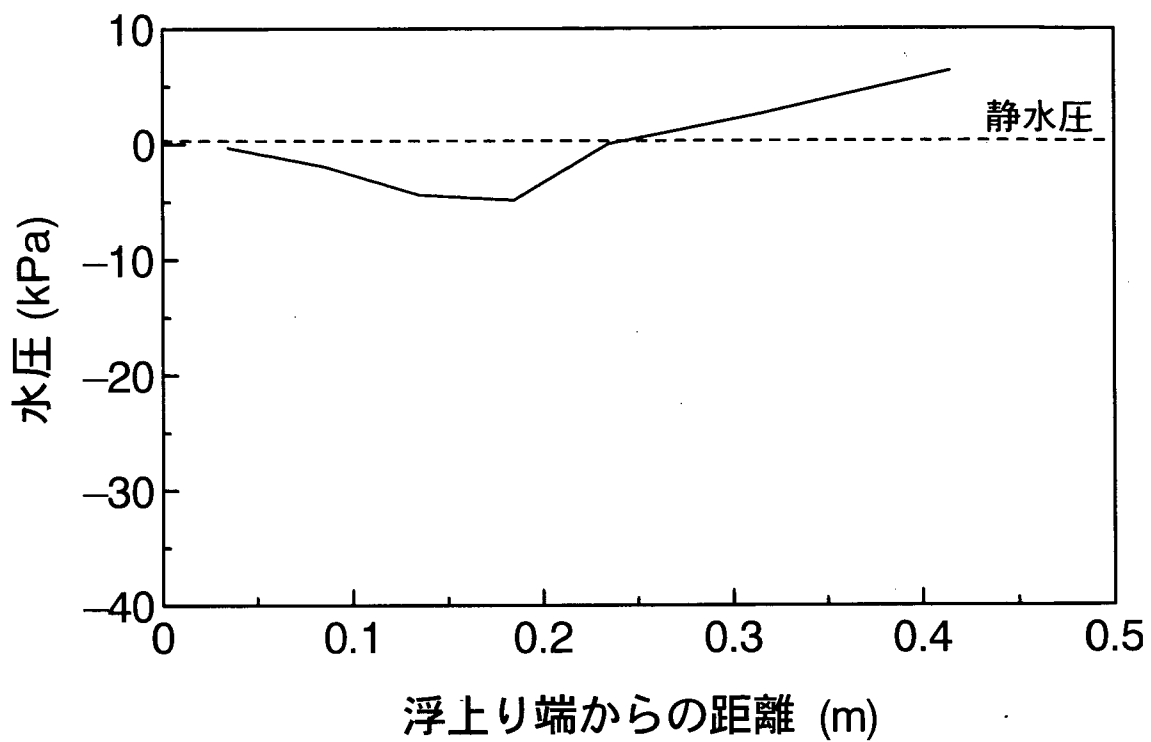


図-付 5.1 c02: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.136\text{sec}$)

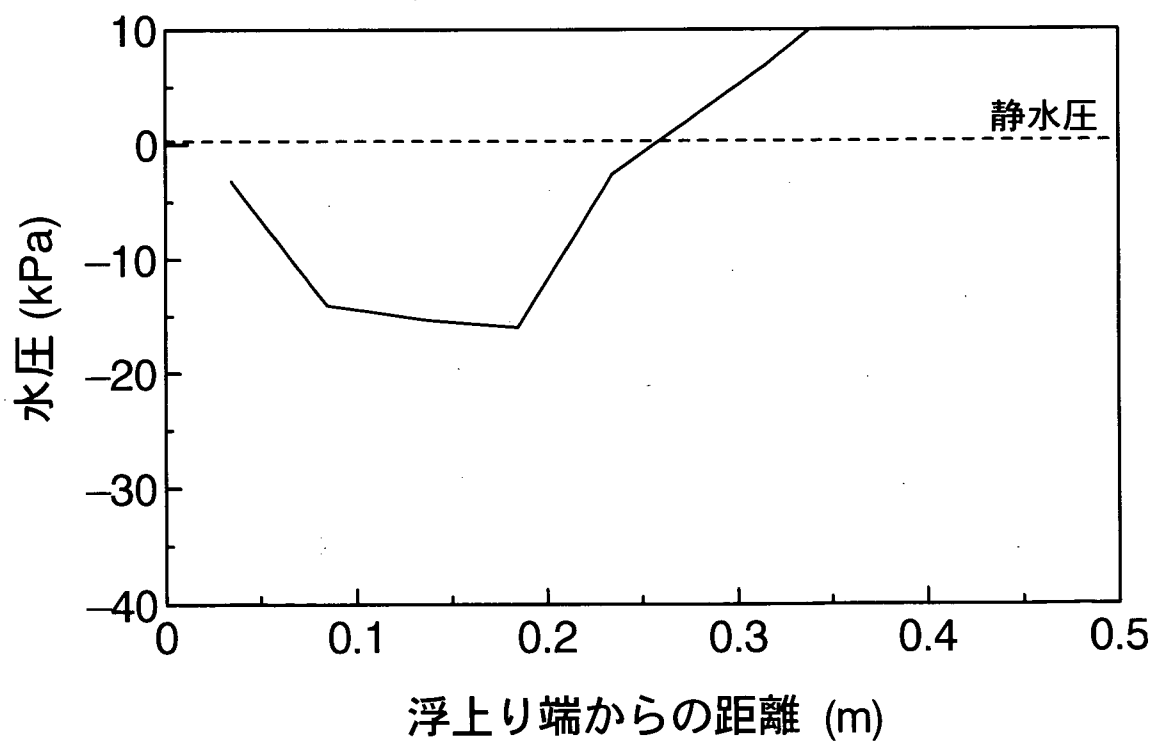
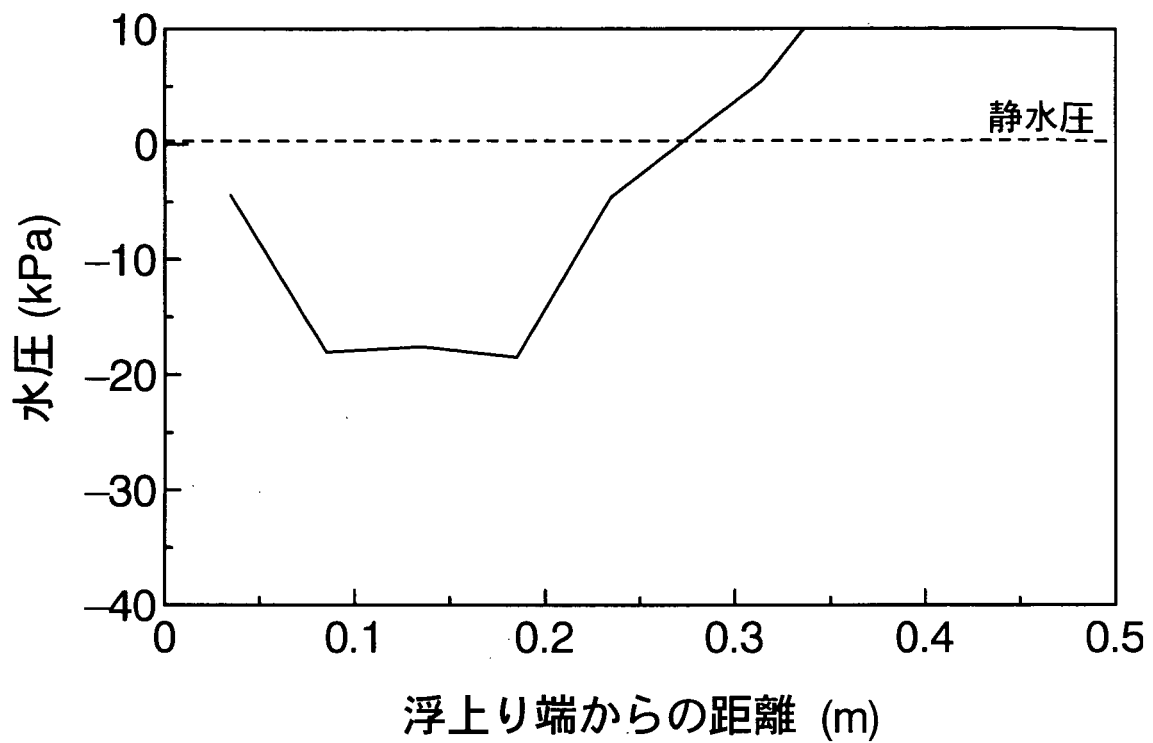
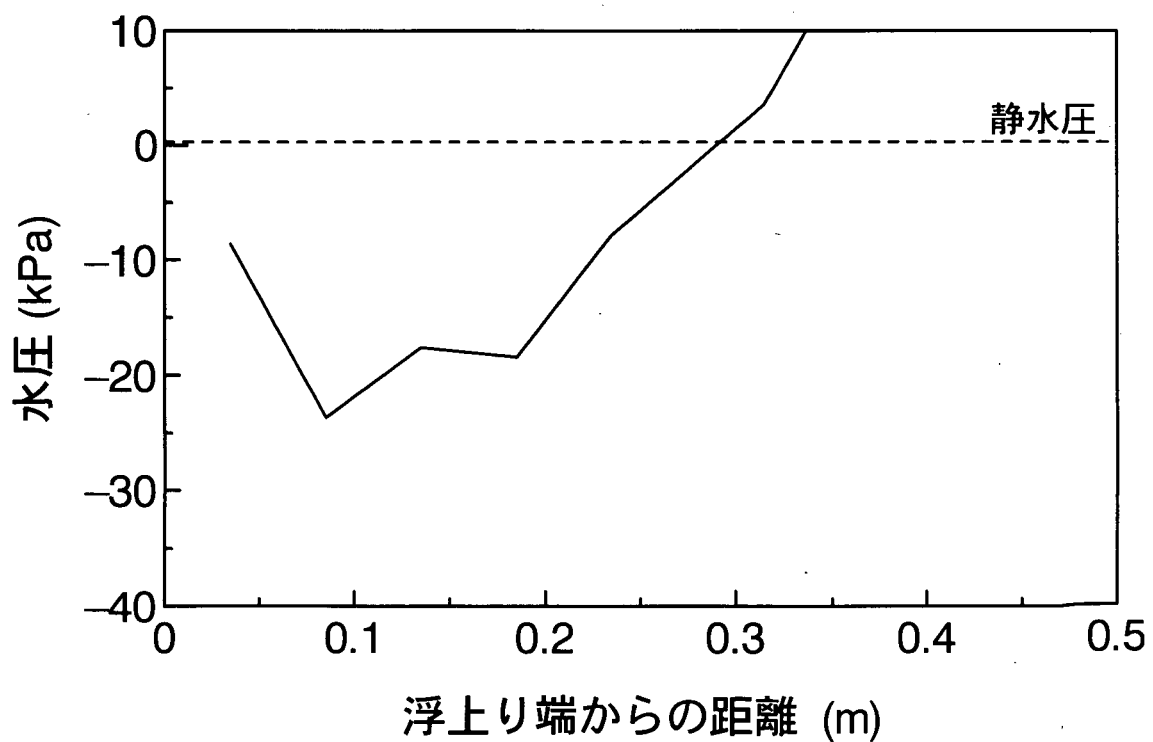


図-付 5.2 c03: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.064\text{sec}$)



図一付 5.3 c04: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.055\text{sec}$)



図一付 5.4 c05: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.050\text{sec}$)

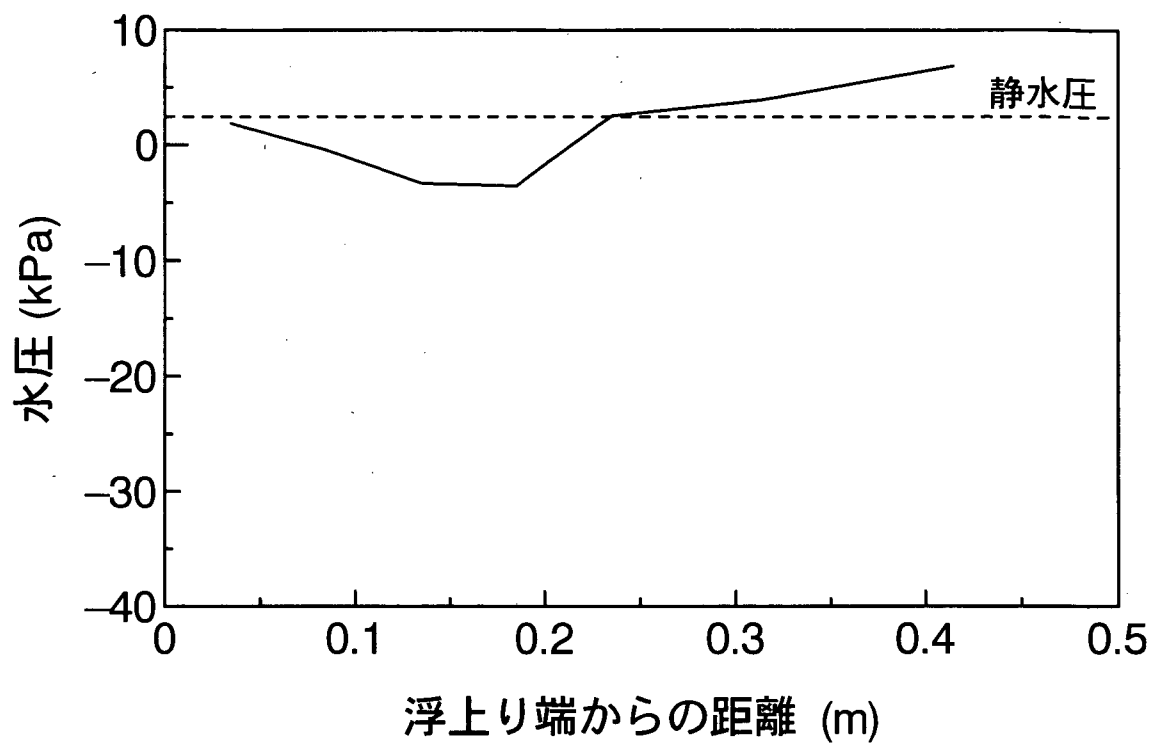


図-付 5.5 c08: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.151\text{sec}$)

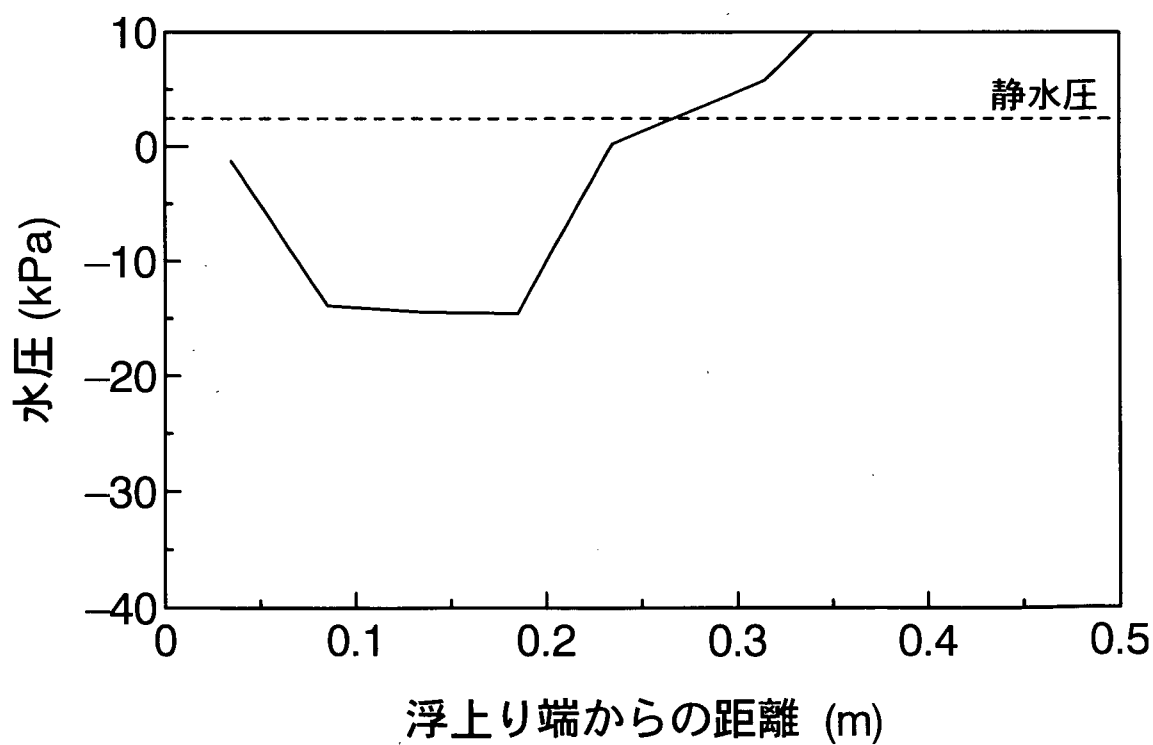


図-付 5.6 c09: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.066\text{sec}$)

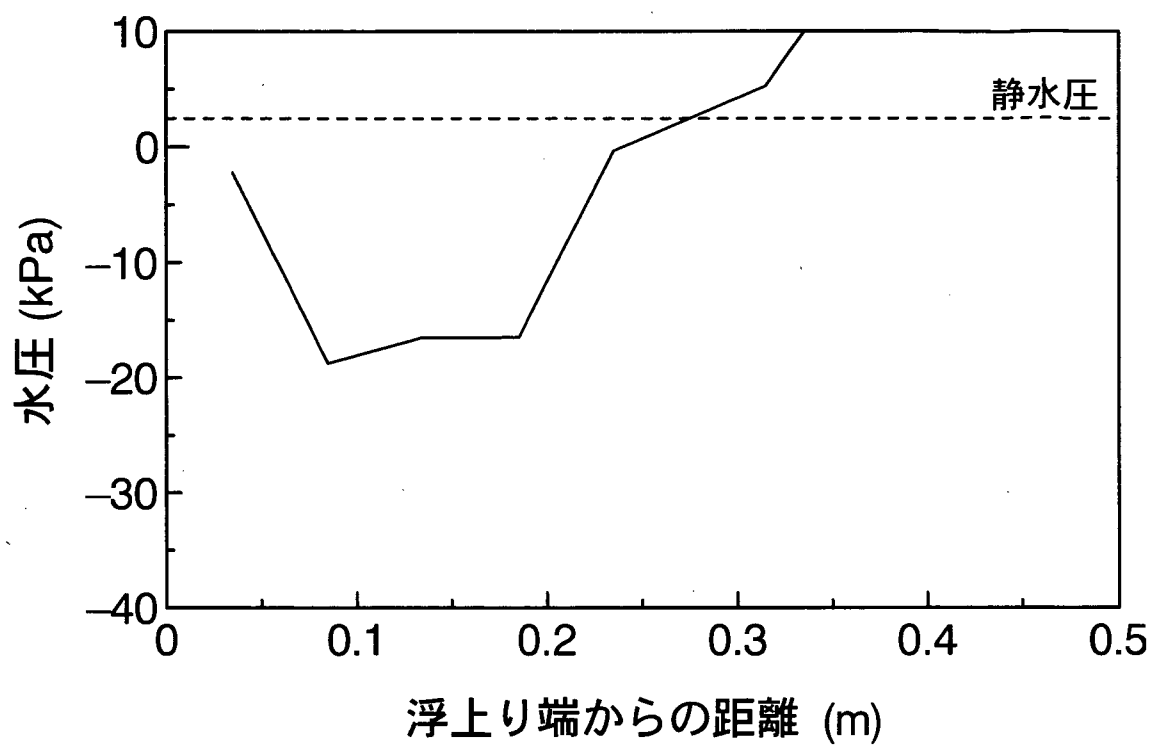


図-付 5.7 c10: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.053\text{sec}$)

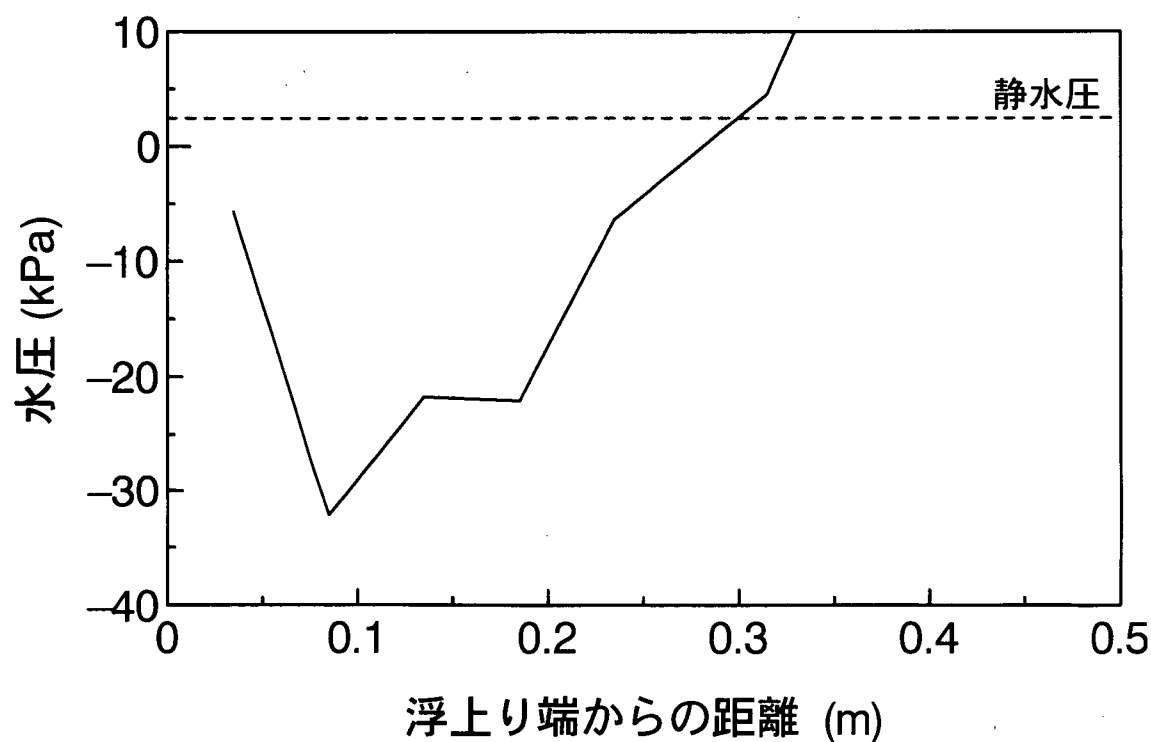


図-付 5.8 c11: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.046\text{sec}$)

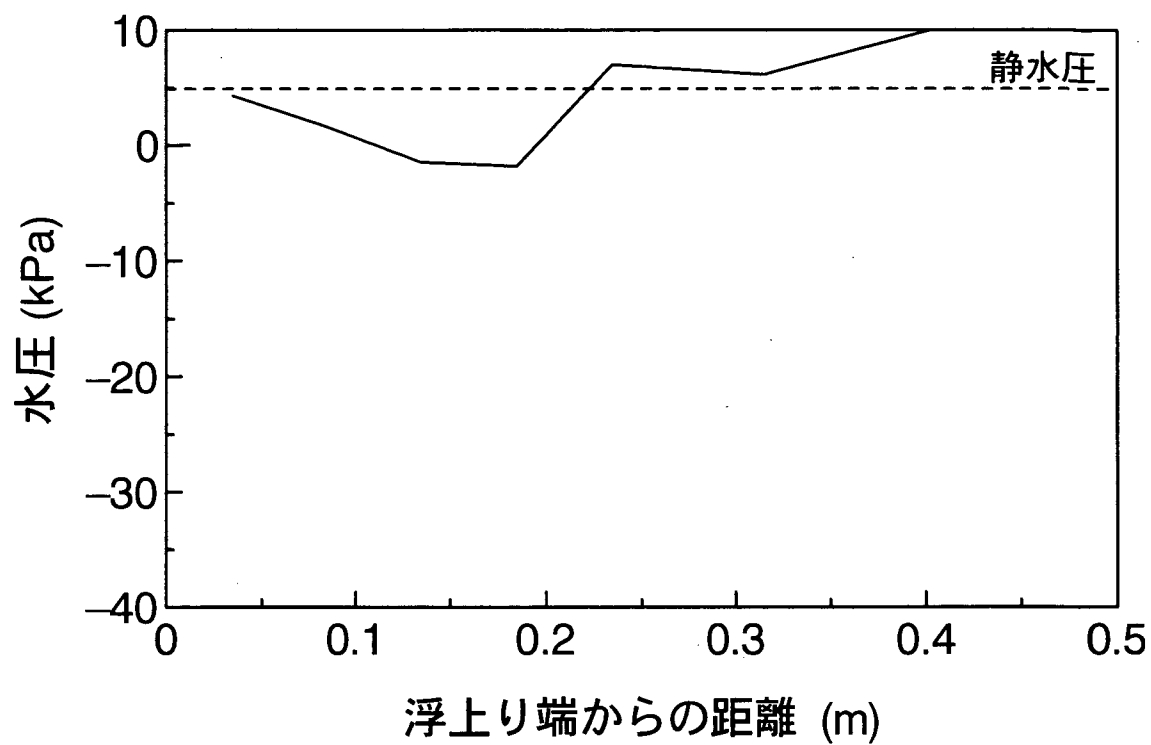


図-付 5.9 c14: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.005\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.152\text{sec}$)

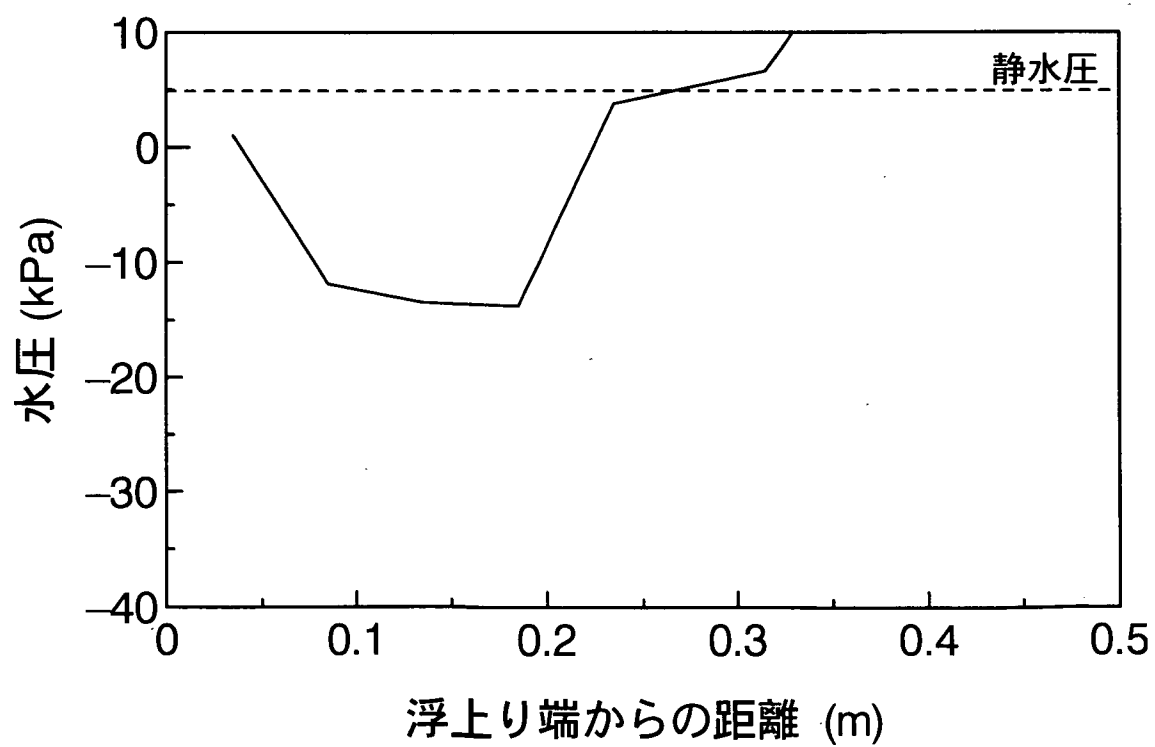


図-付 5.10 c15: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.071\text{sec}$)

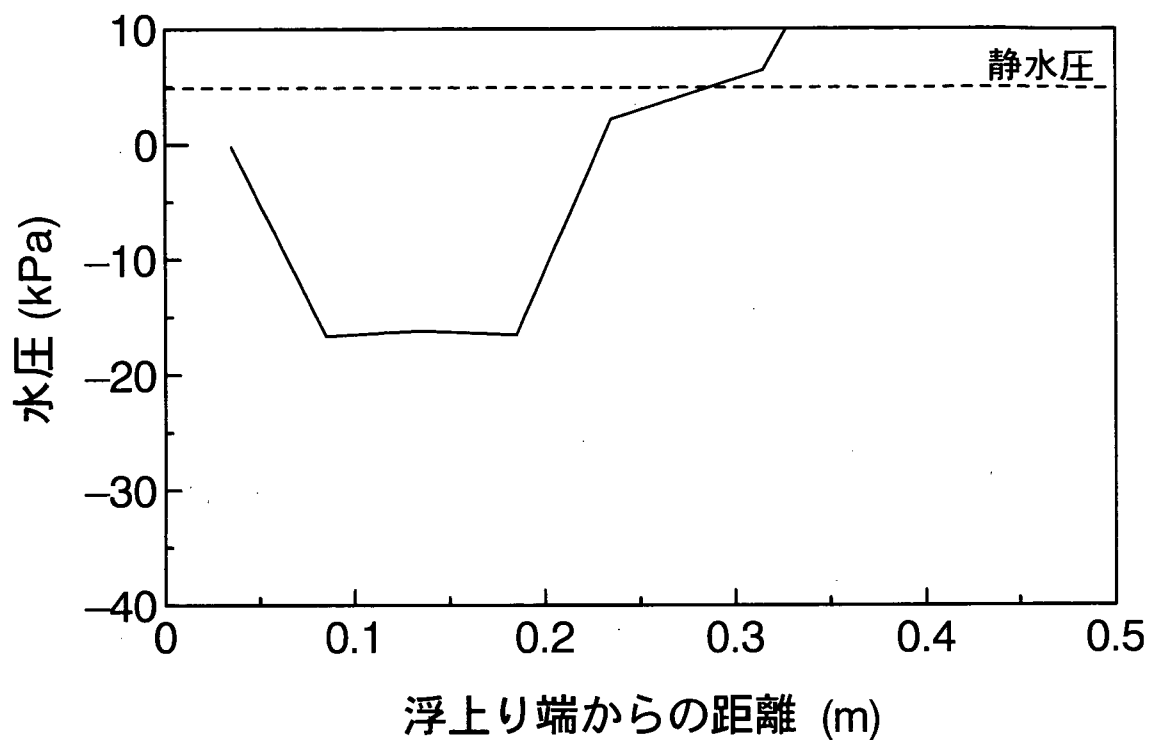


図-付 5.11 c16: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.1\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.062\text{sec}$)

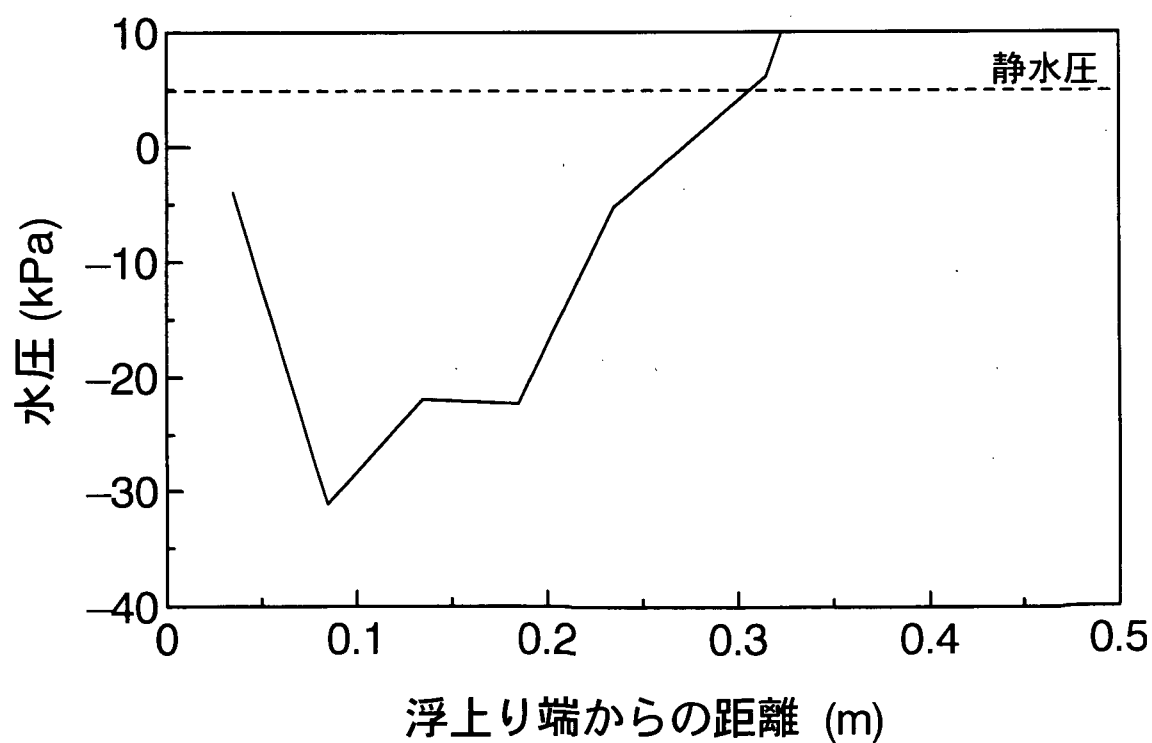
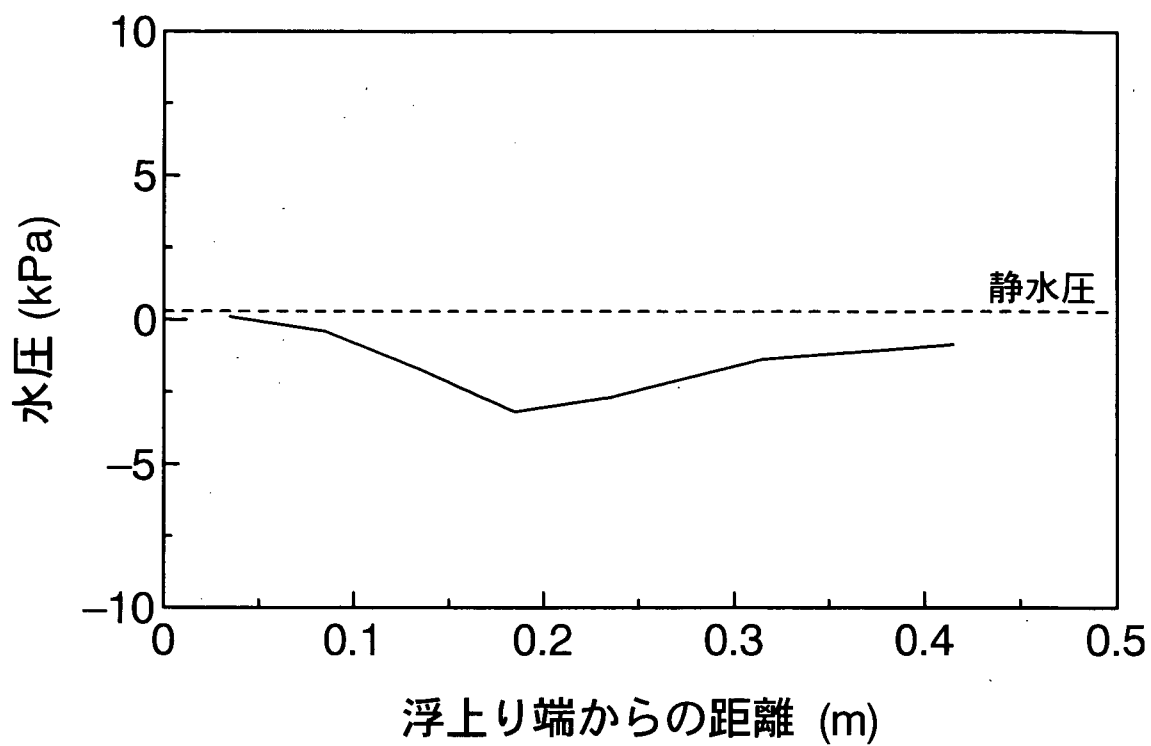
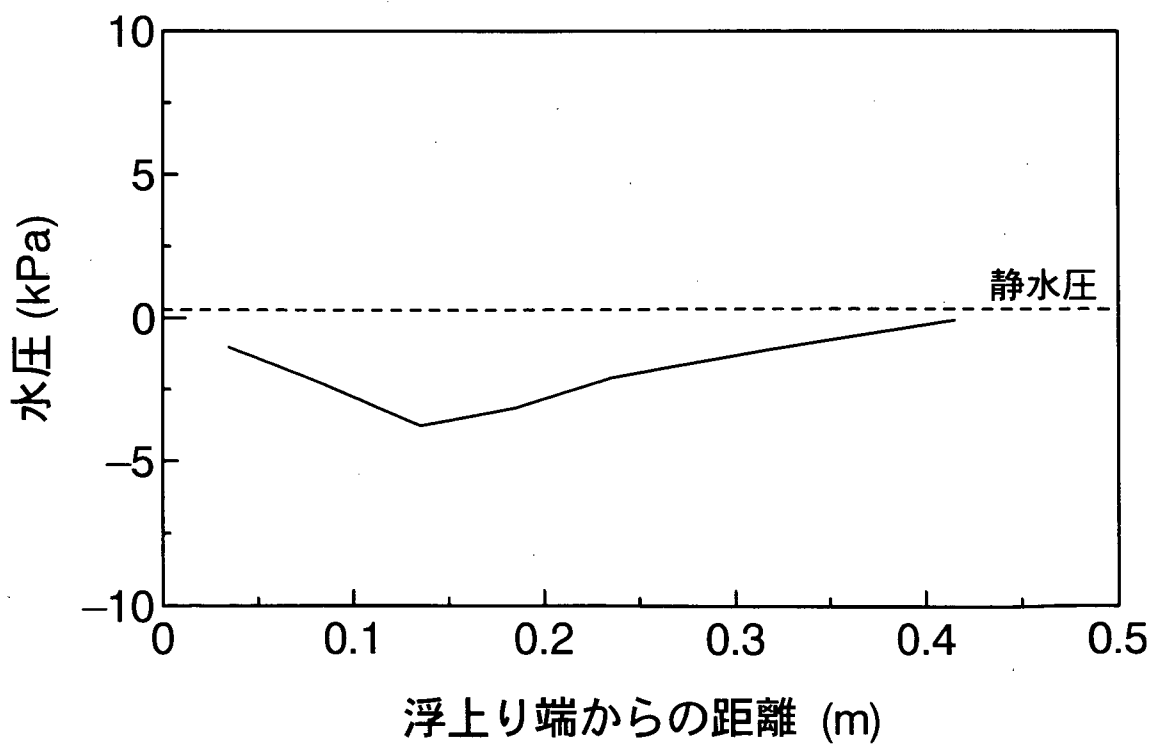


図-付 5.12 c17: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤
($t=0.047\text{sec}$)



図一付 5.13 c20: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤
($t=0.281\text{sec}$)



図一付 5.14 c21: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤
($t=0.129\text{sec}$)

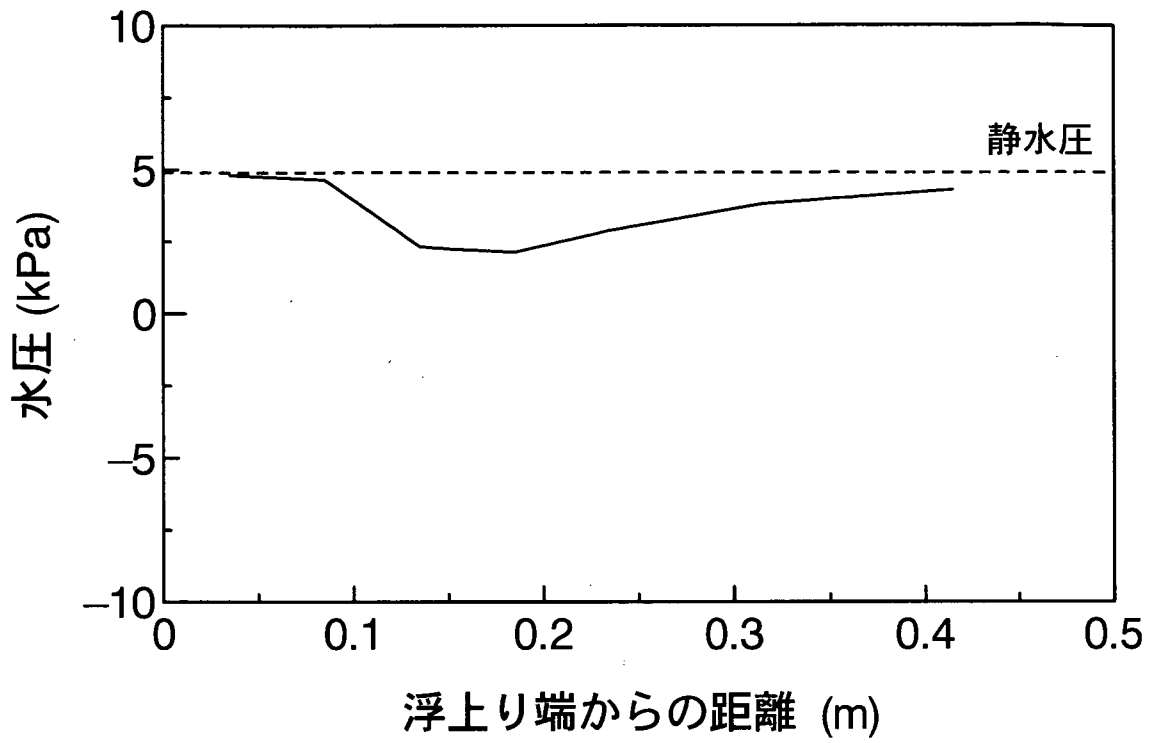


図-付 5.15 c24: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤
($t=0.253\text{sec}$)

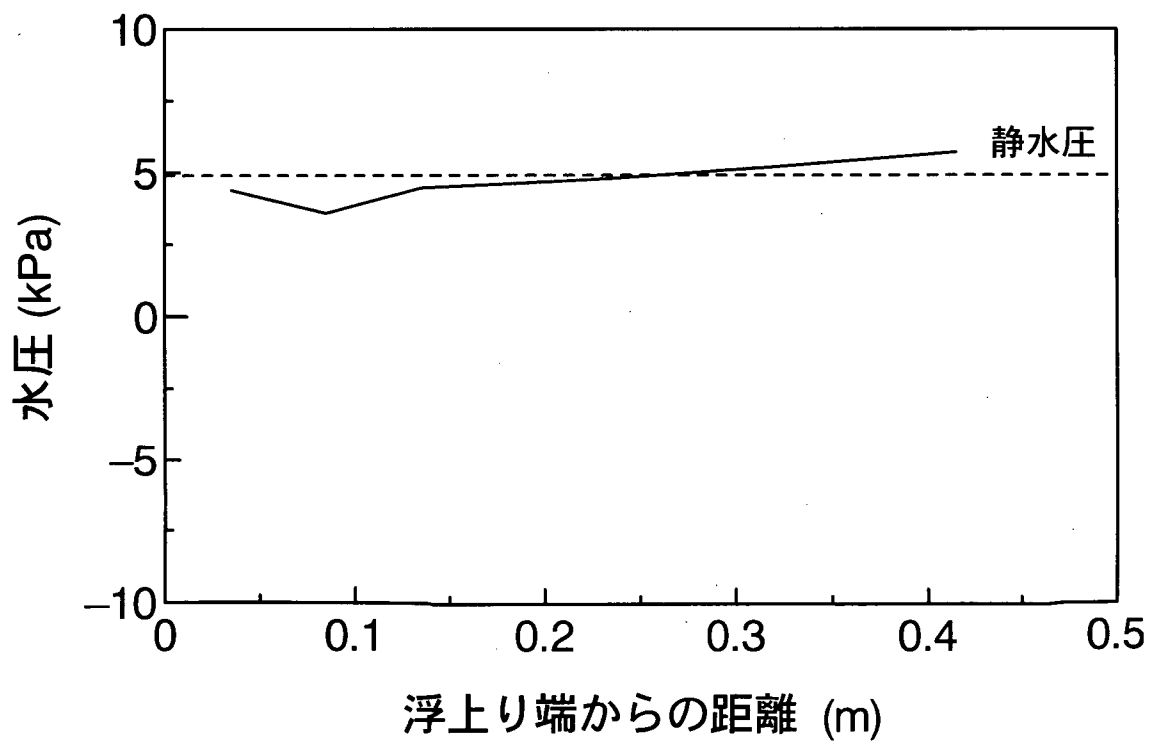


図-付 5.16 c25: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤
($t=0.029\text{sec}$)

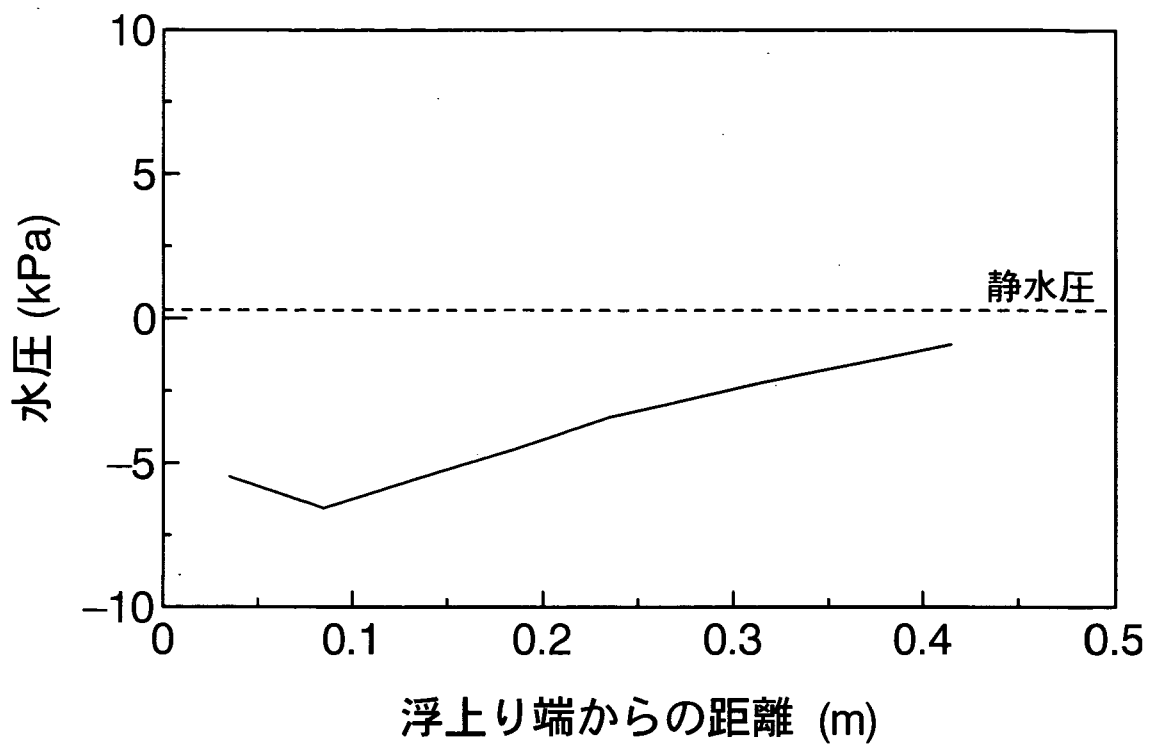


図-付 5.17 c28: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)
($t=0.330\text{sec}$)

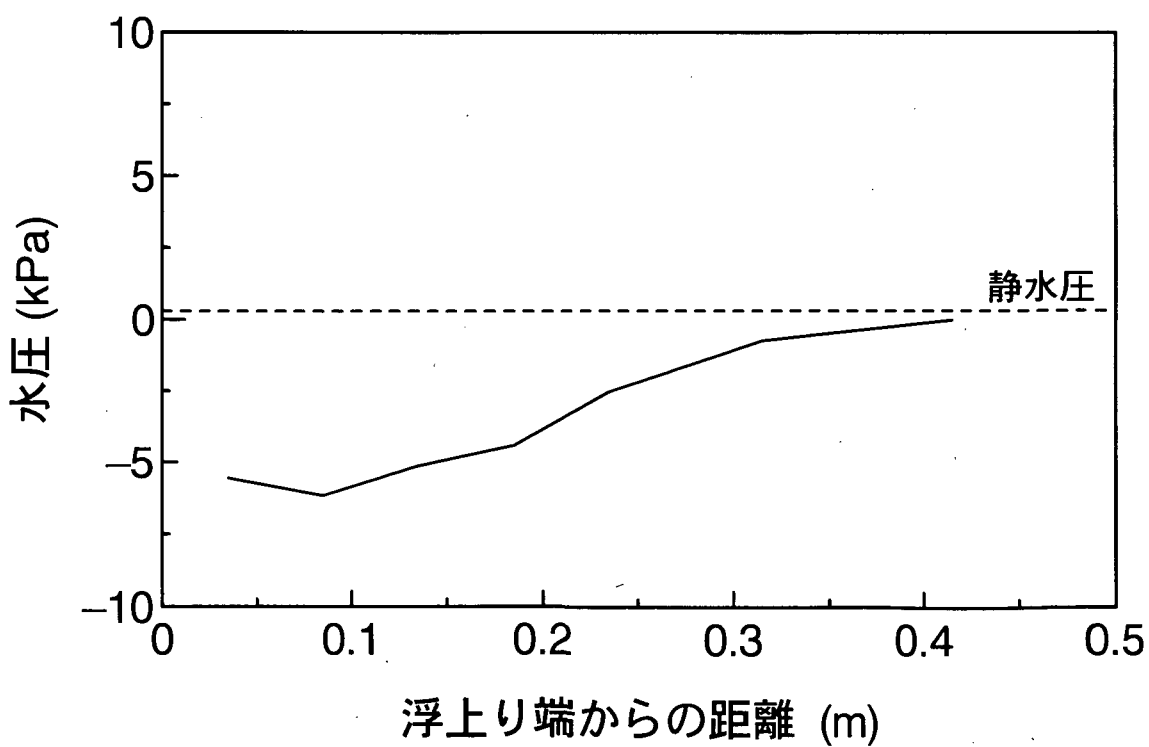


図-付 5.18 c29: 水深 $h=30\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)
($t=0.147\text{sec}$)

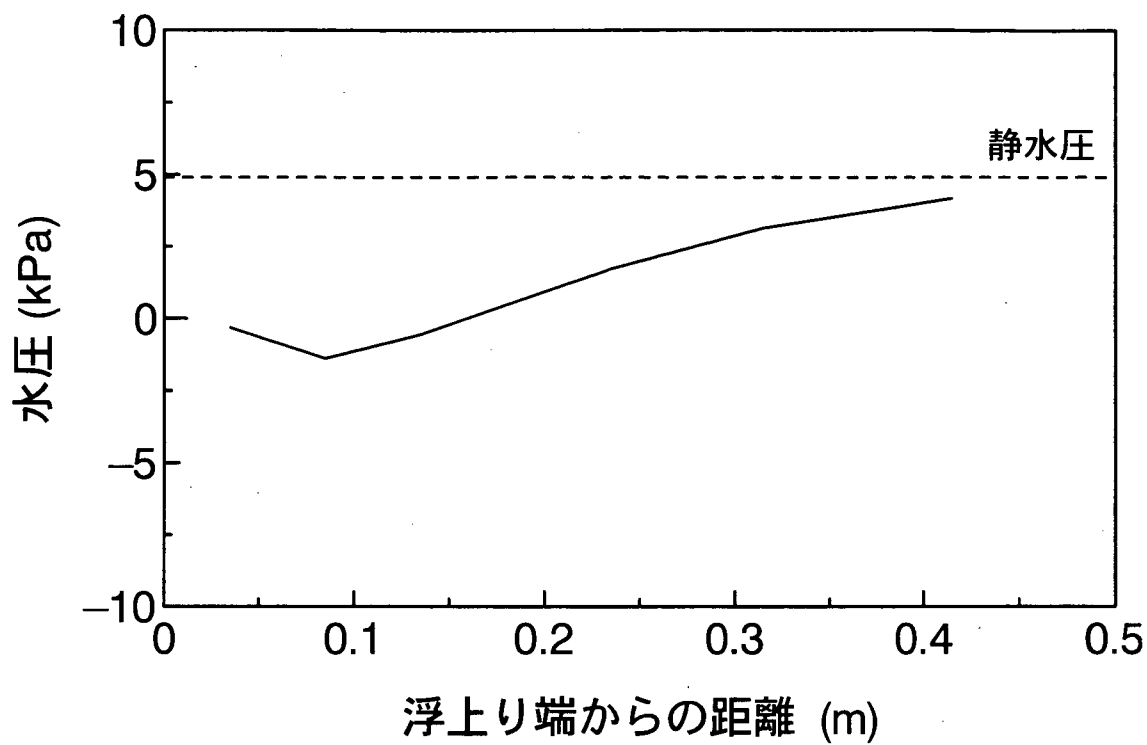


図-付 5.19 c32: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)
($t=0.329\text{sec}$)

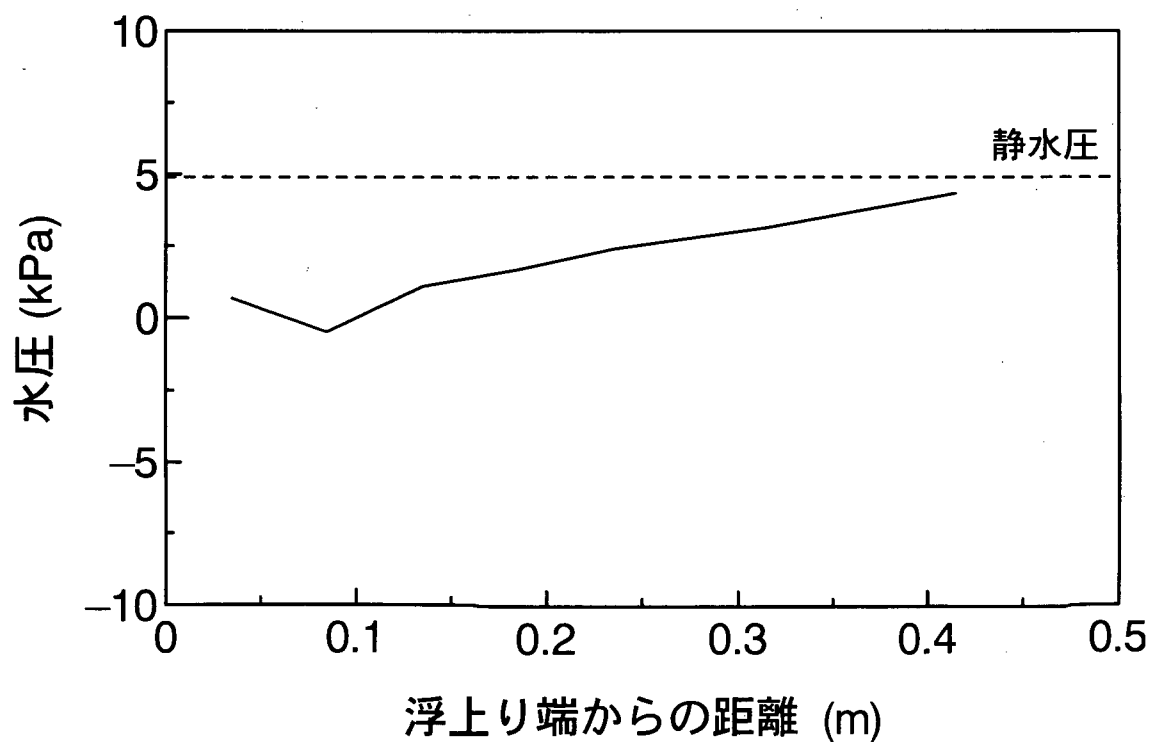


図-付 5.20 c33: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 砂地盤(止水板あり)
($t=0.148\text{sec}$)

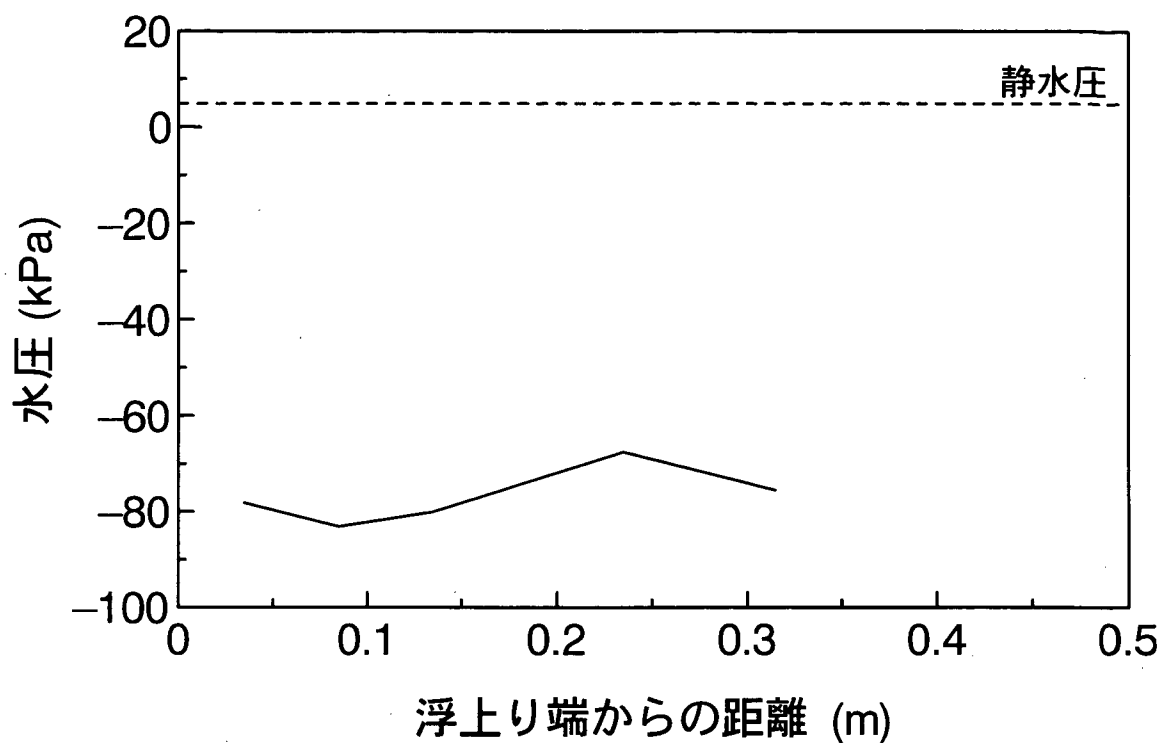


図-付 5.21 c35: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=1.043\text{sec}$)

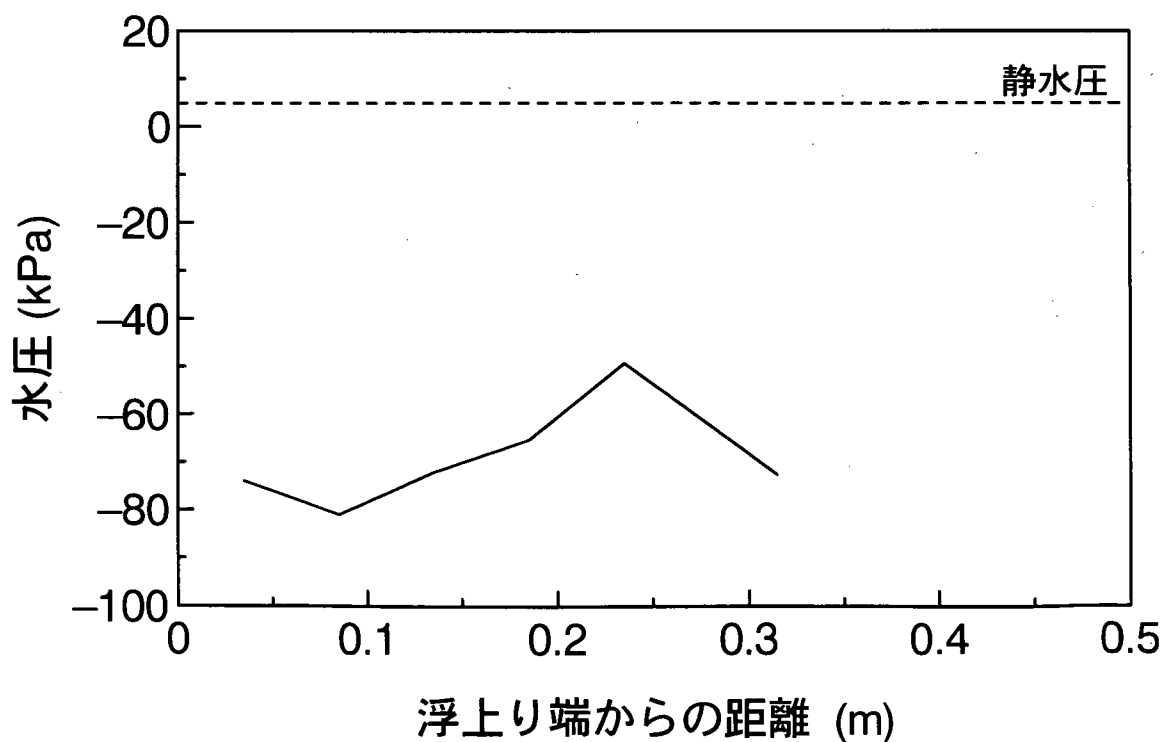
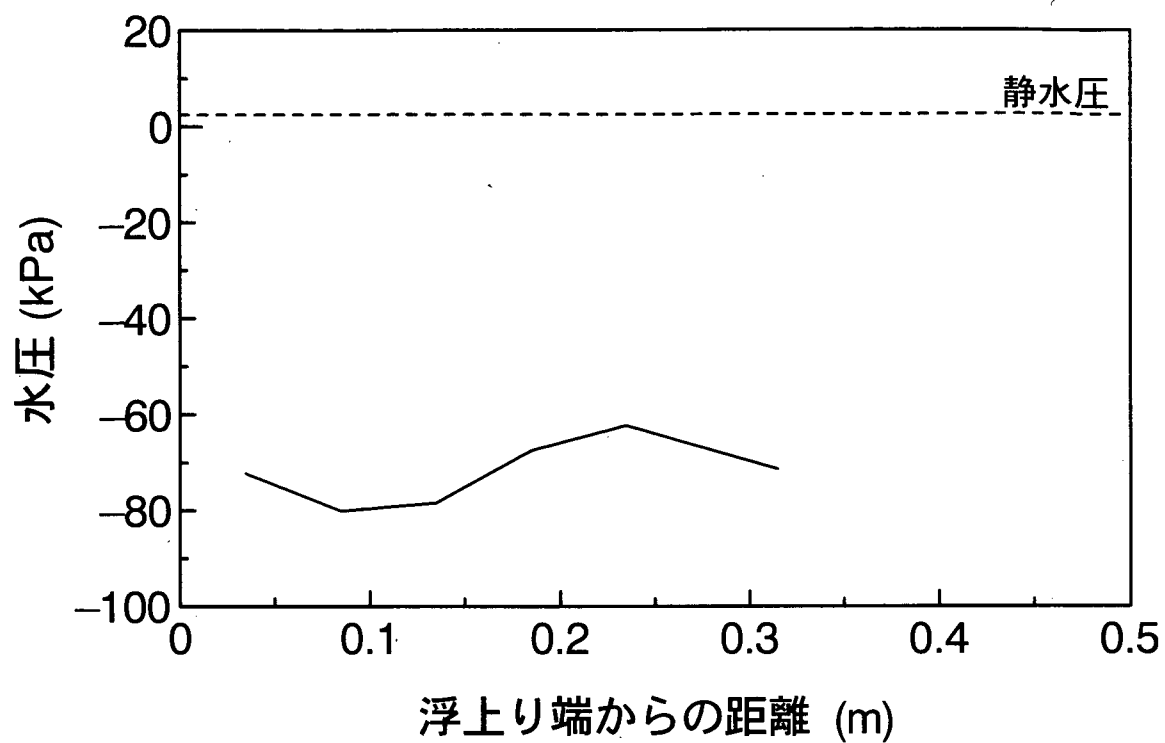
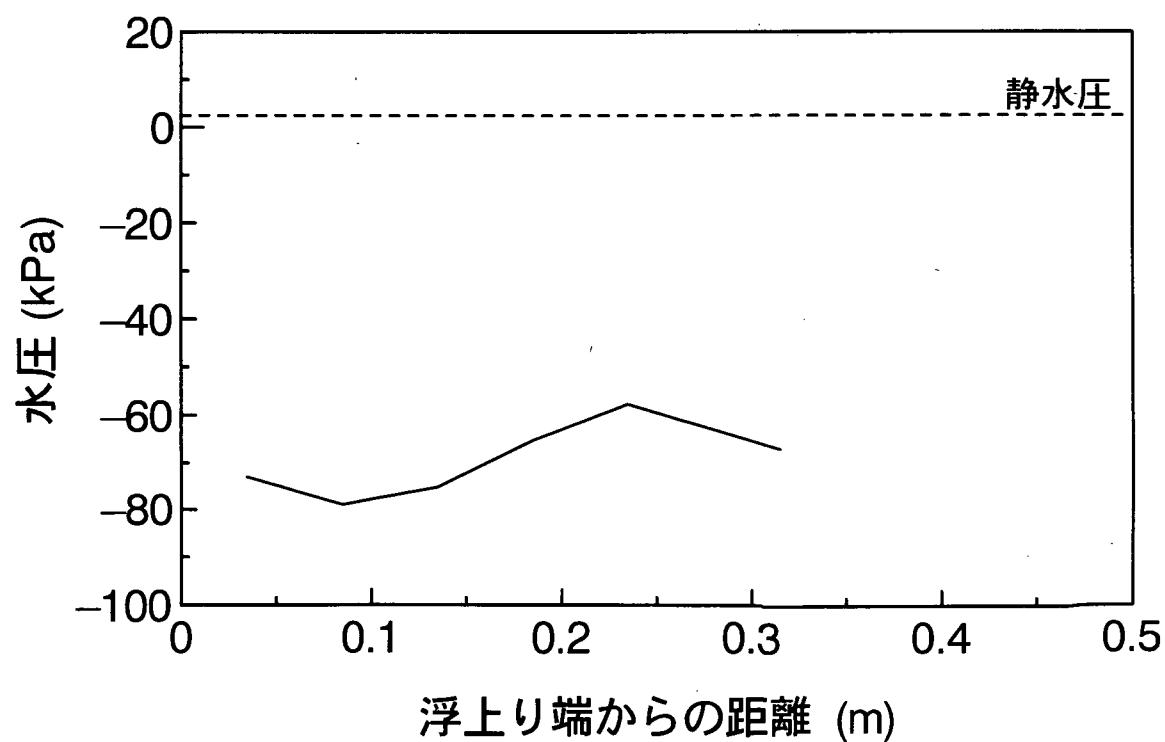


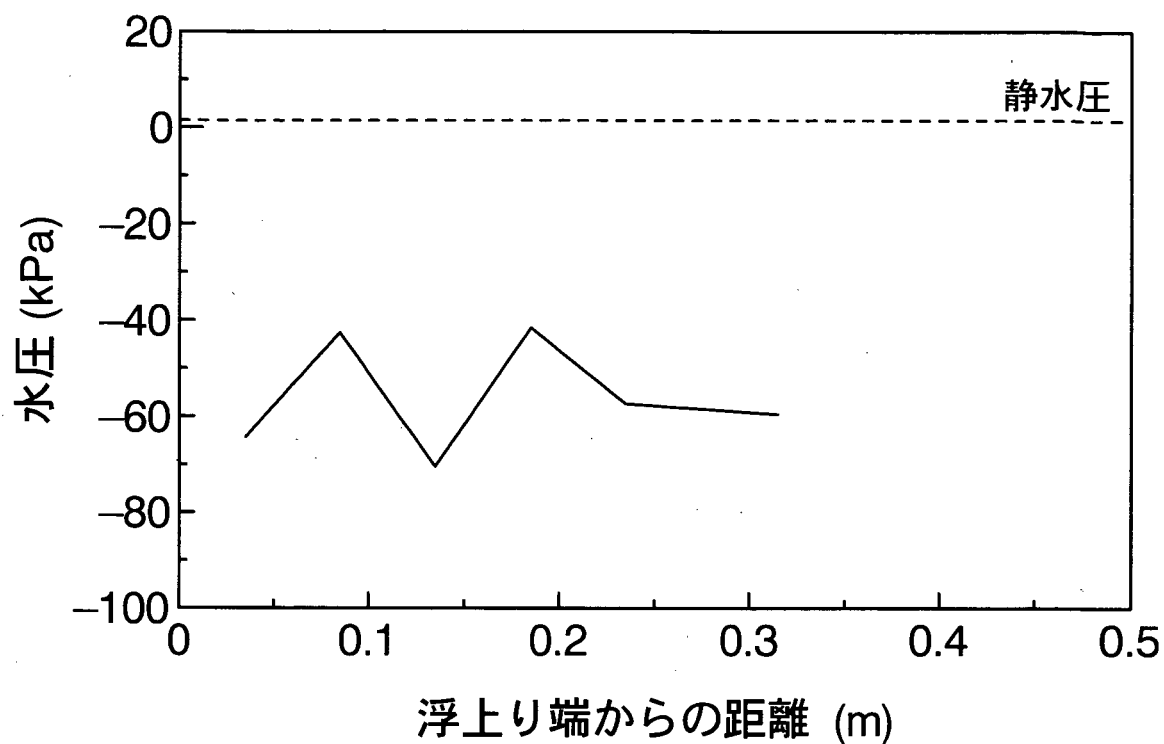
図-付 5.22 c36: 水深 $h=500\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=0.457\text{sec}$)



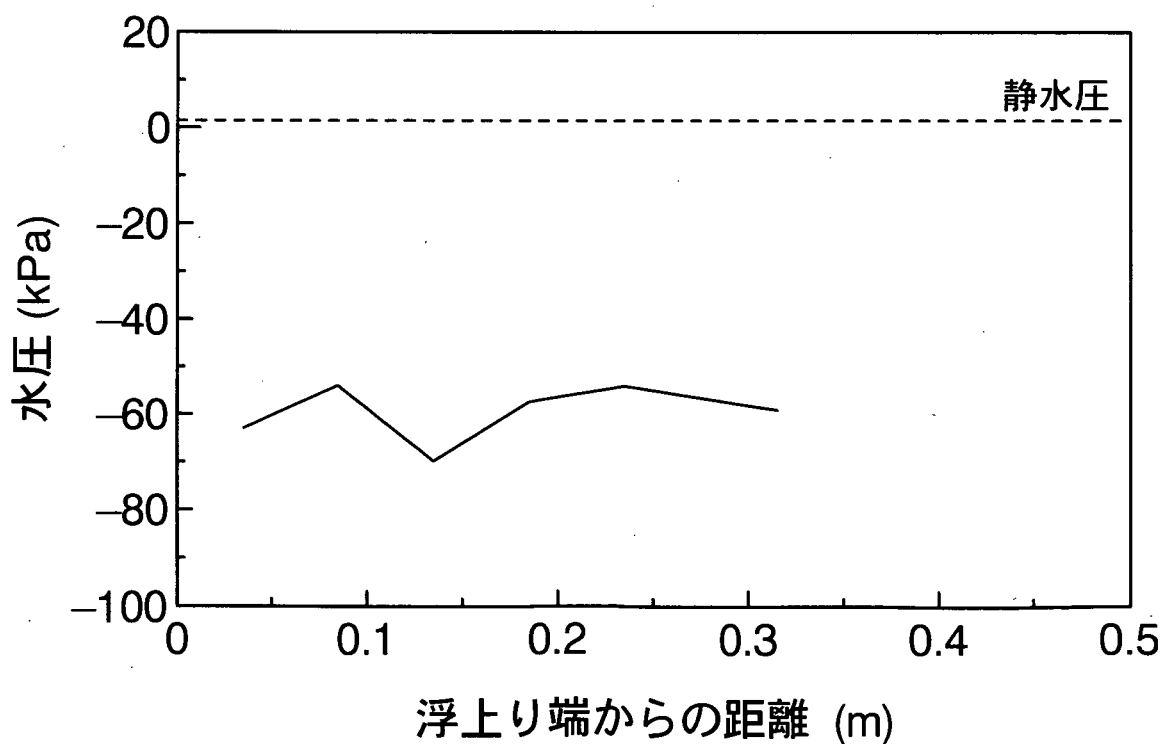
図一付 5.23 c37: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=0.966\text{sec}$)



図一付 5.24 c38: 水深 $h=250\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=0.381\text{sec}$)



図一付 5.25 c40: 水深 $h=150\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.05\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=0.970\text{sec}$)



図一付 5.26 c41: 水深 $h=150\text{mm}$, 回転角速度 $\omega=0.2\text{rad/sec}$, 弾性地盤(止水ゴムあり)
($t=0.397\text{sec}$)