

土木研究所資料

砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験

昭和51年6月

建設省土木研究所
振動研究室

砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験

振動研究室	室長	岩崎敏男
	研究員	龍岡文夫
	技官	吉田精一

目 次

はじめに	1
第1章 実験装置・実験方法・予備実験	2
第2章 砂層模型実験	8
第3章 杭模型実験（乾燥砂層実験）	21
第4章 杭模型実験（飽和砂層実験）	36
第5章 ま と め	97
参 考 文 献	98

は　じ　め　に

本土木研究所資料は次の目的で行った室内実験の結果をとりまとめたものである。

- (1) 地震時の砂質地盤の応答特性の解明
- (2) 地震時の砂質地盤の動的沈下特性の解明
- (3) 地震時の砂質地盤に設置された杭の動的挙動の解明

尚、この実験を行う上で、日本大学修士課程坂場義雄氏の修士論文研究の一部として、又、中央大学4年生池本正英氏・野間博伸氏の卒業論文研究の一部として、三氏の協力を得た。

第 1 章 実験装置・実験方法・予備実験

図 1-1、写真 1-1 に示す様に砂箱を 2 台の油圧式の水平補助振動台の上に載せ、ロッキングが生じない様にし、電磁式のアクチュエーターで駆動した。砂箱は図 1-2 に示すように内寸で長さ約 126 cm、幅約 50 cm、深さ約 80 cm であり、振動方向の端壁は下端ヒンジの可動となっており、上端をワイヤーロープで結び開かないようにし、砂層がなるべく一様にせん断振動する様にした。油圧式水平補助振動台 (写真 1-2) は油圧で摩擦を切る方式である。電磁式アクチュエーター (写真 1-3) は能力 0.5 トン-G のものである。

図 1-3、1-4、1-5、1-6 に実験に用いた砂の物理特性を示す。せん断剛性率 G と履歴減衰係数は共振法土質試験機¹⁾ 低周波動的せん断試験機²⁾ を用いて求めたものである。図 1-5 中の G の推定線は次の方法で求めた。

一般に、 G は次式であらわせる。³⁾

$$G = A(\tau) B \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} p' m(\tau) \dots (1-1)$$

$A(\tau)$ 、 $m(\tau)$ はせん断歪 τ の関数であり、 B は砂によって異なる係数であり p' は $\frac{1}{3} (\sigma_1' + 2\sigma_3')$ であらわせる平均有効主応力であり、 e は間隙比である。(1-1) 式から

$$\{G\}_{p=1.0 \text{ kg/cm}^2} = A(\tau) \cdot B \frac{(2.17 - e)^2}{1 + e} \dots \dots \dots (1-2)$$

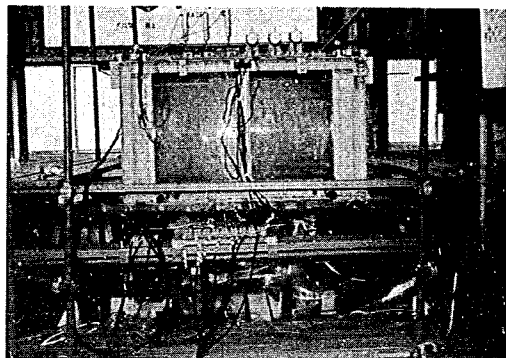


写真 1-1 砂箱全体写真



写真 1-2 油圧式水平補助振動台

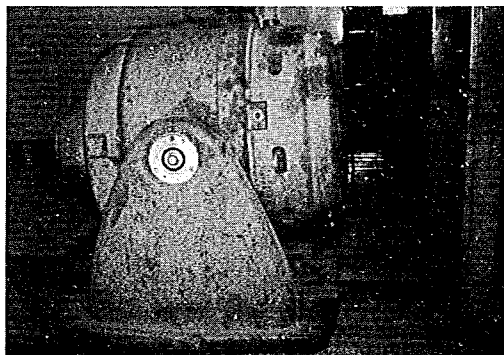


写真 1-3 電磁式アクチュエーター

(1-1)、(1-2)から

$$\{G\}_{p \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2} = \{G\}_{p=1.0 \text{ kg/cm}^2} \cdot p^{m(r)} \quad \dots\dots\dots (1-3)$$

$r=10^{-4}$ で $m(r) \div 0.5$ であるから、(図1-4)

$$\{G\}_{r=10^{-4}, p \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2} = \{G\}_{r=10^{-4}, p=1.0 \text{ kg/cm}^2} \cdot p^{0.5} \quad \dots\dots\dots (1-4)$$

$$\therefore [G/\{G\}_{r=10^{-4}}]_{p \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2} = [G/\{G\}_{r=10^{-4}}]_{p=1.0 \text{ kg/cm}^2} \cdot p^{\{m(r)-0.5\}} \quad \dots\dots\dots (1-5)$$

$m(r)$ は豊浦砂でのデータを用い、 $m(10^{-5})=0.44$ 、 $m(10^{-4})=0.5$ 、 $m(3 \times 10^{-4})=0.6$ 、 $m(10^{-3})=0.8$ 、 $m(3 \times 10^{-3})=0.98$ 、 $m(5 \times 10^{-3})=1.0$ として(1-5)式を用いて $[G/\{G\}_{p=1.0 \text{ kg/cm}^2}]$ の実測値から $[G/\{G\}_{r=10^{-4}}]_{p \approx 1.0 \text{ kg/cm}^2}$ の値を推定した。

図1-6の $p=0.2 \text{ kg/cm}^2$ の η の推定値は、 $p=0.2 \text{ kg/cm}^2$ と 1.0 kg/cm^2 での η の差は豊浦砂と等しいとして求めた。

砂層は全て写真1-4、1-5に示すように砂箱底面から90 cmの所に口があるホッパーを用いて作製した。飽和砂層は、まず水を張って置いて、その中に空気乾燥砂を落下させて作製した。図1-7にホッパーの口の開口度と砂層内の間隙比の関係を示す。今回の実験では、ホッパーの開口度1.55 cm、ホッパー移動速度約20 cm/秒で作製したゆるづめ砂について実験した。

図1-8、1-9に予備振動実験の結果を示す。図1-8に示す様に、今回の電磁式アクチュエーターは、12 Hzで最も大きな駆動力を発揮するので、実験は全て12 Hzの正弦波で行った。又、端壁を固定すると、端壁に近い所では、砂箱中央(㊸で示す)での加速度より小さくなり、明らかに端壁固定の影響が出る。しかし、端壁を可動にすると、砂箱内の長手方向の加速度分布はほぼ様になる。又、図1-9に示す様に、砂表面では側壁から5 cm離れると、横手方向にもほぼ一様の加速度分布を示した。

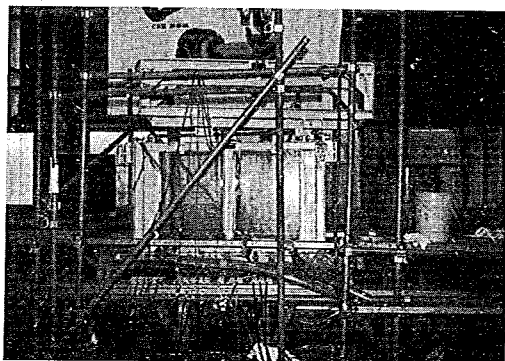


写真1-4 砂層作成装置

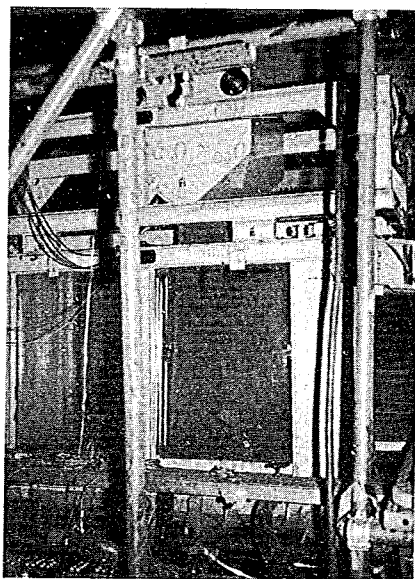


写真1-5 ホッパーから砂をまいている状況

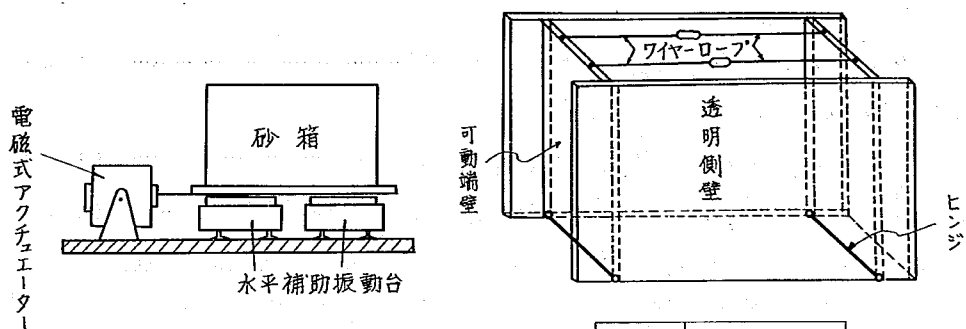


図1-1 振動台全体図

長さ	126.46 cm
幅	49.47 cm
深さ	79.88 cm

図1-2 可動端の壁

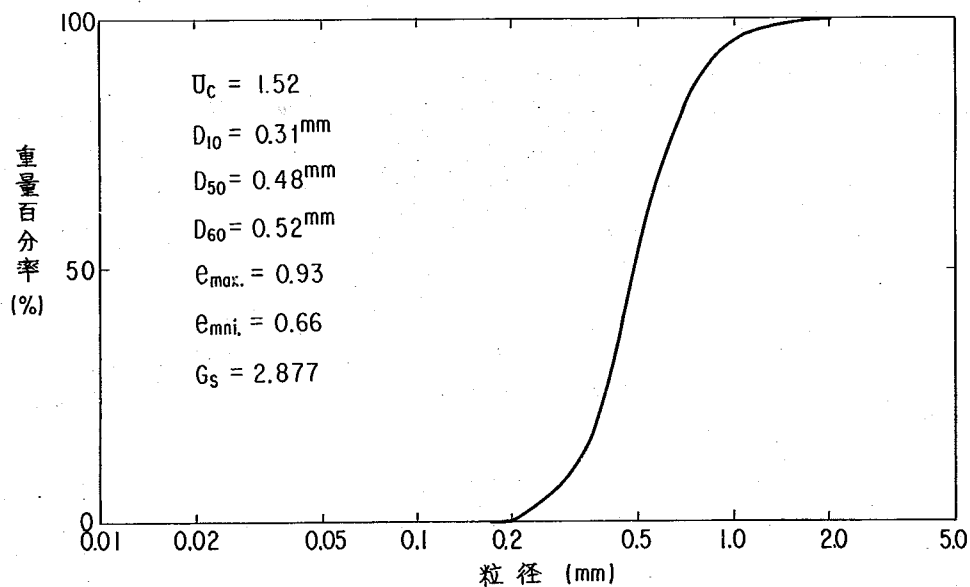


図1-3 用いた砂の粒度曲線

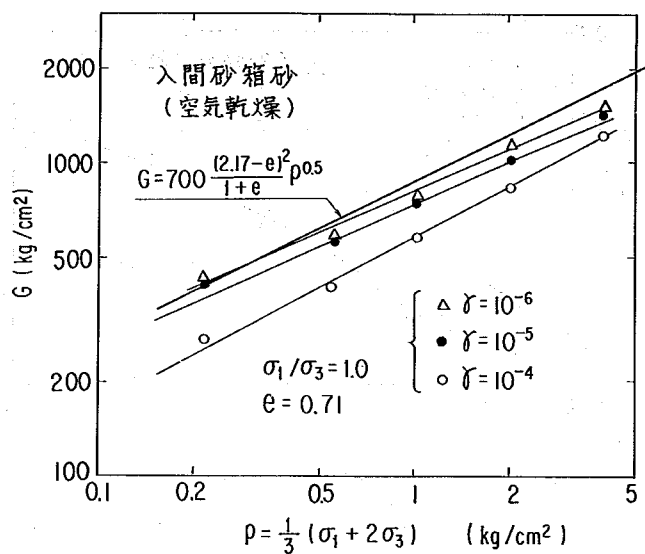


図1-4 用いた砂の $G \sim p$ 関係

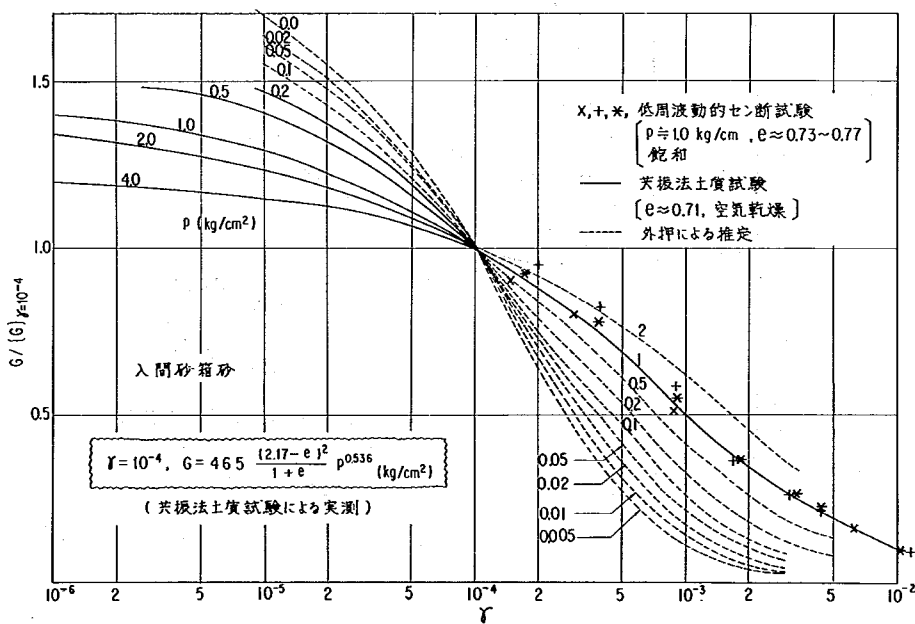


図1-5 用いた砂の $G \sim \gamma$ 関係

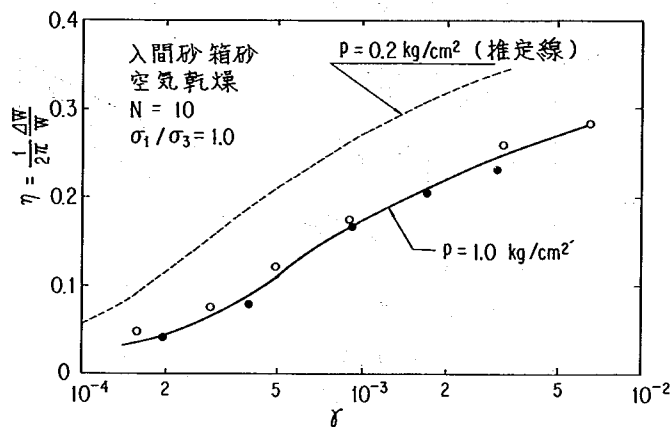


図1-6 減衰 $\sim r$ 関係

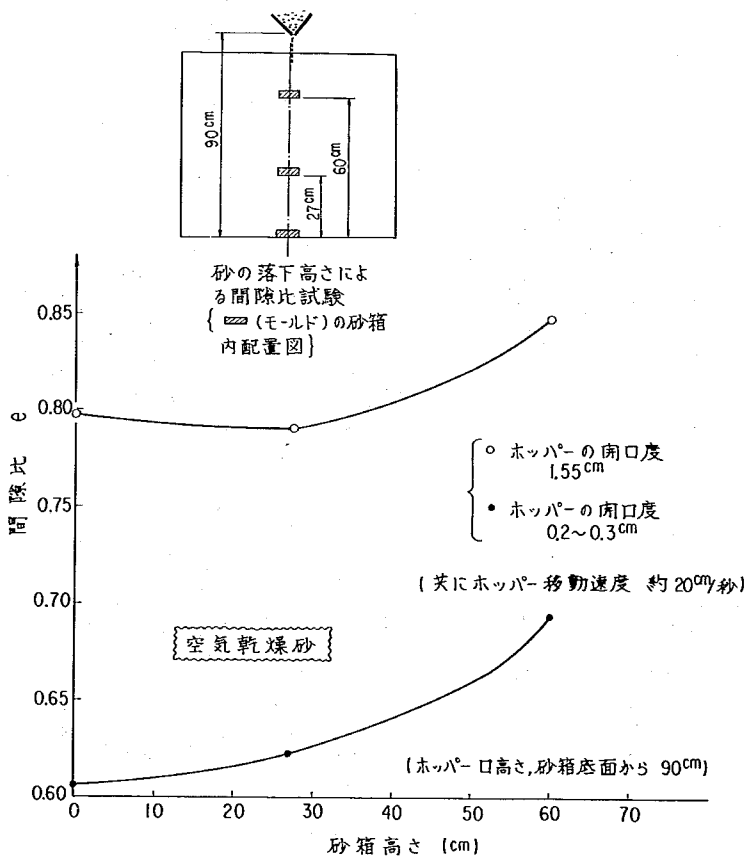


図1-7 ホッパー開口度による間隙比分布の変化

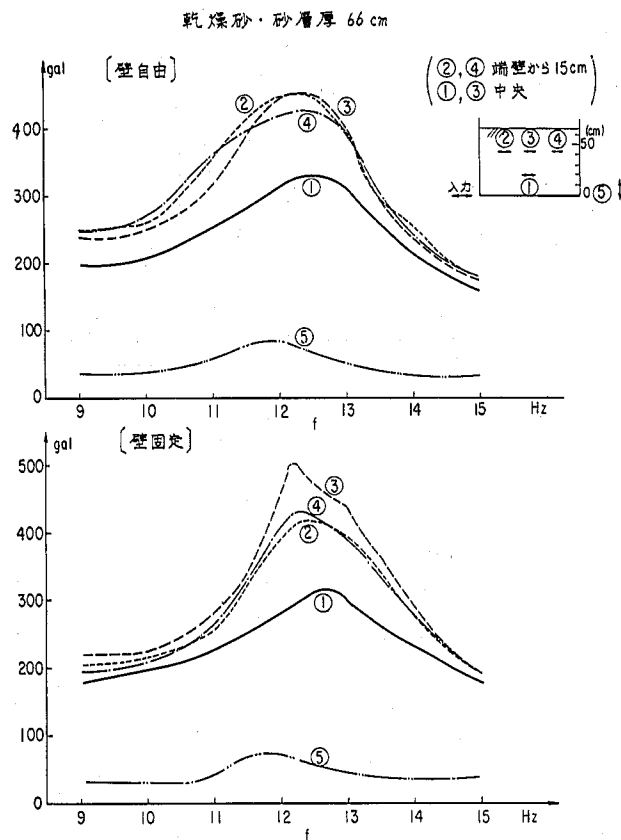
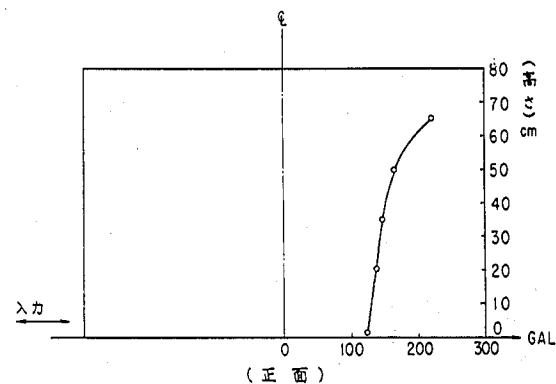


図 1-8 予備試験における加速度分布～周波数分布



下図は台加速度を 1.0 とした場合の砂表面 (高さ 60 cm) の加速度分布

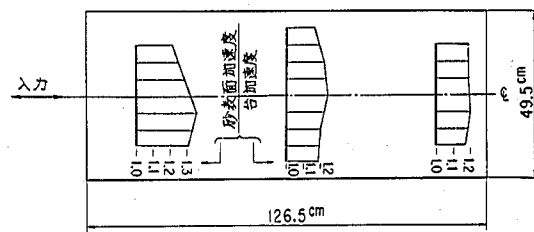


図 1-9 予備試験における砂層内における加速度分布

第2章 砂層模型実験⁵⁾

砂質地盤が地震時にゆりこみ沈下することが知られている。⁴⁾特に液状化が生じた時にその量も大きくなる。今回、小型振動台による砂箱振動台実験を行ない、動的沈下の予備的検討を行った。

図2-1に計測器配置を示す。砂層中に豊浦砂の薄層(A、B、C層)を入れた。表2-1に用いた計測器の一覧を示す。写真2-1~2-4は計測器の写真である。加速度計は $16 \times 16 \times 20$ mmの大きさであり、図2-2に示す様にアクリル版を用いて砂層との相対変位がなるべく生じない様にした。

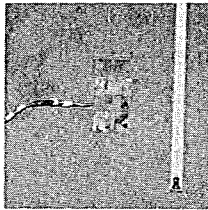


写真2-1 加速度計

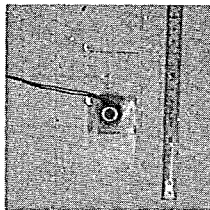


写真2-2 間隙水圧計

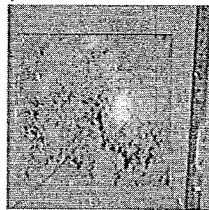


写真2-4 沈下版

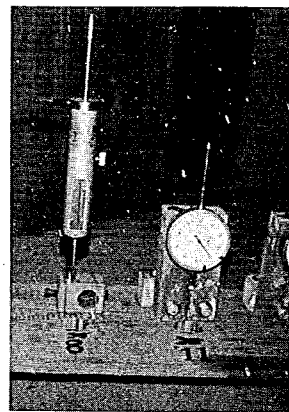


写真2-3 (右)ダイヤルゲージ
(左)変位計

表2-1 計測器

測定項目	計 器	製造業者	方式	容 量
加 速 度	加 速 度 計	シンコー	歪ゲージ	2 G
間隙水圧	間 隙 水 圧 計	ST研究所	半 導 体	400 g/cm^2
沈 下 量	変 位 計	共和電業	差動トランス式	$\pm 50 \text{ mm}$
	ダイヤルゲージ	ミカサ		30 mm 50 mm
	ノギス物さし			

表2-2 実験条件

表2-2に実験条件を示す。実験は振動入力異なる数段階の実験を行った。図2-3に乾燥砂層実験での加速度、沈下~時間曲線を示す。図2-3に示すように乾燥砂の場合、加振の最初での沈下量が大きく徐々に沈下率は減少して定常状態となる。図2-4に各段階での振動モードを示す。上層ほど加速度 $a(\text{gal})$ の高さに対する変化率 $\partial a / \partial h$ が大きい。図2-5に各段階での各種の方法で求めた累積沈下量(体積収缩量) v を示す。ここで、図2-4から

	初期 間隙比 e_0	実 験 段 階 (仮 称 台 加 速 度)				加振 時間	振 動 数
		I	II	III	IV		
乾燥砂	0.80 0.85	gal 100	gal 200	gal 250	gal 300	30, 60 秒	12 Hz
飽和砂	0.80	gal 100	gal 150	gal 250	gal 100	60 秒	12 Hz

$$\tau = \frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{\partial a}{\partial h} (f=12) \text{ からセン断}$$

歪を求め、 v との関係を図2-6に示す。 r が 10^{-3} を越えると v は大きくなり、又、 $v \sim r$ 関係は深さ(拘束圧)によらないことが分かる。

図2-7～2-12に飽和砂層での実験を示す。段階Ⅰでは33秒で地表近くのみで液状化が生じている。図2-8は段階Ⅱの場合で液状化のため、非定常な現象が生じた時のものである。図2-9に加速度振幅分布の変化を示す。完全液状化に達する直前で加速度応答値が非常に大きくなっており、完全液状化するとそれより上層の加速度はほとんどゼロになる。上層ほど早く液状化に達し、回復するのが一番遅い。図2-10に段階Ⅲの結果を示す。この場合も再度全層に亘って液状化が生じている。このことは、一度液状化した地盤も更に大きい入力に対しては再度液状化しうること示している。又、図2-8、2-10の加速度振幅分布で非常に特徴的なことは、液状化に至る時は浅い層から順次(⑤、④、③、②の順)大きな応答値を示すことである。又、液状化から回復する時は逆に深い層から順次(②、③、④、⑤の順)大きな応答値を示し、やがて定常的な反応を示していることである。これは、砂の剛性の変化によるものであり、これを解析的に追跡できるようにするのは今後の課題である。図2-12で段階Ⅳの結果を示すが、過剰間隙水圧が上昇しない場合は飽和砂層でも定常的な振動を示している。

図2-13に各段階での累積沈下量 v を示す。台加速度は砂層に液状化が生ずると一定ではなくなるため、図に示す値を便宜的に用いた。段階ⅠではAB層あたりにのみ液状化が生じ、段階Ⅱ、Ⅲでは全層に亘って液状化が生じた。段階Ⅳでは全く液状化・沈下は生じなかった。従って、AB層はⅠでは最もよく体積収縮したが、Ⅱ、Ⅲでは上昇流のためか、体積収縮量はかえって小さくなっている。次に、加振時間中各層で生じた $(\partial \alpha / \partial h)$ の最大値 $(\partial \alpha / \partial h)_{max}$ から、セン断歪の最大値
$$r_{max} = \frac{1}{(2\pi f)^2} \times (\partial \alpha / \partial h)_{max}$$
を計算し v との関係を求めた(図2-13)。 $r_{max} > 10^{-3}$ で大きな沈下を生じ、 $r_{max} \sim v$ 関係は深さによらず、又、 $r(r_{max}) \sim v$ 関係は、ほぼ乾燥砂の場合と同じである。

このように、乾燥砂と飽和砂での体積収縮量が、そこに生じたセン断歪によって支配されるのならば、沈下量は振動モードにもかなり支配されることになる。乾燥砂の場合、上層ほど同じ台加速度に対して v が大きい。下層では大きな r が生じないから全体的沈下量はあまり大きくならない。飽和砂の場合、液状化が生ずると、図2-9、2-11に示すように局所的に $\partial \alpha / \partial h$ 、 r が大きくなるため、全層に亘って大きな r が順次発生し、全層的に大きな v が発生し、従って表面での沈下量も乾燥砂に比すと、同じ台加速度に対して格段に大きくなる。

以上に示した様に、セン断歪 r をパラメーターとして乾燥砂、飽和砂の動的沈下特性を統一的に検討することが可能であることが分かった。しかし、飽和砂層の場合は、セン断歪 r をパラメーターとして沈下を検討するためには、飽和砂層の非定常な振動特性を追跡できなければならない。今後の課題である。

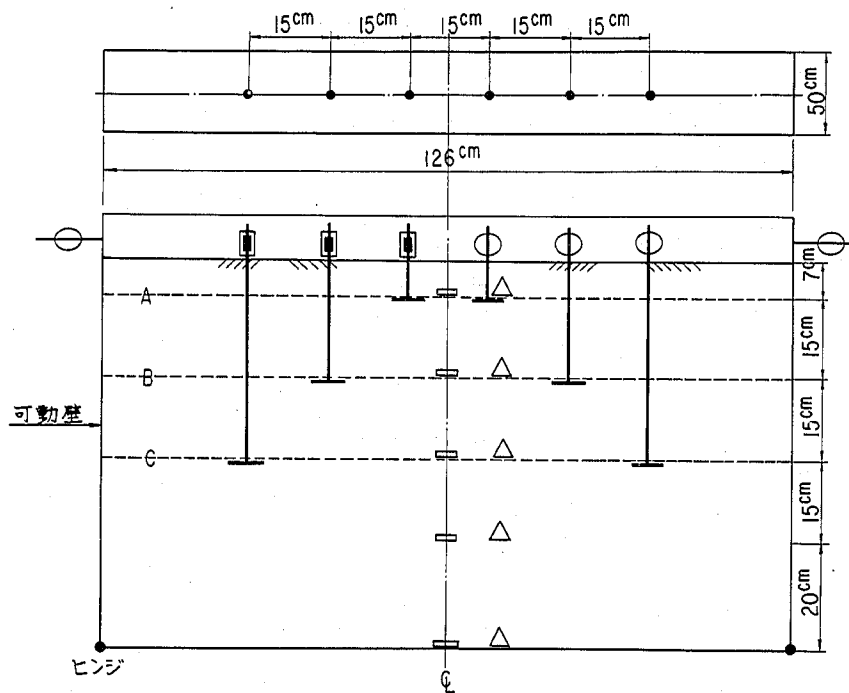


図 2-1 計測器配置図

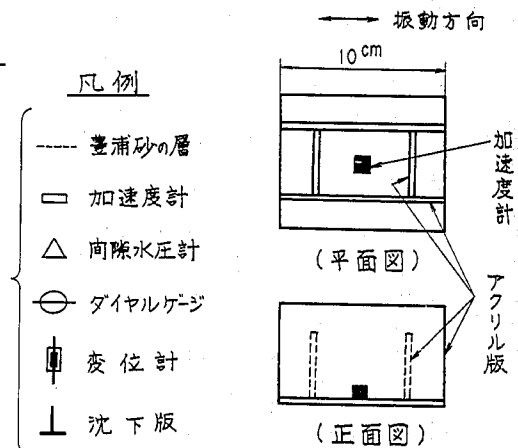


図 2-2 加速度計と砂層との固定法

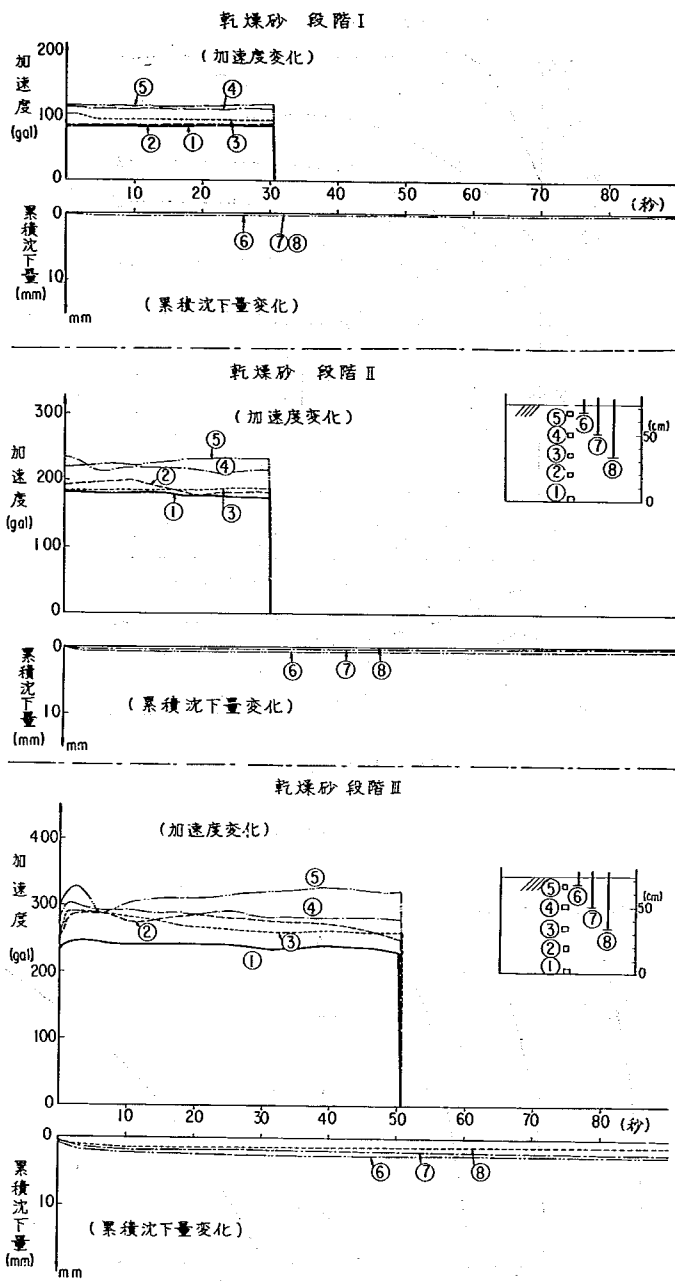


図 2 - 3 (1) 乾燥砂段階Ⅰ～Ⅲ

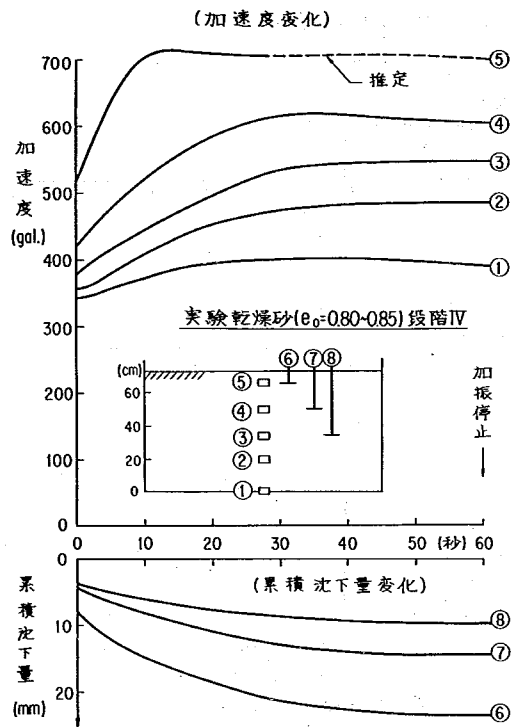


図 2-3(2) 乾燥砂段階IV

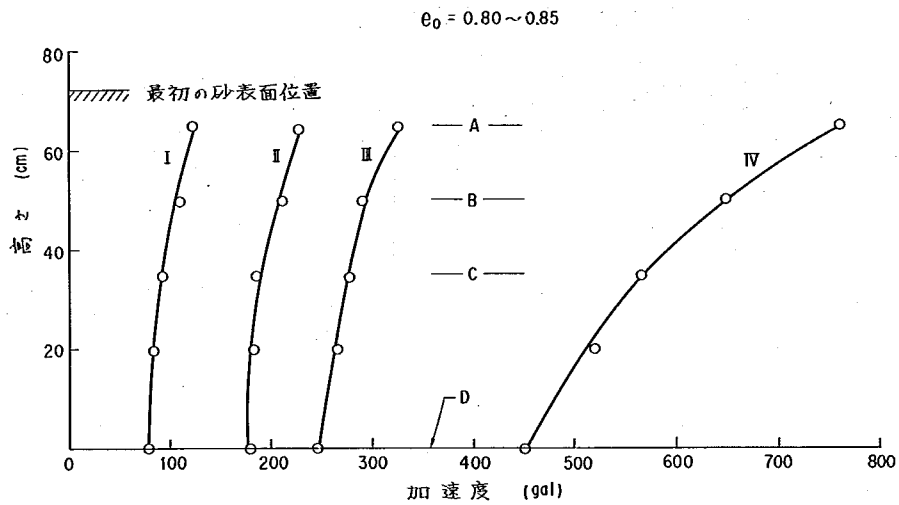


図 2-4 乾燥砂での振動モード

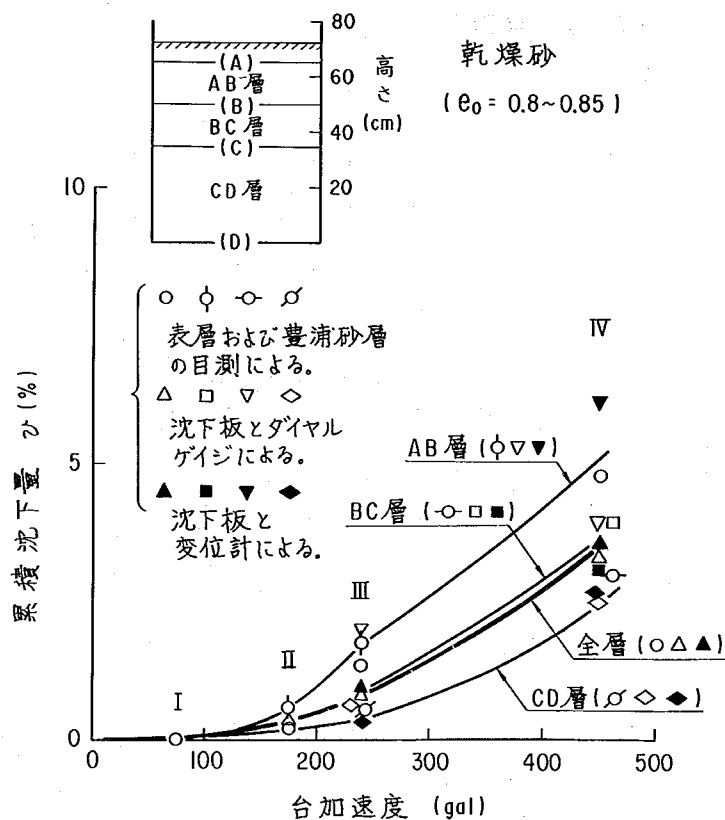


図 2-5 台加速度と累積沈下量の関係 (空気乾燥砂)

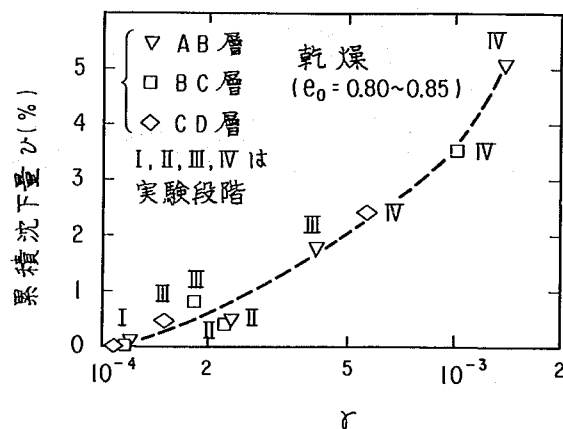


図 2-6 セン断歪と累積沈下量の関係 (空気乾燥砂)

飽和砂 段階 I

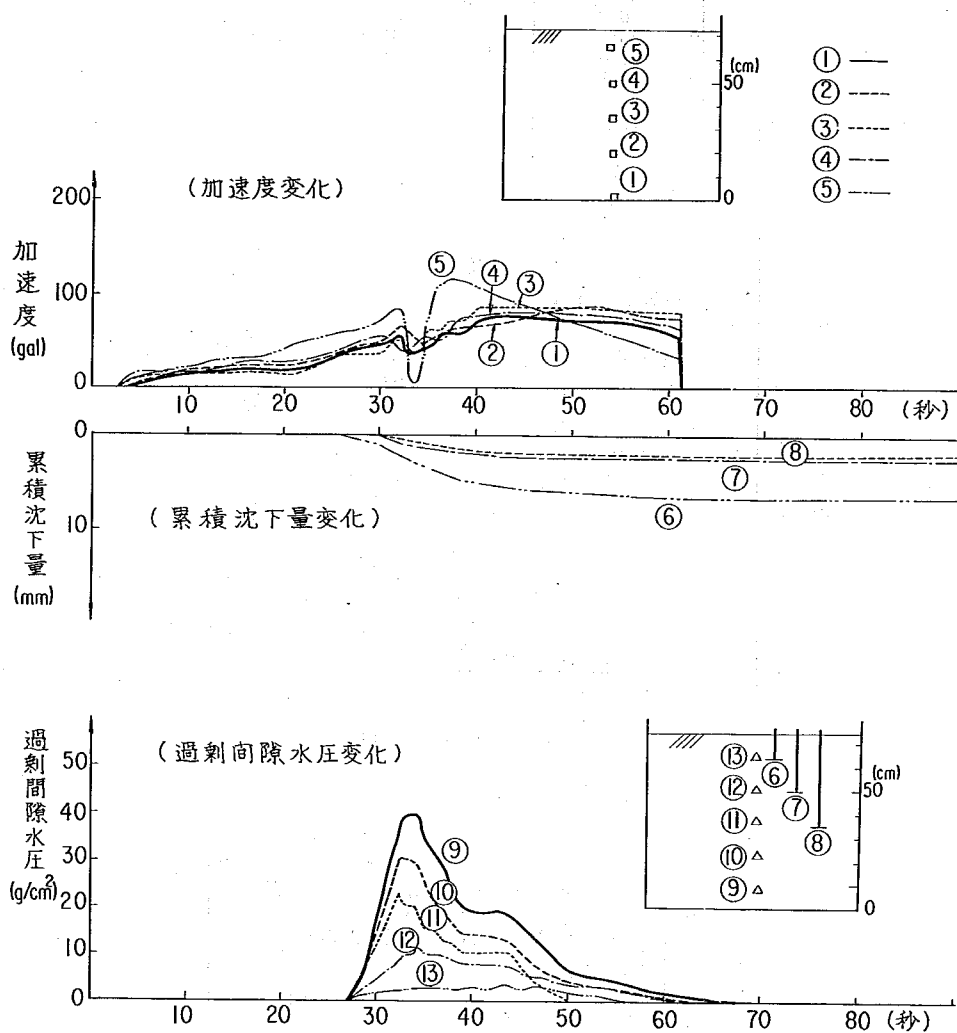
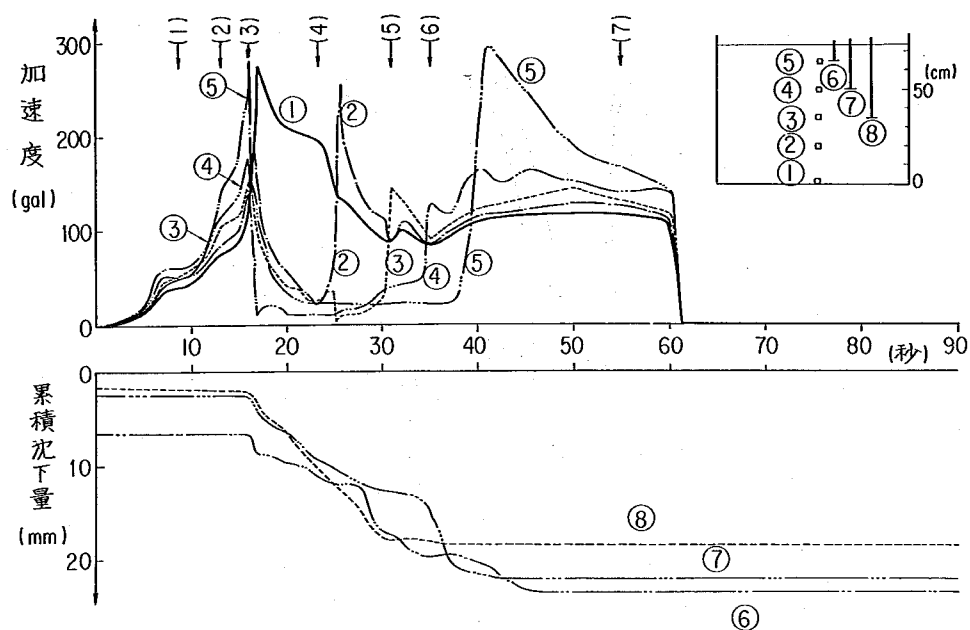


图 2-7 飽和砂段階 I



飽和砂実験 ($\bar{e}_0 = 0.80$) 段階 II

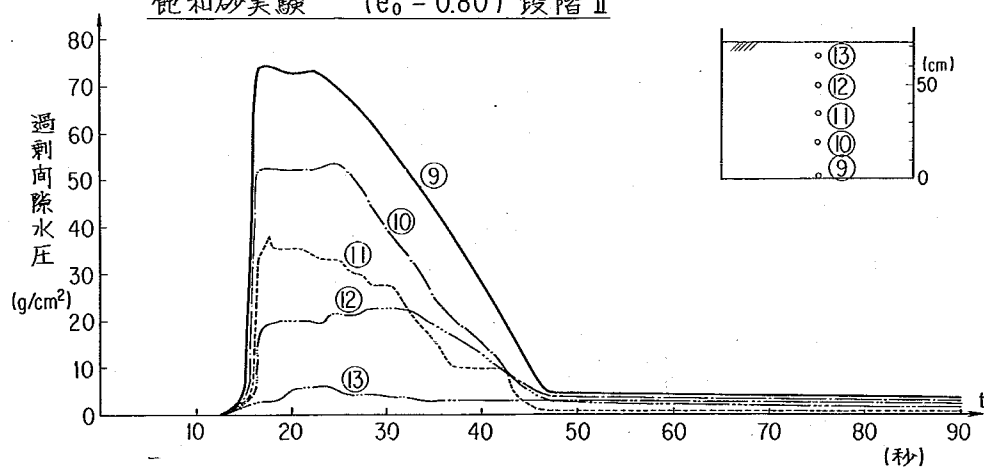


图 2-8 飽和砂段階 II

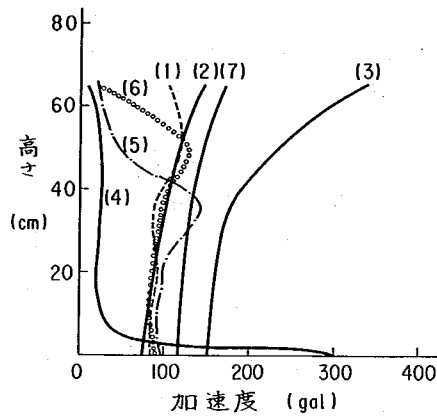


図 2-9 飽和砂（段階Ⅱ）における加速度振幅分布変化

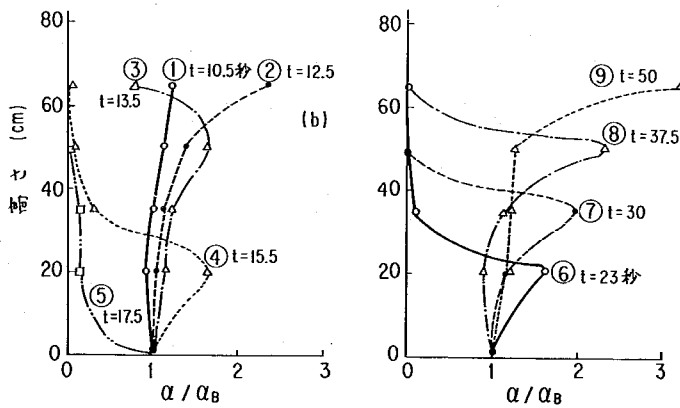
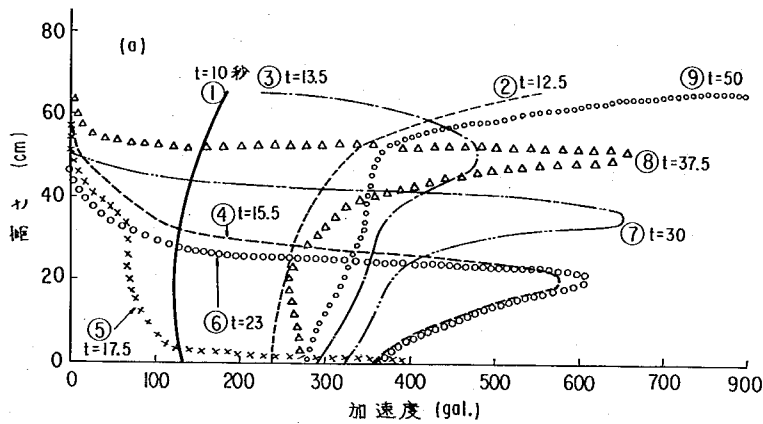


図 2-11 飽和砂（段階Ⅲ）における加速度振幅分布変化
（注、この図は位相を考慮していない）

飽和砂実験 段階Ⅲ

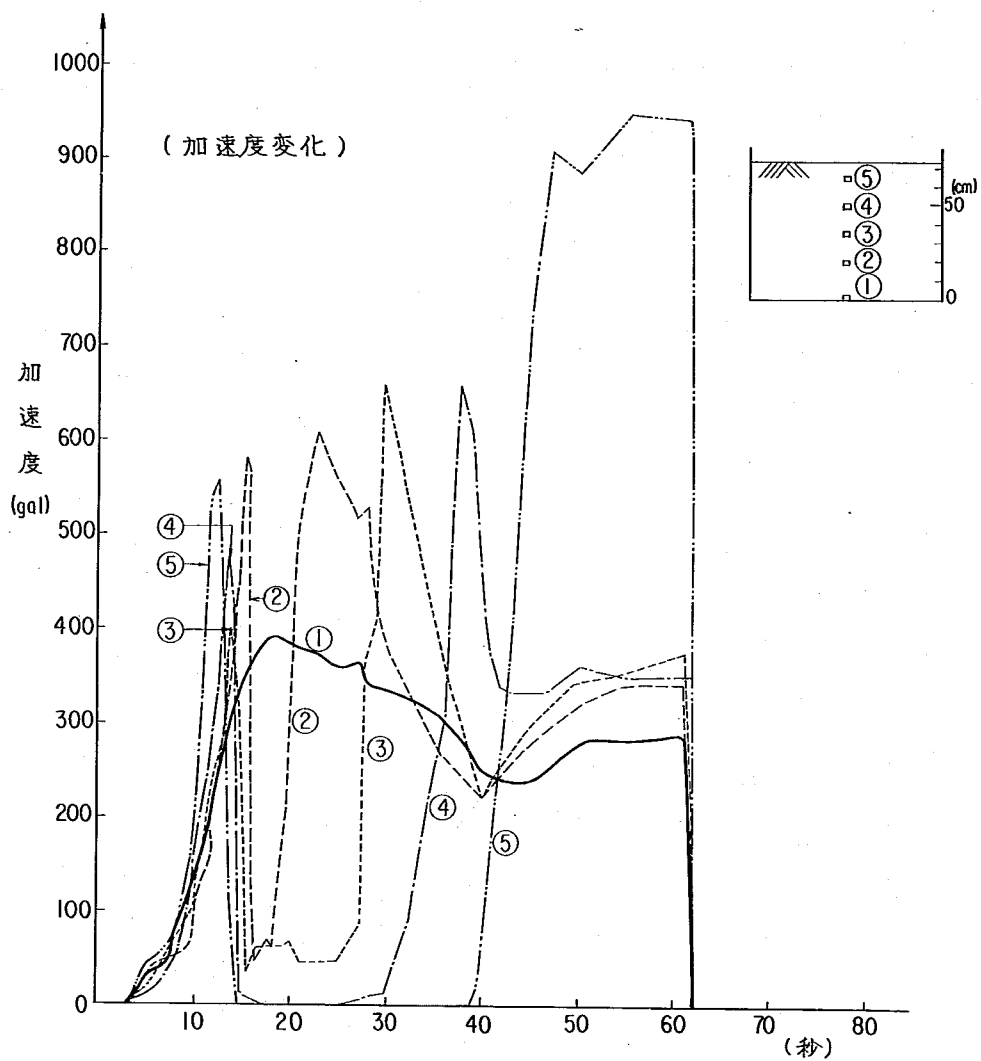


図 2-10(1) 飽和砂実験段階Ⅲ

飽和砂実験 段階Ⅲ

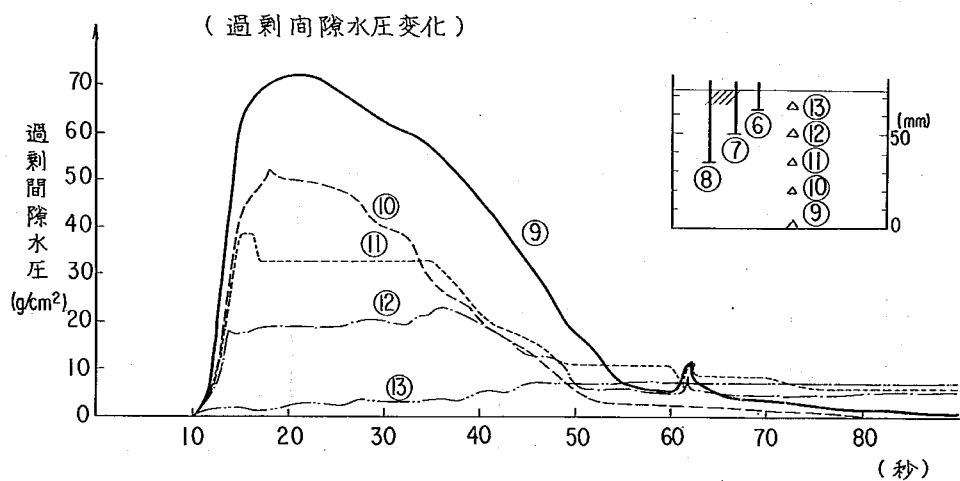
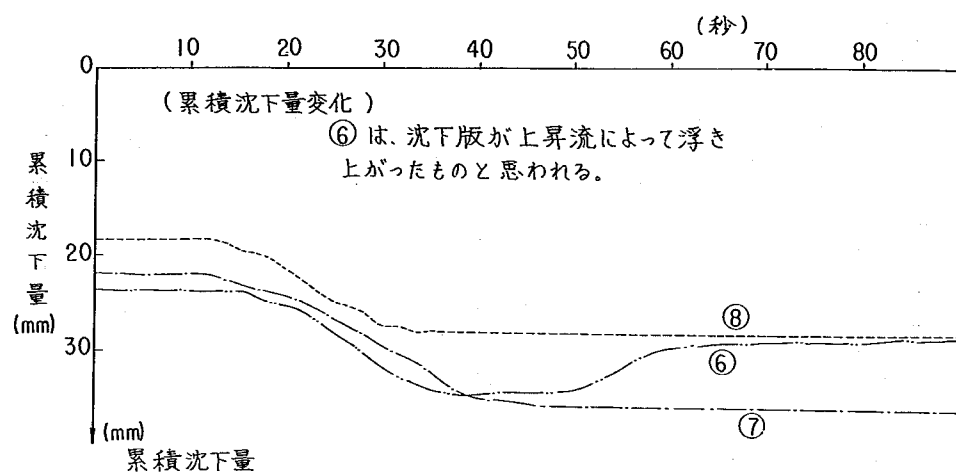


図 2-10(2) 飽和砂段階Ⅲ

飽和砂 段階Ⅳ

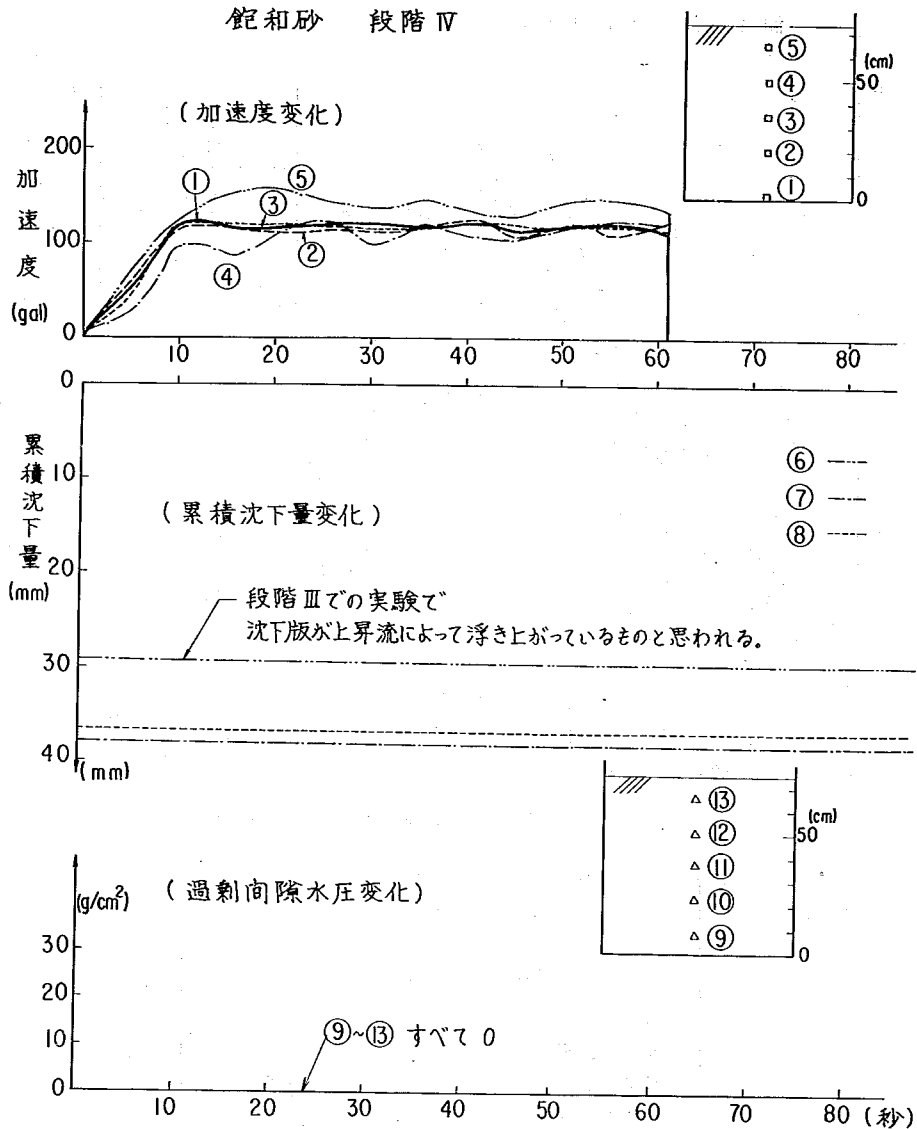


図2-12 飽和砂段階Ⅳ

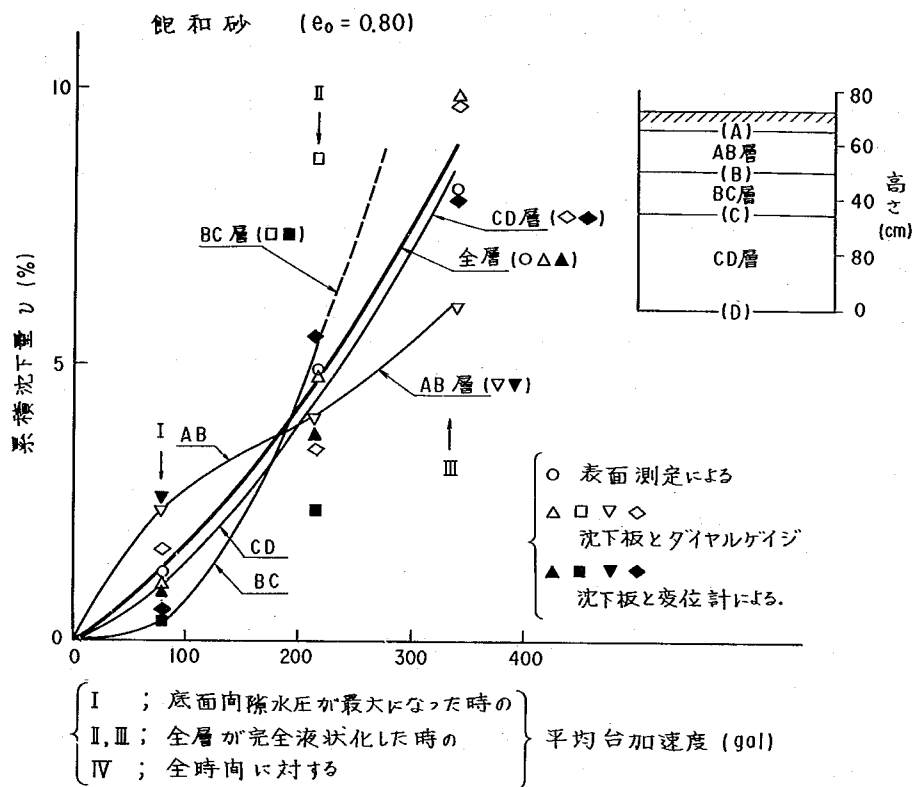


図 2-13 台加速度と累積沈下量の関係 (飽和砂)

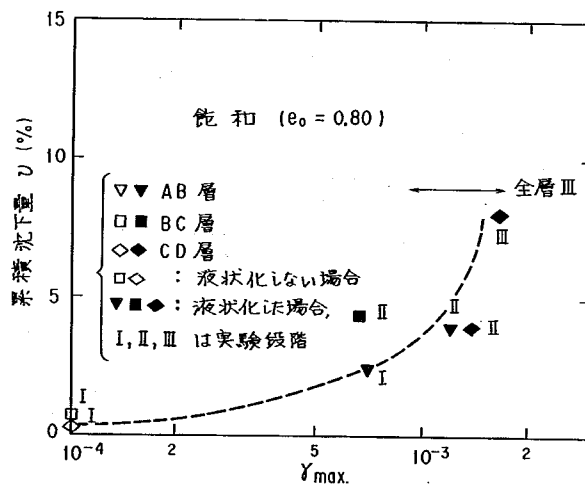


図 2-14 セン断歪と累積沈下量の関係 (飽和砂)

第3章 杭模型実験（乾燥砂層実験）

3-1 はじめに

現行の道路協会道路橋耐震設計指針では流動化（液状化）する砂質土層の取扱いは、「耐震計算上支持力を無視する」ことになっている。すなわち、流動化（液状化）する層は横抵抗力もないかわりに基礎に対して動土圧も作用させないと考えている。更に、道路橋の下部構造設計指針における杭基礎、ケーソン基礎の耐震設計計算は、上部工にある一定の水平震度をかける震度法で行っており、(i)基礎に発生する応力度、(ii)杭頭及びケーソン上端での水平変位量、(iii)ケーソンの面底、前面に働く応力度で耐震性をチェックしている。従って、一定の地盤が流動化（液状化）するかどうかの判定によって設計が大きく変わってくる。しかし、流動化する砂層を無視し、更に上部工に水平震度をかけて設計計算をする方法に対する実験的検討を行う必要があるものと思われる。まず上部砂層の完全流動化（液状化）は、地震動の主要動が終わった後に生ずるのかも知れない。更に、完全流動化（液状化）した時に主要動が来ても、この時は、地震力は上方に伝播しないために地盤は振動しないから、上部工が大きく応答することがないかも知れない。その場合は、完全流動化（液状化）した層の無視と、上部工への大きな地震力を同時に考慮する方法は安全すぎる考え方となろう。しかし、砂層が完全に流動化（液状化）に至る過程において地盤と基礎との様々な相互作用が生じ、予期しない大きな地震力が基礎に作用するかも知れない。実際にどのような現象が生ずるかは、実測がないために現在の段階では予想するより方法はないものと思われる。一方、地震時には橋梁基礎が設置されることの多い現河道か、旧河道の埋立地、海岸、湖沼岸の埋立地は地震時に液状化する可能性があることが、これまでの調査によって明らかにされてきつつある。⁴⁾ 液状化する地盤内の杭基礎の合理的設計法の確立を究極の目的として、今回、振動台上の砂箱中に作製した乾燥砂層及び飽和砂層中に単杭及び群杭模型を設置し、正弦波振動による模型実験を行った。⁷⁾ この実験の結果、これまでの実験例^{8), 9)}と同様に流動化する過程で地盤はきわめて非定常で特異な振動性状を示し、これが杭の挙動を支配することが分った。

表3-1に示す4種の実験を行った。単杭模型実験は図3-1、写真3-1、写真3-2、写真3-3に示す様に、曲げ剛性EIが約10倍づつ異なる3本の単杭模型を同時に設置し、乾燥砂層と飽和砂層で実験を行った。群杭模型実験は図3-2、写真3-4、3-5、3-6、3-7、3-8に示す様に9本の単杭からなる1つの群杭模型を設置し、乾燥砂層と飽和砂層について実験を行った。単杭と群杭共図3-1、3-2に示す様な方法で砂箱底面に固定した。群杭の杭頭は杭頭質量に固定した。いずれの模型も液状化する砂層から上にある部分を模型化したものであり、液状化する砂層の下面は砂箱の底面であると想定した。4種の実験では、いずれも表3-1に示すように台加速度を変化させた5段階の実験を行い、各段階では12Hzの正弦波で60秒間加振させた。計測項目は、砂中加速度

表 3-1 実 験 条 件

実 験 名 称	地 盤 条 件	台 加 速 度 (仮 称) gal					加 杭 時 間 (秒)	振 動 数 Hz
		I	II	III	IV	V		
単 杭 乾 燥	空 気 乾 燥	100	150	200	250	300	約 60	12
単 杭 飽 和	飽 和	100	150	250	150	300	約 60	12
群 杭 乾 燥	空 気 乾 燥	100	150	200	250	300	約 60	12
群 杭 飽 和	飽 和	100	150	250	150	300	約 60	12

分布、砂中間隙水圧分布（飽和砂層の場合のみ）、杭頭加速度、杭中間加速度（群杭のみ）、杭中間土圧、杭歪である。

単杭と群杭の示様は表 3-2 に示すが、これは次のような考えで決めた。液状化が生じていない時の杭の振動特性は、地盤内においてはほぼ地盤の振動特性と一致しているであろう。又、完全液状化している時の杭の振動特性は水中にある時と類似であろう。とすると、液状化が生じてゆく過程での杭の応答特性は、地盤の応答特性及び杭の水中あるいは空気中にあるときの応答特性と関連があるであろう。応答特性に対する最も大きな要因は、固有周期と入力卓越周期との関連である。一般に、

表 3-2 杭 諸 元

名 称	厚 さ	幅	長 さ	杭 頭 質 量	E I	自由振動数		杭 材 料
						空 気 中	水 中	
単 杭 4.5	0.45 cm	6 cm	70 cm	0.54 Kg	$9.6 \times 10^4 \text{ Kg cm}^2$	5.8 Hz	2.7 Hz	鋼 製
単 杭 9	0.9	6	70	0.54	7.7×10^5	10.6	8.5	〃
単 杭 22	2.2	6	70	0.54	1.1×10^7	13.8	13.4	〃
群 杭	直径 2 cm		70	44	2.4×10^8 *)	4.0	3.8	アルミ

*) 杭先端、杭頭の固定が完全として計算した値

考えられるのは、次の様な固有周期（固有振動数）の相対的関連であろう。

（実際の橋梁基礎の場合で液状化する恐れのある砂質層の固有振動数） > （強震時の主要動の卓越振動数） > （液状化する層がないと仮定した場合の橋梁の固有振動数）

この関係を満足することを第一義として模型を製作した。まず砂地盤模型のセン断歪振幅 $\gamma = 10^{-4}$ での固有振動数は、セン断剛性率 G を中空ねじり供試体を用いた要素実験から求め推定した所、飽和砂層で約 18 Hz、乾燥砂層で約 22 Hz となった。後に述べる様に、台加速度が小さく砂中のセン断歪

r が 10^{-4} 前後の時は砂層の応答倍率は小さいが、台加速度が大きくなり r が大きくなり、 G が低下すると、 12Hz の加振力に対する砂層の応答倍率も大きくなり、砂層の固有周期が 12Hz に近づいているものと思われるから、上述の推定値もおかしくないものと思われる。振動入力はいずれも 12Hz の正弦波である。実際の地震動はランダム波であるので、この点から言うと、本実験は不十分なものである。単杭 4.5mm 厚模型と群杭模型の水中固有振動数は表 3-2 に示すようにそれぞれ 2.7Hz 、 3.8Hz であり、砂層の固有振動数、加振入力の振動数より小さく、上述の固有振動数関係を満足している。単杭 9mm 、 22mm 厚模型は EI の影響を調べるために設置した。又、群杭模型では実際に想定した橋梁基礎を相似律を考えて模型化するようにし、実物と模型では EI/L^5 が一致するようにした (L は長さの単位を持つ)。図 3-3 に予備試験として行った杭の空気中、水中での振動特性を示す。入力は 12Hz の正弦波であるが、水中の場合、全ての杭の応答値は小さくなっている。第 3 章には乾燥砂層での実験結果を示し、第 4 章に飽和砂層の実験結果を示す。

3-2 実験結果

図 3-4 に単杭で乾燥砂層実験での各段階の結果を示す。段階 I、II、III では砂中加速度分布が高さ方向にはほぼ一定であり、砂中のセン断歪も非常に小さい。この時は、杭に作用する動土圧もほとんど零であり、杭歪もほとんど零である。杭頭加速度も砂表面加速度とほぼ一致し、 EI の大きさによらず杭と地盤はほぼ一体に振動している。段階 V では砂中加速度分布が高さ方向に大きく変化し、砂中のセン断歪も大きくなっている。この時は、杭に作用する動土圧も非常に大きくなっており、杭歪に大きくなっている。動土圧の位相は、地盤が杭を動かしていることを示していたので、地盤が大きくセン断振動して、それによって強制的に杭が動かされているものと思われる。又、特徴的なことは、 EI の影響があまりないことである。同様に群杭で乾燥砂層実験での各段階での結果を図 3-5 に示すが、単杭とはほぼ同様な結果となっている。

即ち、砂中加速度分布が高さ方向に一樣である場合は、動土圧の杭歪、杭頭加速度も小さいが、砂中加速度分布が高さ方向に大きく変化する場合は、動土圧、杭歪、杭頭加速度も大きくなっている。この場合も動土圧の位相は地盤が杭を押していることを示しており、剛性の大きい群杭の場合は単杭の場合に比して、地盤の動きに対する杭の抵抗力が大きいために動土圧も大きくなっているものと思われる。

図 3-6、3-7、3-8、3-9 に砂層の沈下の記録を示す。図 3-10 は、単杭実験での各実験段階の間での静止状態の上載圧と横方向圧力の比 K を $r_t = 1.6g/cm^2$ として求めた時の変化を示す。杭に付けた土圧計で振動方向に受圧面が向いている場合は、傾向がはっきりしないが、受圧面が振動方向に直角な場合は、振動によって K の値は増加してゆくことがはっきりと分かる。

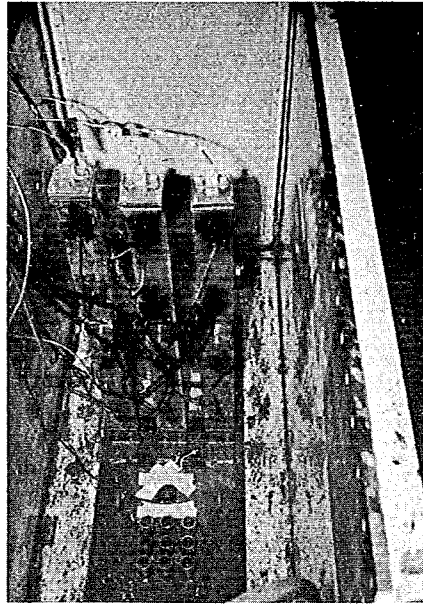


写真3-1 单杭配置

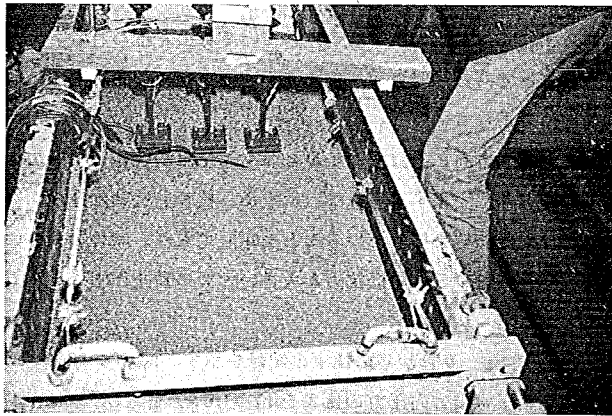


写真3-2 单杭乾燥砂層実験開始時

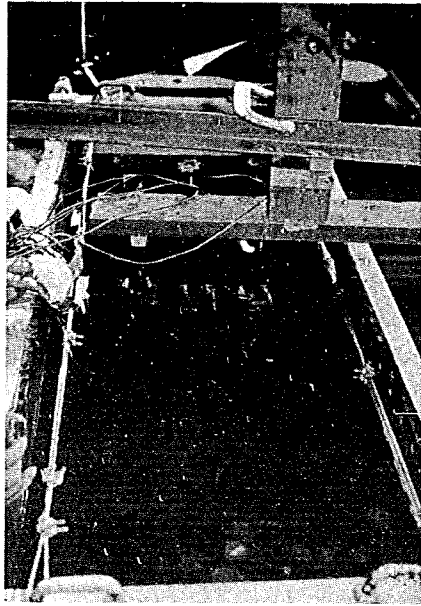


写真 3 - 3 单杭飽和砂層実験段階 I 終了時

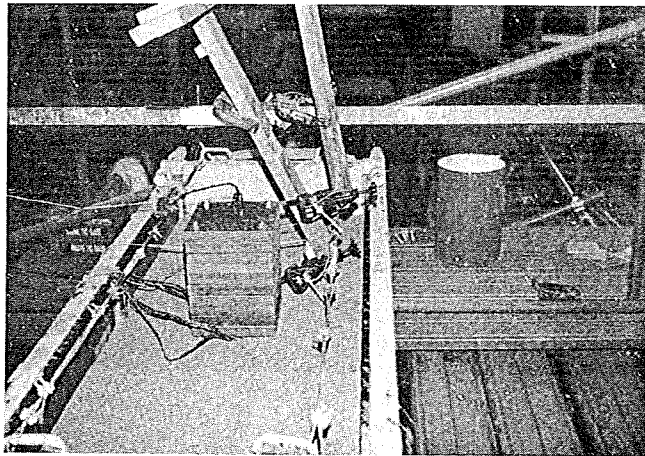


写真 3 - 4 群杭乾燥砂層実験開始時

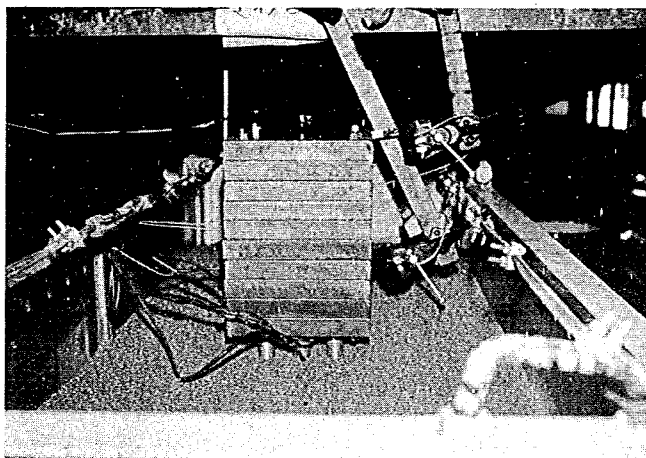


写真 3-5 群杭乾燥砂層実験段階Ⅳ終了時

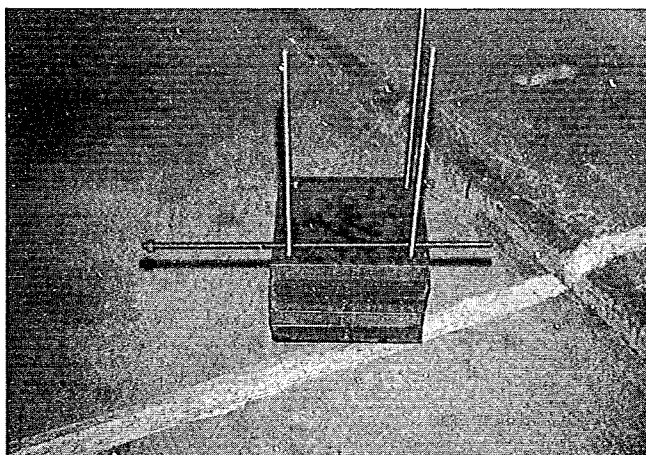


写真 3-6 群杭用トップマス

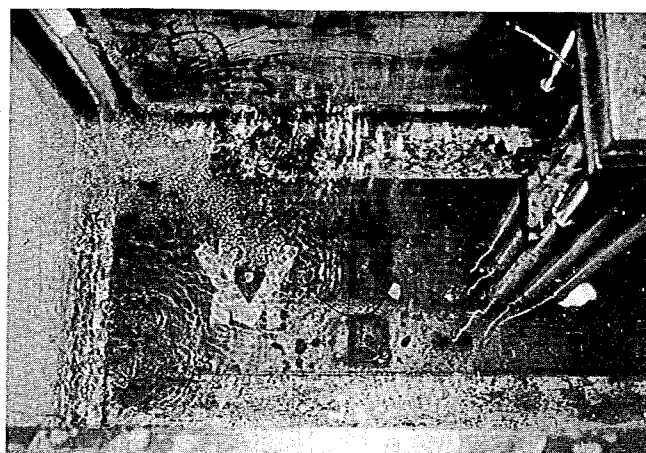


写真 3-7 群杭飽和砂層実験準備

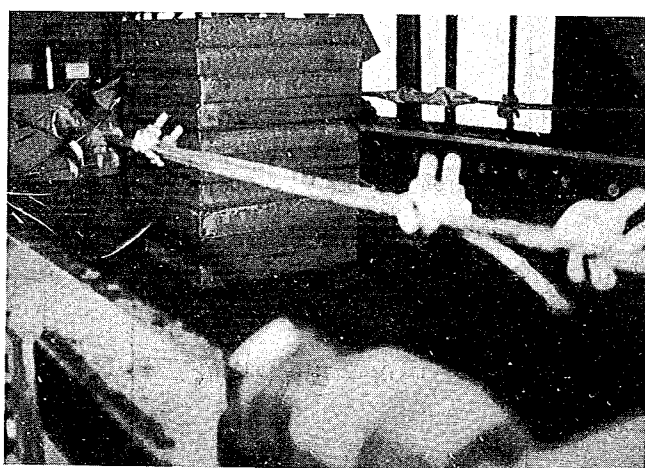


写真 3-8 群杭飽和砂層実験開始時

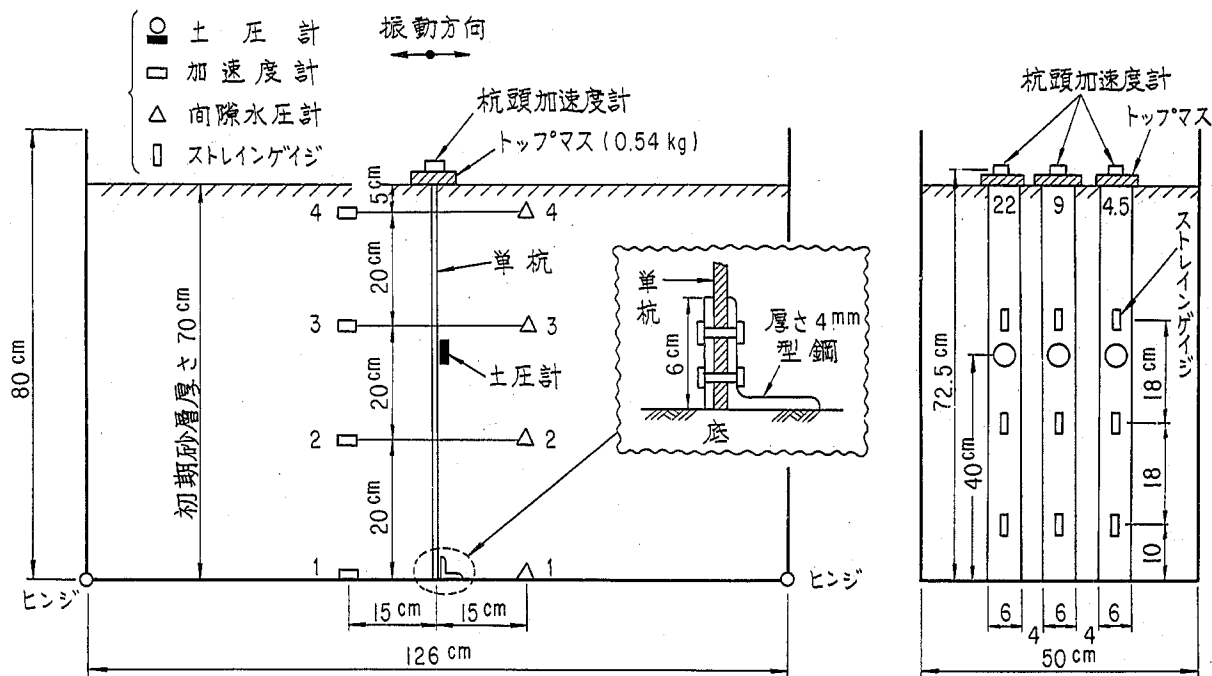


図 3-1 単杭実験計測装置配置図

振動方向

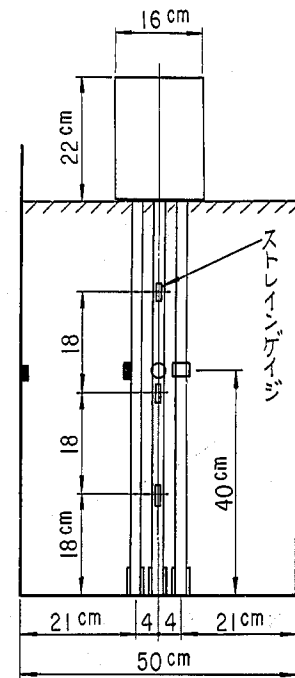
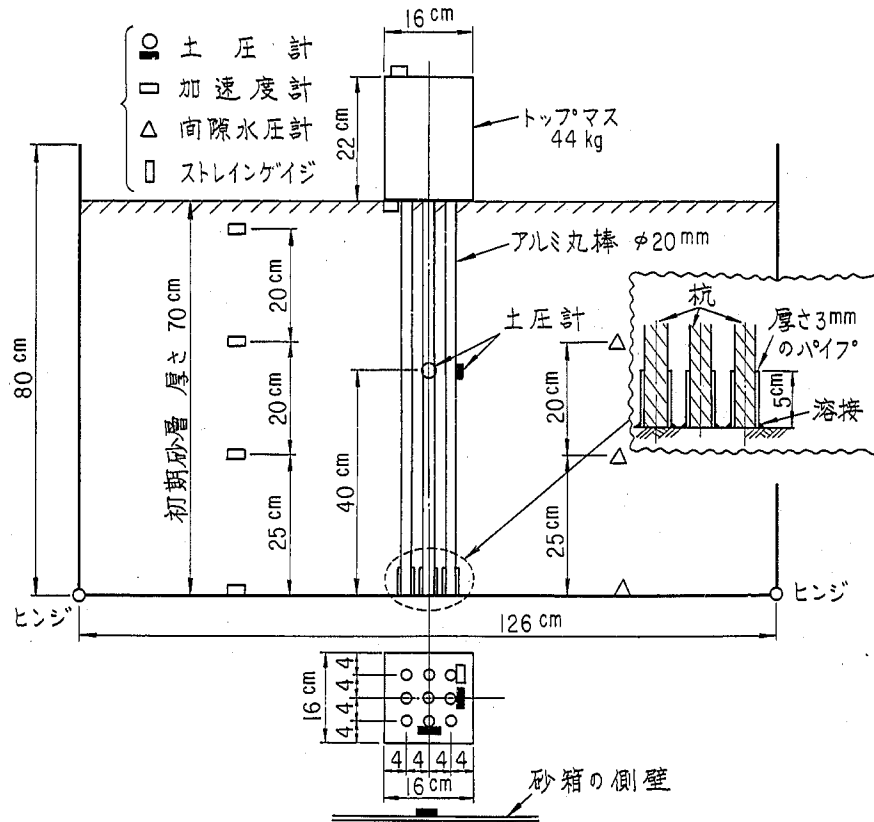


図 3-2 群杭実験計測装置配置図

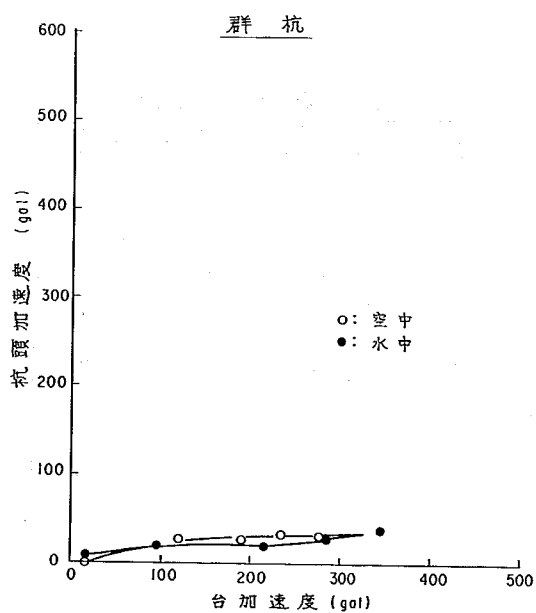
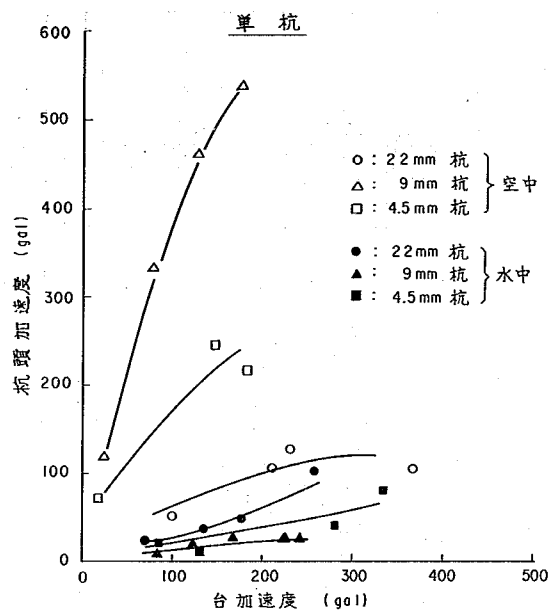


図 3-3 台加速度と杭頭応答加速度の関係(空气中及び水中)

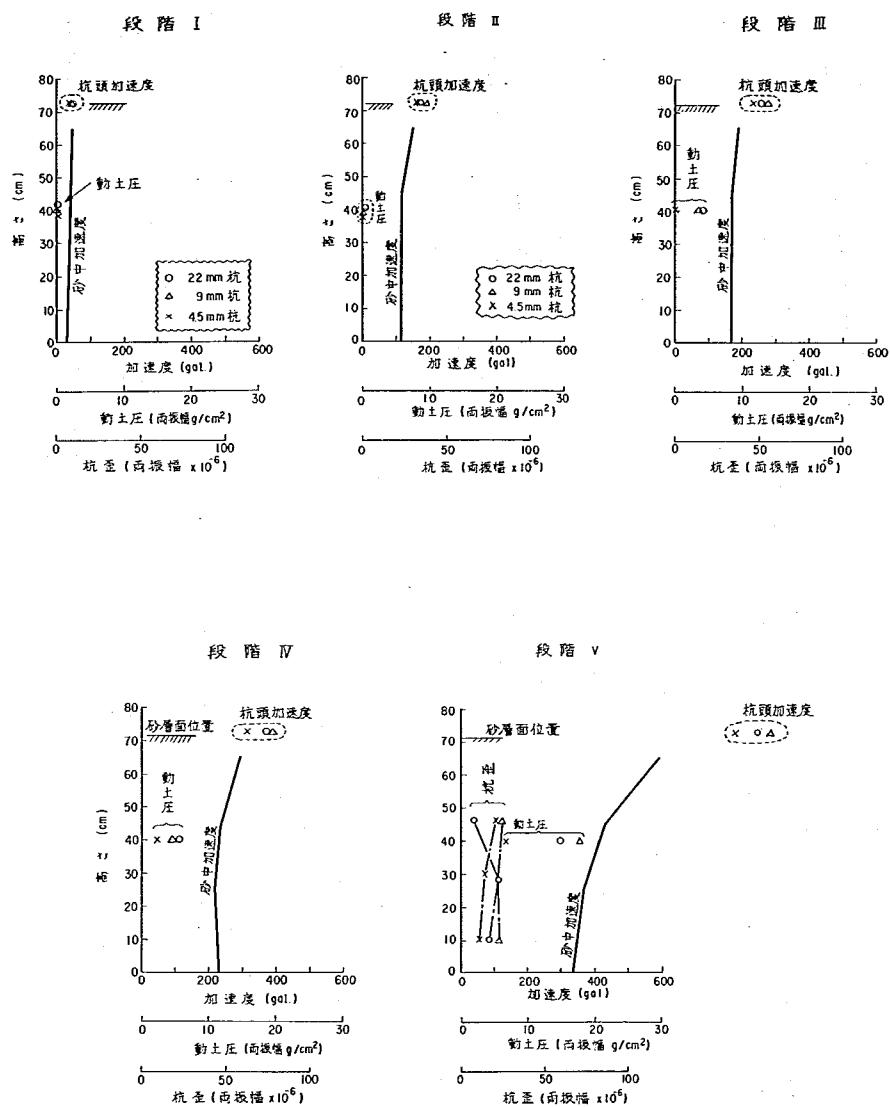


図 3-4 単杭・乾燥 (定常状態時・加振開始後 2.0 秒)

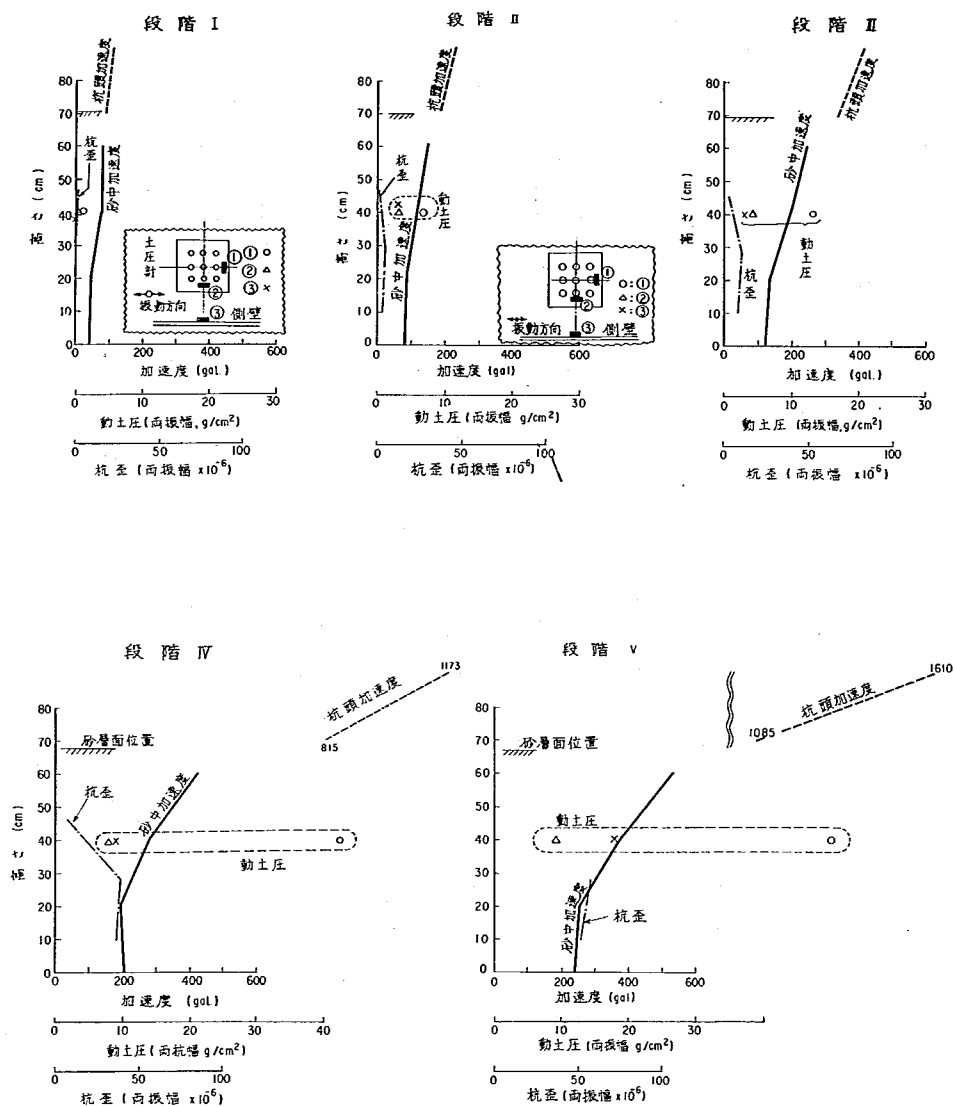


图 3-5 群杭・乾燥 (定常状態時・加振開始後 2 0 秒)

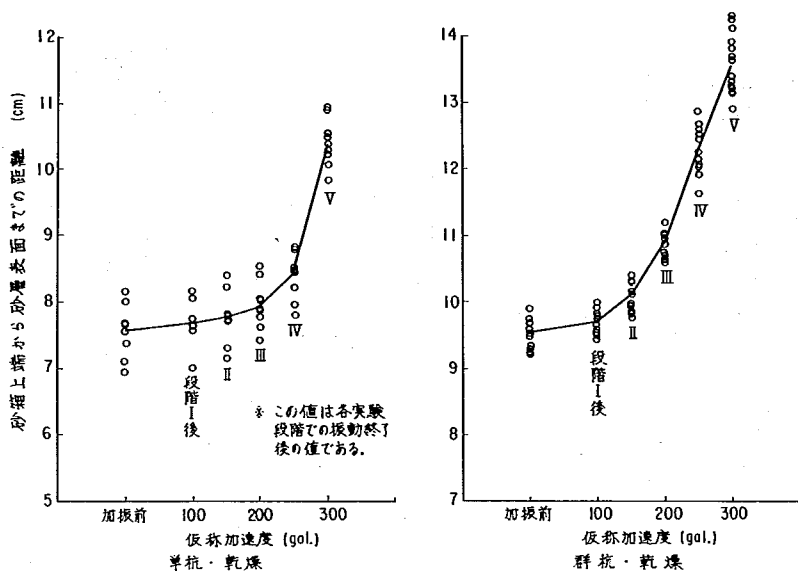


図3-6 砂層面の沈下

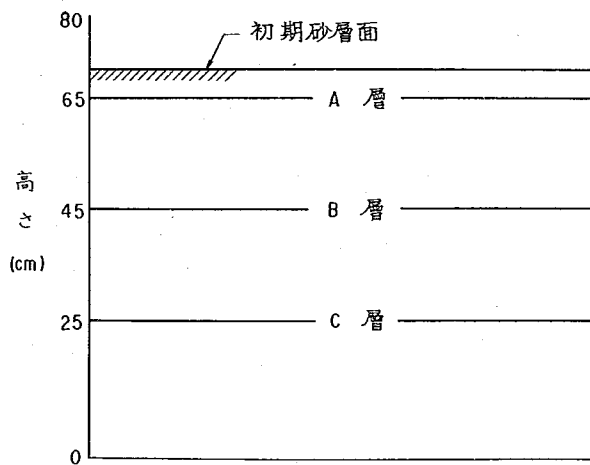


図3-7 豊浦砂層の位置

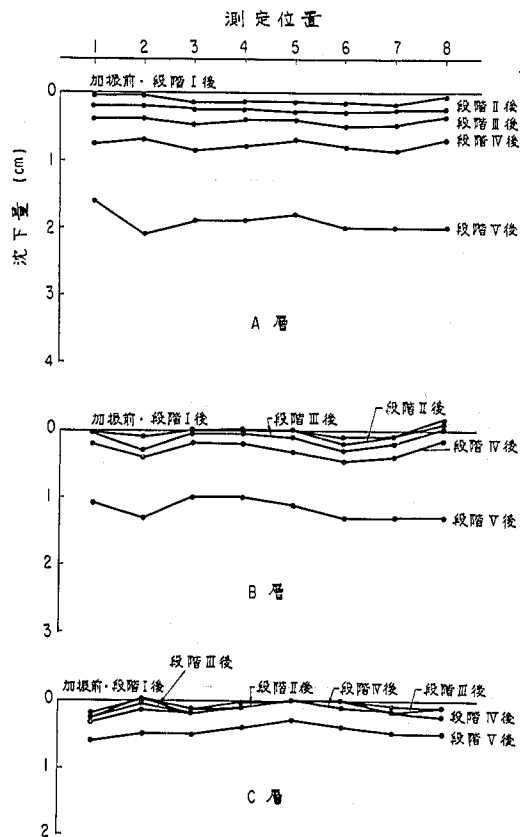


図3-8 砂層の沈下量（単杭・乾燥）

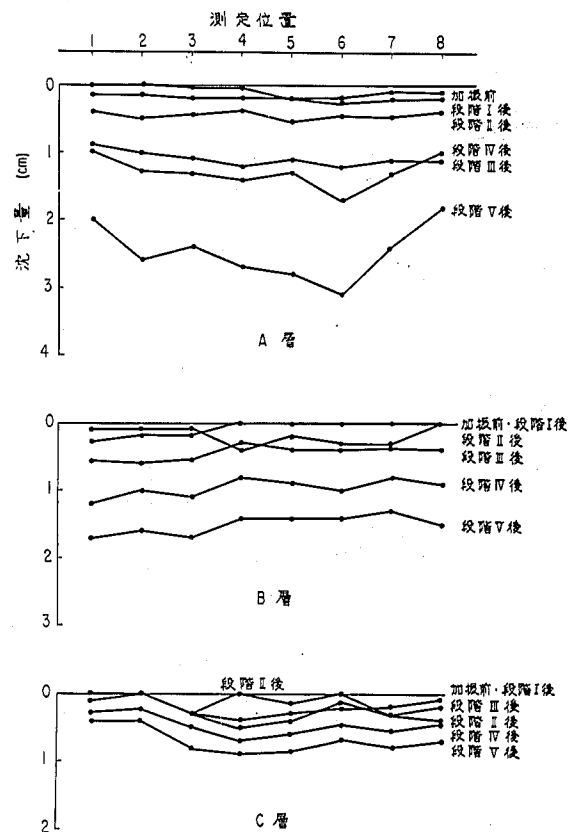


図3-9 砂層の沈下量（群杭・乾燥）

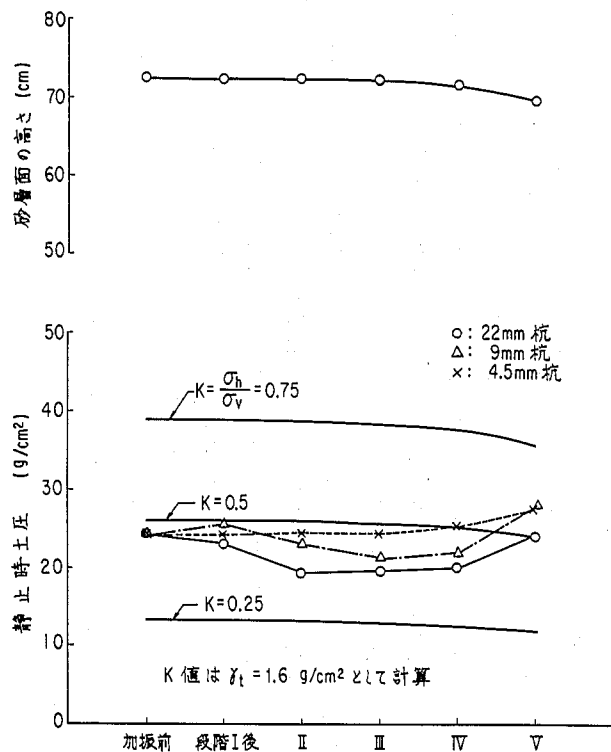


図3-10 静止土圧 (単杭・乾燥砂)

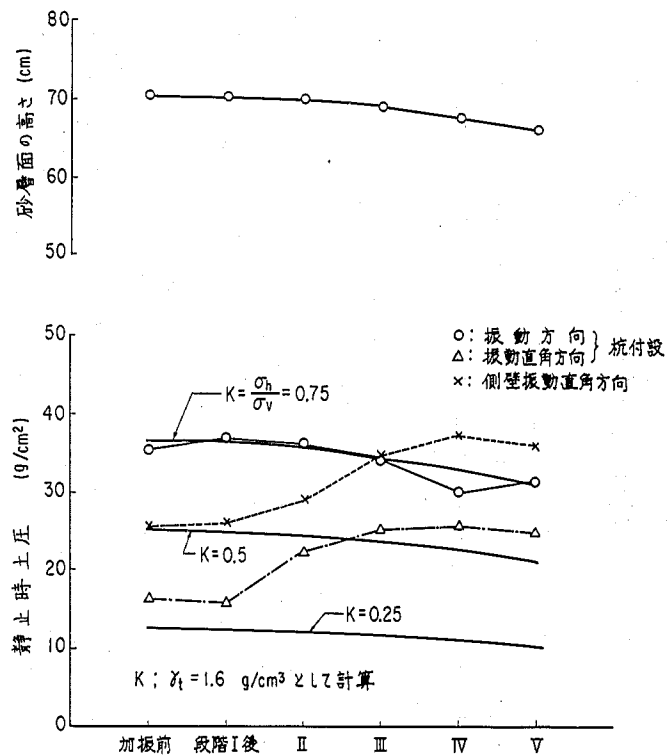


図3-11 静止土圧 (単杭・乾燥砂砂)

第4章 杭模型実験（飽和砂層実験）⁷⁾

図4-1-1～4-3に各実験での沈下の様子を示す。図4-4～10に単杭での各段階での実験結果を示す。単杭・飽和、段階Ⅰ（図4-4）では、過剰間隙水圧が深さ25cm（㊸で示すもの）で最大値の60%まで上昇しているが、完全液状化は生じていないが、かなり非定常な挙動が生じている。この場合は、 $t=10\sim 20$ 秒、 $t=45\sim 60$ 秒で過剰間隙水圧がやや上昇し $u/u_{max}=0.2\sim 3$ の時に砂層の応答加速度もやや上昇している。この時、各杭は EI の違いにかかわらず地盤によって強制的に振動させられているらしく、この間の動土圧も大きくなっており加速度も大きな応答値を示し、その応答値は EI の違いによらない。

図4-5に単杭・飽和段階Ⅱでの砂中加速度・杭頭加速度・間隙水圧・土圧の $t=5\sim 11$ 秒での原記録波形を示す。砂中加速度は上層から順にゼロになっていく。間隙水圧も上層ほど早くピーク値に達する。土圧は、液状化が開始すると、その値が上昇するのは、液状化によって $K=\frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ が1.0に近づくためであろう。しかし、液状化が開始すると動土圧振幅はほとんどゼロになる。杭頭加速度の応答値はあまり EI による違いはないが、位相に EI の影響があるのが注目される（これについては後に論ずる）。図4-6にこの実験でのまとめを示す。何よりもこの場合で非常に特徴的なことは現象が非常に非定常であることである。図4-6の砂中加速度の値に示すように、 $t=7.5$ 秒で地表加速度（㊸で示すもの）は最大値に達し、 $t=11.5$ 秒ではほとんどゼロになっている。この変化に応じて、 $t=7.5$ 秒で、杭頭加速度、動土圧、杭歪が極大値を示しており、又、 $t=11.5$ 秒では杭頭加速度、動土圧、杭歪が極小値を示している（22mm杭の歪は、実験中ほとんどゼロ）。尚、 $t=26$ 秒で、杭頭加速度、動土圧、杭歪が最大値を示すが、この時は地盤が液状化状態から回復してゆく過程において大きな振動を受けている状態に対応している。実際の地震では主要動がそれほど長く続くことは考えられない。今、縮尺率を1/50とすると模型実験での26秒は実際の $26\times\sqrt{50}\div 180$ 秒に相当する。このように長く主要動が続くことは考えられないから、 $t=26$ 秒での状態は実際ではあり得ないものと考えられる。 $t=7.5$ 秒の状態をもう一度よく見てみると、過剰間隙水圧は最大値の30%前後までしか上昇していないことである。従ってこれに対応する有効応力の減少とセン断歪 r の増加に伴う G の減少による砂層の固有振動数の減少によって、固有振動数が18Hzから12Hzまで減少して共振的現象を生じたものと思われる。又、この時の杭の応答値にはほとんど EI の影響がないことは注目される。さて、もう一度図4-5(a)にもどると、杭頭加速度の位相は、砂層に液状化が発生していない $t=5$ 秒、40秒では、いづれの杭同士でも一致しているが、不完全液状化の $t=7.5$ 秒、26秒の状態、全層完全液状化の $t=11.5$ 秒の状態では杭同士の間の位相の一致が見られない。これは次の様に解釈できよう。図4-5(a)に示すように砂層に液状化が発生していない時は砂層内の振動は全層に亘って位相がほぼ一致しててゐる。この時は、各杭は地盤と同一の動きをしているから、全ての杭の杭頭加

速度の位相は一致している。所が、上層から液状化が発生しはじめると上層ほど位相が遅れはじめる。すると、 $E I$ の小さい杭ほどその杭頭での応答は上層の砂層の振動の影響を受けやすくなるから、 $E I$ の小さい杭ほど杭頭の加速度の位相は遅れるようになる。要するに、 $E I$ が異なると地盤との相対的な変位は全層に亘っては必ずしも同一ではなくなることを示している。

図4-7に単杭・飽和段階Ⅲでの原波形を示す。この段階では、再び全層に亘って液状化が生じている。これは、振動入力が大きくなれば、一度液状化が生じた砂層も再び液状化しうることを示している。全体的な傾向は段階Ⅱと同じであるが、ここでは特徴的なことは、図4-7(a)に示すように、各深さの砂層で u/u_{max} が1.0になる直前で、位相が台加速度と 180° 異なり、最大加速度値になる時が生ずるということである。今回の実験は $f=12\text{Hz}$ であったため、位相のチェックを十分にできないから液状化砂層のモードは正確には求められないが、後にこれについて検討を行う。

さて、この位相の逆転区間は、 $\#4$ の加速度計では、 $t=8$ 秒付近、 $\#3$ の加速度計では $t=9$ 秒付近で生じ、 $\#3$ と同じ深さにある $\#3$ の間隙水圧計は $t=9$ 秒付近では u/u_{max} は1.0になる直前である。同様に、 $t=10$ 秒付近で位相が逆転する $\#2$ の加速度計と同じ深さにある $\#2$ の間隙水圧計では $t=10$ 秒では u/u_{max} は1.0になる直前である。このことは、 $G=0.0$ になるきわめて寸前に砂層は台加速度とは逆位相の加速度の最大値を示すことを意味している。砂層内で2次モードの振動が生じているということは、きわめて大きなせん断歪が生じていることを示し、これは杭に強い曲げ力を作用することになるものと思われる。又、 u/u_{max} が1.0近くで応答値が極大になったのは、段階Ⅱによって、砂層がかなり密づめになり、 $r=10^{-4}$ での G がかなり大きくなり、固有振動数が 18Hz よりかなり大きくなったため、砂層が共振する時の u/u_{max} が $0.2\sim 0.3$ よりかなり大きくなないと砂層の固有振動数の 12Hz までの低下に見合う有効応力、即ち G の減少が生じなかったためであろうか。

更に、 $\#3$ の加速度計とはほぼ同じ深さに設置してある土圧計のうち、 22mm 杭に設置してあるものは $t=9$ 秒付近で他の杭のものとは逆の位相を示している（ $A-A'$ と $B-B'$ での位相を比較）。 $t=9$ 秒でこの深さの砂層は台加速度と 180° 逆転した位相で振動している。一方、剛性の大きい 22mm 杭は、台加速度と同じ位相で振動しているこの深さより下の砂層によって全体の振動特性が決まっていると思われる。従って、 $t=9$ 秒付近で図4-20(d)に示すようにこの深さ（ $H=40\text{cm}$ ）では 22mm 杭の動きと砂層の動きは逆位相であるために、土圧の位相が逆転したのであろう。通常は土圧計の受圧面が右に向いていると、杭が右に振れた時に、土圧は減少するが、 $t=9$ 秒付近では増加している訳である。従って、 $t=9$ 秒付近では 22mm 杭の土圧計は通常とは逆位相を示しているものと思われる。一方、剛性の小さい 4.5mm 杭は、図4-7(d)、(e)に示すように上層の砂層の位相が台加速度のと逆転している時は、それにひきづられて、やはり台加速度と逆の杭頭加速度の位相を持つから、杭が砂層を強く押すことはないと思われ、土圧計にも杭が砂層を押すことを示す位相の逆転は生じていない。 9mm 杭は 22mm 杭と 4.5mm 杭の中間的な性質を示す。図4-8に段階Ⅲのまとめを示す。 22mm 杭では歪はほとんど発生しなかった。 4.5mm 杭は上ほど大きな歪を発生している。これは、上層の砂層ほどその振動が振動台の振動との位相とづれている程度がひどく、その時 4.5mm

杭はそれによって強い曲げ力を受けていることに対応しているものと思われる。

図 4-9 は単杭・飽和段階Ⅳの実験結果であり、振動入力を段階Ⅲより下げているから、過剰間隙水圧は全く上昇せず、定常的現象を示している。

図 4-10 は単杭・飽和段階Ⅴの実験結果である。表層のみ部分的に液状化が生じたらしく、表層加速度のみ非常に大きく、それに応じて 4.5 mm 杭で上部に大きな歪が生じている。

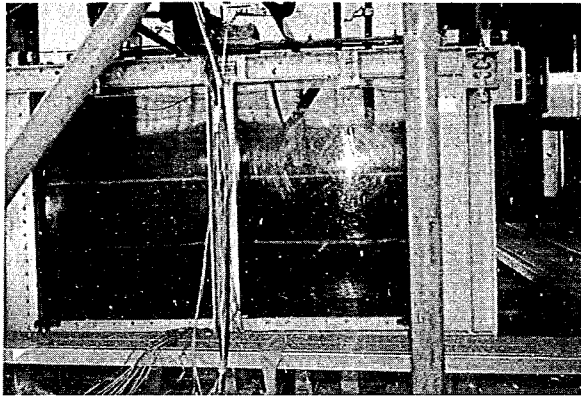
図 4-11 に群杭・飽和段階Ⅰの実験結果を示す。この場合、 $t = 15$ 秒で瞬間的に $u/u_{max} = 1.0$ になっているが、砂層と杭の応答はその前の $t = 11$ 秒付近で最大値を示し、この時は $u/u_{max} = 0.3$ 程度である。

図 4-12 に群杭・飽和、段階Ⅱでの原記録波形を示す。写真 4-1 に実験状況を示す。表層近くの砂層の振動は $t = 10.5 \sim 11$ 秒付近で台加速度と位相が逆転している。又、高さ 40 cm の所の土圧は、受圧面の方向にかかわらず、ほぼその高さにある間隙水圧計 3 での記録が $u/u_{max} = 1.0$ になった $t = 11$ 秒あたりで、最大値になっており、これは、前に述べたように液状化による $K = \sigma_h/\sigma_v$ の値の増加によるものであろう。又、杭の振動方向の動土圧は $t = 10$ 秒あたりで最大値を示しているが、これはこの段階ではまだ砂層が完全に液状化しておらず、砂層が応答が大きくなって、杭を強制的に押す力が増大したためと思われる。図 4-13 に段階Ⅱでのまとめを示すが、この場合も単杭実験の場合と同様に、現象は非常に非定常である。 $u/u_{max} = 0.3$ となる $t = 1.05$ 秒付近で、杭頭加速度、動土圧、杭歪が極大値になり $u/u_{max} = 1.0$ になっている $t = 2.5$ 秒では、いずれも最小値を示す。

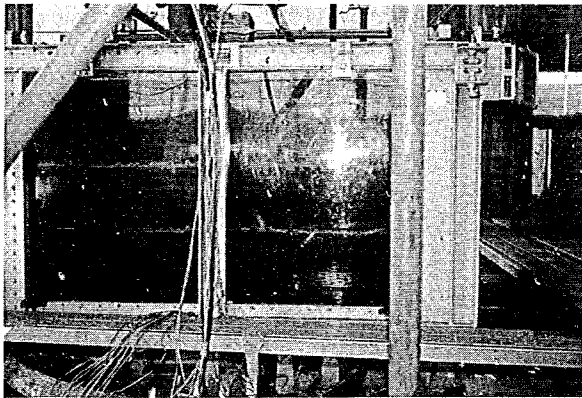
図 4-14 に群杭・飽和、段階Ⅲの実験結果を示す。この場合も、 $u/u_{max} = 0.2 \sim 0.3$ になっている間 ($t = 7 \sim 50$ 秒の間) は、杭歪、動土圧、砂表層加速度 (④であらわされている) が大きな値を示している。

図 4-15 に群杭・飽和、段階Ⅴの実験結果を示す。尚、段階Ⅳは振動入力を段階Ⅲより小さくしているので、過剰間隙水圧は全く上昇せず、現象は定常的であったので、ここに図示しなかった。段階Ⅴでは $t = 2.5$ 秒で、やや完全ではない液状化が生じていて、この時は杭の応答値は低くなっているが、他の時は、高さ 40 cm でも杭の応答値の方が砂層の応答値よりも大きい。これは、水中固有振動が数 3.8 Hz であるこの群杭の固有振動数が、地盤内にやや u が発生していて、地盤の拘束力が落ちていることと、砂表面が沈下して突出長ができたため、地盤内の群杭の固有振動数が 12 Hz に近くなったため、群杭が非常に大きな応答をし得たためと思われる。

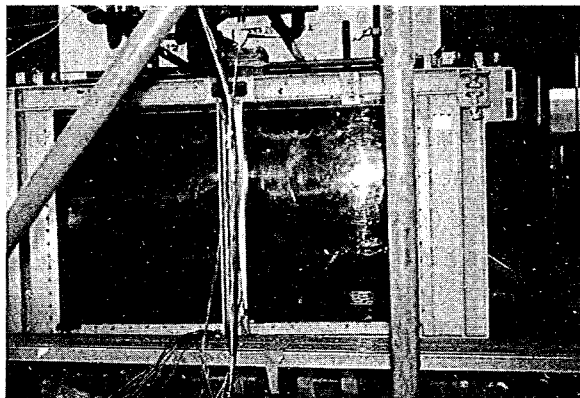
これらの実験結果から各特徴ある経過時間ごとの測定値をまとめたのを図 4-16、4-17、4-18、4-19 に示す。単杭で飽和砂層で段階Ⅲは、段階Ⅱに引き続いて行ったものであり、台加速度を増加させており、砂層には再び液状化が生じている。これらの図に示す様に、いずれの場合も、過剰間隙水圧が最大値に達していない不完全液状化の時に、砂層の応答加速度が非常に大きくなっており、同時に杭頭加速度、杭歪、動土圧も大きな値となっている。そして、過剰間隙水圧が最大値に達して



液状化前



液状化開始



豊浦砂の薄層
が上昇流によ
って乱れてい
る。

写真 4-1 群杭飽和砂層実験段階Ⅱの実験状況

いる ($u/u_{max}=1.0$) 完全液状化の状態では、砂中加速度はほとんど零となる。これは、液体となった砂層はせん断力を伝えないから砂層にせん断振動が生じないためである。この時、杭頭加速度、杭歪、動土圧も減少している。図 4-16、4-17、4-18 で示してある完全液状化時の図の中での水中応答加速度とは、図 3-3 に示す水中杭を放置して行った実験結果から図 4-16、4-17、4-18 での完全液状化時の台加速度に相当する時の図 3-3 の杭頭加速度を読みとってそれをプロットしたものである。いずれの場合も、完全液状化時の杭頭の応答加速度は、水中での応答加速度よりやや大きい、それに近い値を示している。即ち、完全液状化時には液状化砂層中の杭は水中にあるのとはほぼ同じ挙動を示すものと思われる。

次に、単杭・飽和段階Ⅱ、段階Ⅲ、及び群杭・飽和段階Ⅱでの各特徴ある経過時間 t での砂中加速度分布、間隙水圧分布、土圧、杭加速度の値の変化の様子を図 4-20、4-21、4-22 に示す。例えば図 4-20(a) は $1/2$ 周期の間 ($1/24$ 秒間) での砂中加速度分布の変化を示す。 α は図中での右方向を正とする加速度であり、 $|\alpha_{Bmax}|$ は砂箱底での加速度の最大値の絶対値であり、 $-\alpha/|\alpha_{Bmax}|$ を加速度比と呼ぶことにする。実際には入力振動も応答振動も正しく正弦波とはなっていないが、仮に正弦波とすると、図中で右方向を正とした変位を d とし、砂箱底での変位振幅の絶対値を $|d_{Bmax}|$ とすると、

$$\frac{d}{|d_{Bmax}|} = -\frac{1}{(2\pi f)^2} \frac{\alpha}{|\alpha_{Bmax}|} \dots\dots\dots (4-1)$$

となるから、図の横座標は絶対変位比もあらわしていることになる。さて、図 4-20 を見ると、 u/u_{max} が上昇するにつれて振動のモードが複雑になってくる。 $t=5$ 秒の時 $u/u_{max}=0.0$ であるが、この時は全層に亘ってほぼ同位相で振動している。しかし、 $t=7.5$ 秒 (杭に最っとも歪が発生した時) では、砂箱底が右方向に振れ切った時に、砂表面では左方向に振れ切っている。このため、杭は非常に大きな曲げモーメントを受ける。 $t=7.5$ 秒の杭頭加速度比の変化の様子を見ると、4.5 mm 杭は高さ 55 cm での砂の動きと、9 mm 杭は高さ 50 cm での砂の動きと、2.2 mm 杭は高さ 40 cm の砂の動きとほぼ対応している。これは、杭頭の動きは意外に浅い砂層の動きに支配されていて、その程度は $E I$ の小さい方が著しいことを示している。この様な砂層の振動モードの変化は V_s の変化によって生ずる。 V_s は有効拘束圧の減少とせん断歪の増加によって減少する。今、振動入力は三角波と仮定して、図 4-20、21、22 から砂箱の底で振幅が最大値になる時刻 (例えば図 4-20(a) で (1) の時) と、 $H=45$ cm で振幅が最大値になる時刻 (例えば図 4-20(a) で (3) の時) の時間差 ΔT (秒) と、高さ 25 cm での u/u_{max} の値をプロットすると図 4-23 の様になる。明らかに u/u_{max} の増加によって、 ΔT は増加している。これは、

$$\Delta T = \frac{H}{V_s} \dots\dots\dots (4-2)$$

$$V_s = \sqrt{G/\rho} \quad \dots\dots\dots (4-3)$$

$$G = A(r) \cdot B \frac{(2.17-e)^2}{1+e} p' m(r) \quad \dots\dots\dots (4-4)$$

の諸関係から、 r の増加によるものの他に u/u_{max} が増加すると p' が減少し、 G の減少、 V_s の減少、 $4T$ の増加ということからも説明がつく。図 4-21 も図 4-20 とほぼ同様な結果を示している。

図 4-22 には群杭・飽和段階Ⅱの結果を示す。 $u/u_{max}=0.0$ である $t=8$ 秒では、地盤は全体的にはほぼ同位相で振動し、杭も地盤とはほぼ一体に振動している。杭に歪が大きく発生していた $t=10$ 秒、10.8 秒では地盤は底と地表で位相が 180° 近く異っており、それにひきづられて杭も砂箱底と杭頭では、位相が 180° 近く異っており杭に大きな曲げ力が働いていた様子を示している。 $t=10.8$ 秒では、 $H \div 50$ cm、 $t=11.3$ 秒では $H \div 55$ cm、 $t=11.6$ 秒で $H \div 60$ cm、 $t=12.2$ 秒では $H \div 70$ cm が静止点となって杭が振動している。

$u/u_{max}=1.0$ で完全液状化している $t=12.2$ 秒では、杭は砂箱底とはほぼ同位相で地盤と別個に振動していて、杭頭のみが静止している。

以上示したように、杭に大きな曲げ力が発生するのは、地盤の中に杭長の範囲で逆位相の大きな振動が発生するためである。逆位相の振動は、 V_s の減少によってもたらされる。今、深さ H の砂層の両端での振動が逆位相になる条件は fHz の正弦波振動で

$$V_s = 2fH \quad \dots\dots\dots (4-5)$$

であり、同じ f に対して、 V_s が小さい程、小さい H の間で逆位相の振動が生ずる。

以上示した様に液状化してゆく過程での地盤一杭系の挙動はまことに複雑であるが、これを土質力学的に解釈すると次の様になるものと思われる。まず、くりかえしセン断によって過剰間隙水圧が上昇しはじめると地盤内の有効応力が減じ、それに応じて地盤のセン断剛性が低下し、砂層の固有振動が下がる。完全液状化すると固有振動数は、 $0Hz$ 近くなるであろう。すると、過剰間隙水圧が全く発生していなくて歪の小さい時 ($r=10^{-4}$) の砂層の固有振動数は約 $18Hz$ であるから、液状化の進行の過程で砂層の固有振動数 $12Hz$ と一致する段階が必ず生ずる。この段階では、間隙水圧は最大値の約 $20 \sim 30\%$ しか発生していないから、砂層は液体の様にまだなっていない。従って、地盤の杭に対する拘束はまだ非常に強い。従って、地盤が大きく杭を動かす結果となり、杭に作用する動土圧 (≒杭を押す力) も大きいものとなる。従って、この段階で杭頭加速度も大きくなり、杭にも大きな歪が発生する。更に、過剰間隙水圧が上昇し、地盤が完全液状化状態になると地盤のセン断剛性はゼロになり、セン断波が伝播してゆかなくなるから地盤は静止し、かつ、地盤が杭を拘束する力がなくなる。これは動土圧がほとんどゼロであることから推定できる。従って、液状化砂層中の杭は単位体積重量 $2.0g/cm^3$ の液体内にある状態になり、この液体中での杭の固有振動数と入力振動数の関係が杭の挙動を支配する様になる。今回の場合は、いつれの杭も液状化砂層中での固有振動数が $12Hz$ とは一致

しなかったらしく、完全液状化時には応答加速度、動土圧、杭歪は非常に小さい。しかし、完全液状化時に杭の固有振動数と入力振動数が一致する場合は、完全液状化中と言っても、杭は大きく応答するのであろう。ここで注意することは、単杭の場合、図4-16、4-17の完全液状化時での挙動を比較してみると、各杭の応答値は段階Ⅱの場合よりも段階Ⅲの場合の方が、大きいことである。特に段階Ⅲでの22mmH_z杭の応答値は小さくはない。これは、段階Ⅲは段階Ⅱですでに液状化した砂層を再度液状化させたものであるから、段階Ⅲの流動化の程度が段階Ⅱの時よりやや低く、単杭に対する地盤の拘束が特に下の方で残っていたため、この段階での22mm杭の固有振動数が入力12H_zに近くなっていたのであろう。更に、液状化からの回復時の杭の挙動を見てみると、砂層の表面に近い所はまだ液状化の状態にあり、砂中応答加速度はほぼゼロであるが、いつれの杭の応答値も大きくなっている。しかし、液状化から回復した下部の砂層中では地盤と杭はほぼ同一の応答値を示している。これは、杭はある自由突出長を持った状態になっており、この状態での杭の固有振動数と入力振動数との関係でもって、杭の応答が決まるため、入力と一致した固有振動数を杭-地盤系が持ち得たからであらう。

以上示した様に、液状化過程の地盤中の杭の挙動はきわめて複雑であるが、問題を整理すると、杭の挙動は、次の様にして決まるのであろう。図2-24に示す様に、考えるべき要因は次の3つである。

(1) 地盤の振動特性 …… これは、地盤内の G 、 h （減衰）、 ρ （密度）の値によって決まる。

しかし、 G は液状化する過程で有効拘束力とせん断歪の変化によって大きく変化するから、完全液状化に至る前の不完全液状化の時に地盤が大きく応答し、複雑な振動モードとなることがあり得る。

(2) 地盤と杭の相対変位に対する拘束度（バネ係数） …… これも液状化の過程で大きく変化する。しかし、不完全液状化の時は、まだこれは十分に大きな値を持っているであろうから、地盤が大きく応答すれば、それが杭の挙動をほぼ支配するものと思われる。しかし、完全液状化すれば、これはほぼゼロになろう。

(3) 杭-バネ系の振動特性 …… これは、杭自身の振動特性とバネ係数によって決まる。バネ係数が大きくかわれば、これも大きく変わり得る。完全に液状化している層が存在する時は、液状化した砂層部分は杭の自由突出部と考えてもよいだろう。従って、液状化している砂層が厚い程、杭-バネ系の固有振動数は小さくなり、入力振動数とこれが一致する時があれば、杭の応答は小さくはないであらう。

以上示した様に、液状化する砂層中の挙動は、非常に複雑であり、杭の応答値が、どの段階で最も大きくなるかは、一概には言えない。少なくとも、入力振動に対する地盤の応答特性、地盤と杭の相対変位に対する拘束度、杭-地盤・バネ系の入力振動に対する応答特性によって決まるだろうから、ある地盤内のある杭のある入力振動に対する応答値がどの段階で最も大きくなるかを一概には言えない。少なくとも、杭の応答を小さくするためには、上述の諸値の相対的關係を考慮する必要があるの

は確かであろう。

今後は、入力振動の周波数をかえた実験、地震動記録を用いたランダム波実験等を行ってゆく予定である。

又、実際の橋脚は水平地盤にのみ設置される訳ではなく、液状化によって発生する堤防の流動的破壊、地盤の流動的水平変位も杭基礎を破壊する要因であるものと思われる。今後は、この方面での検討も必要なものと思われる。

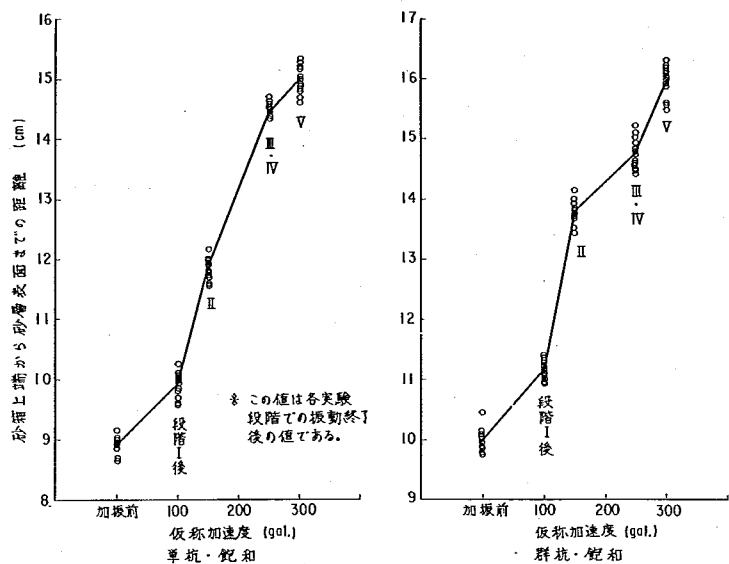


図4-1 砂層面の沈下

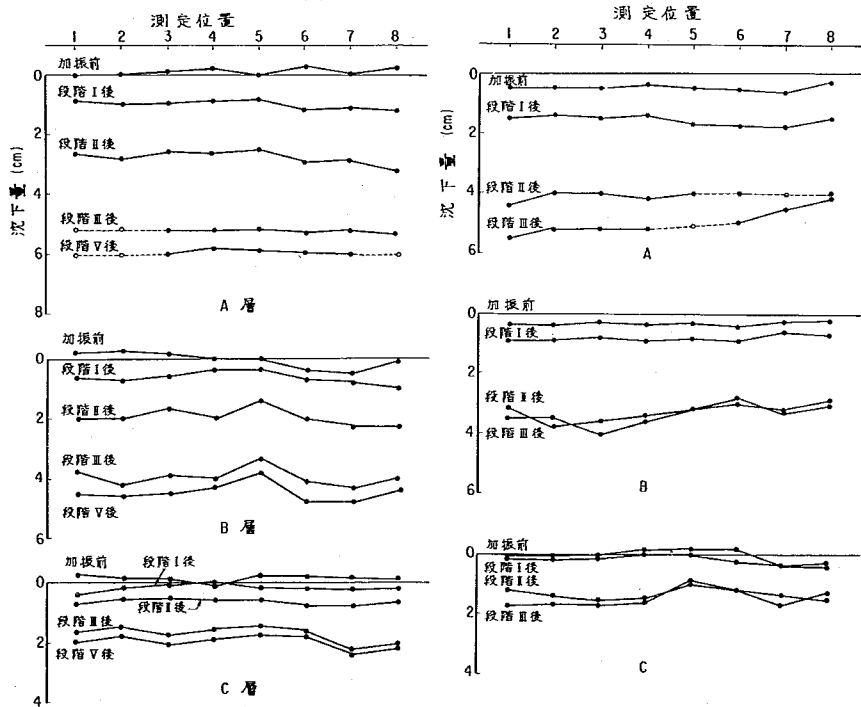


図4-2 砂層の沈下量 (単杭・飽和) 図4-3 砂層の沈下量 (群杭・飽和)

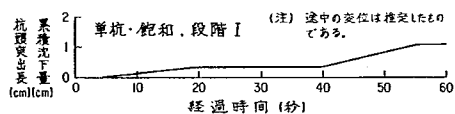
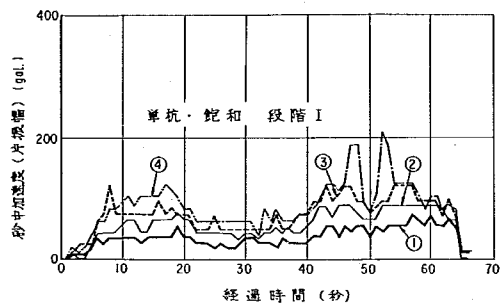
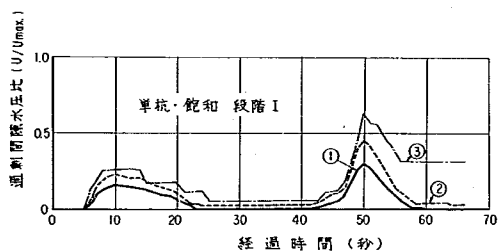
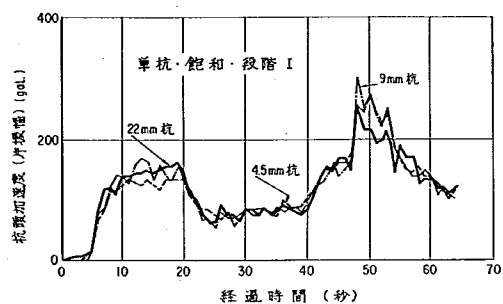
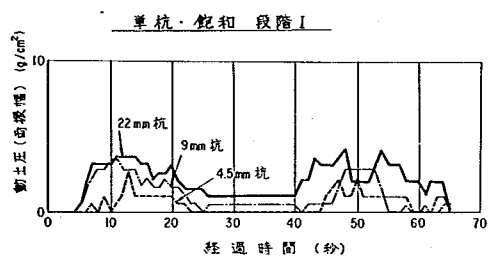


図4-4 単杭・飽和砂層実験, 段階Ⅰ

実験の種類：単杭・飽和，段階Ⅱ

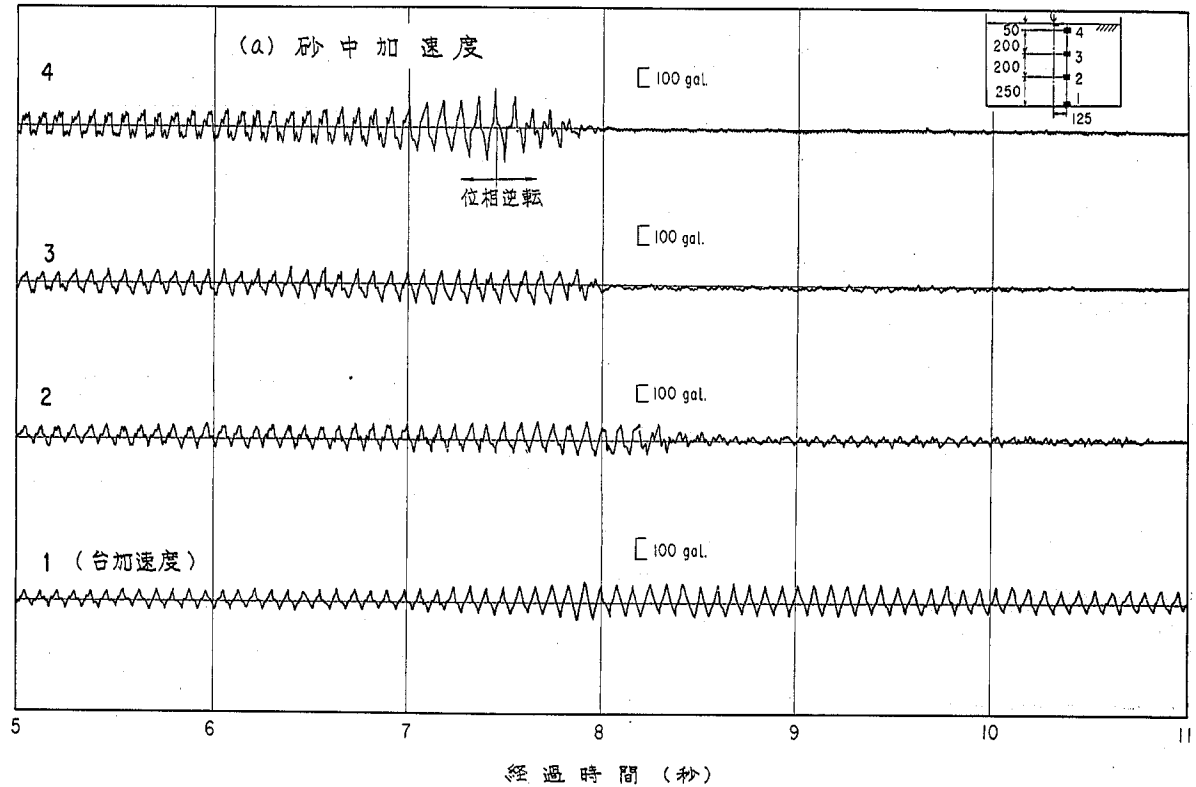


図4-5(1) 原記録派形 (単杭・飽和，段階Ⅱ)

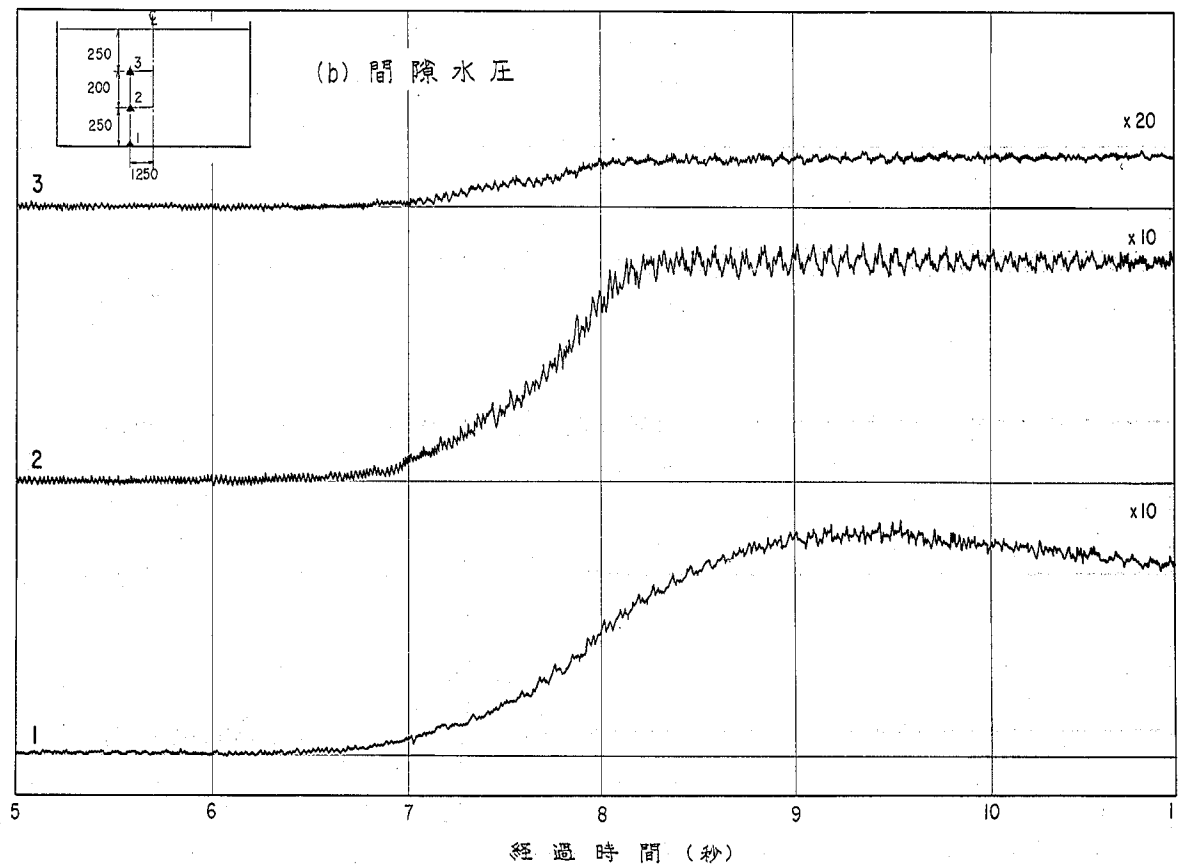


図4-5(2) 原記録派形 (単杭・飽和, 段階Ⅱ)

実験の種類：単杭・飽和 段階Ⅱ

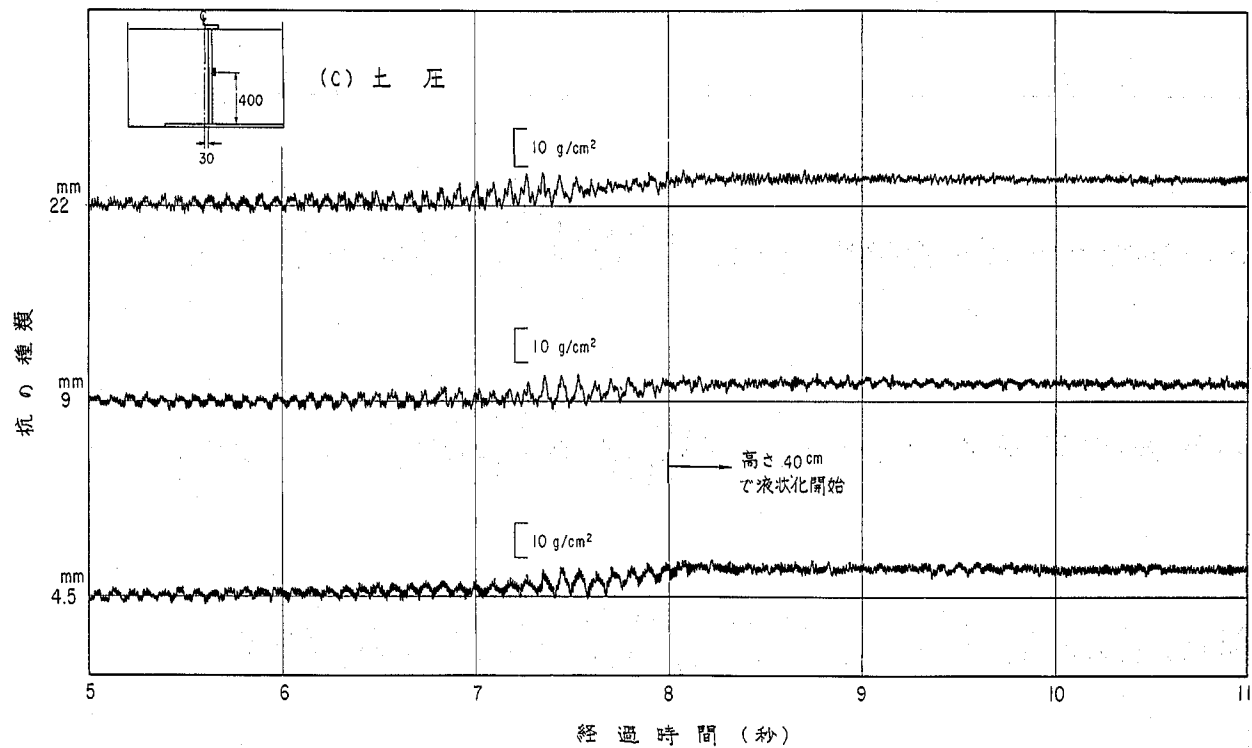


図4-5(3) 原記録派形 (単杭・飽和, 段階Ⅱ)

実験の種類：単杭・飽和，段階Ⅱ

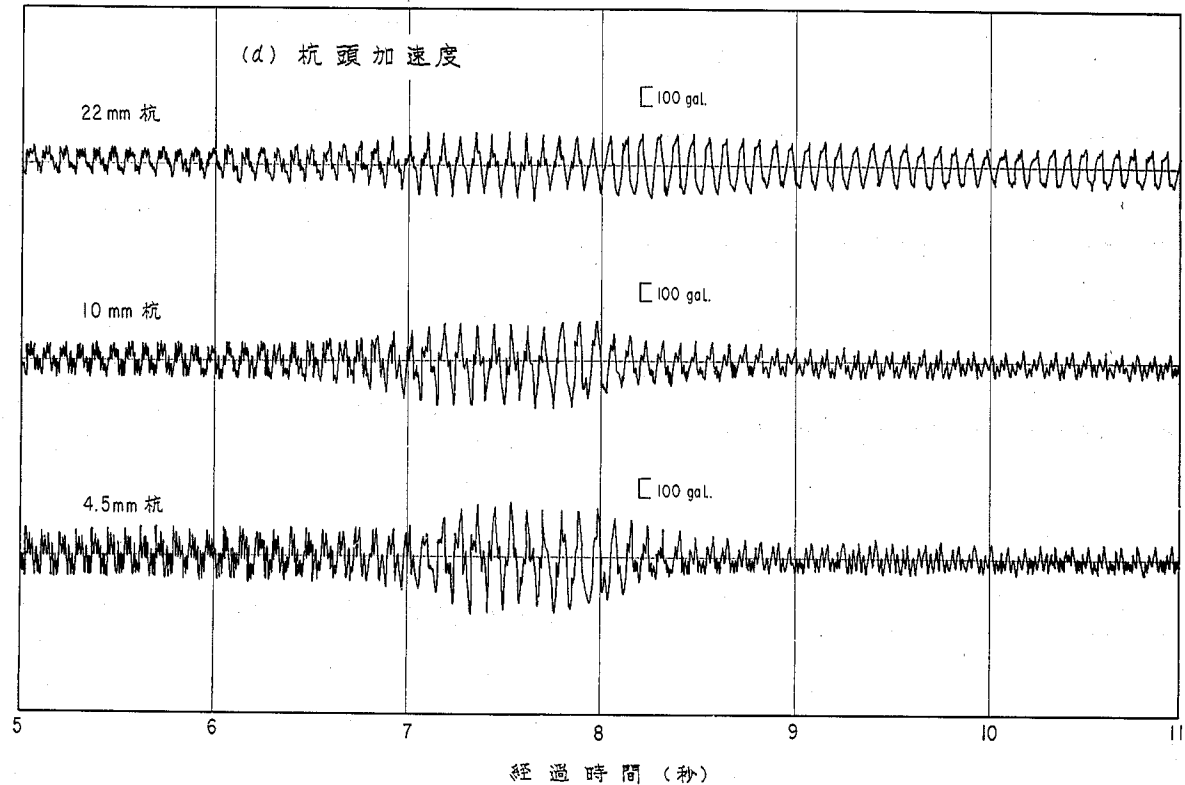


図 4-5(4) 原記録派形 (単杭・飽和，段階Ⅱ)

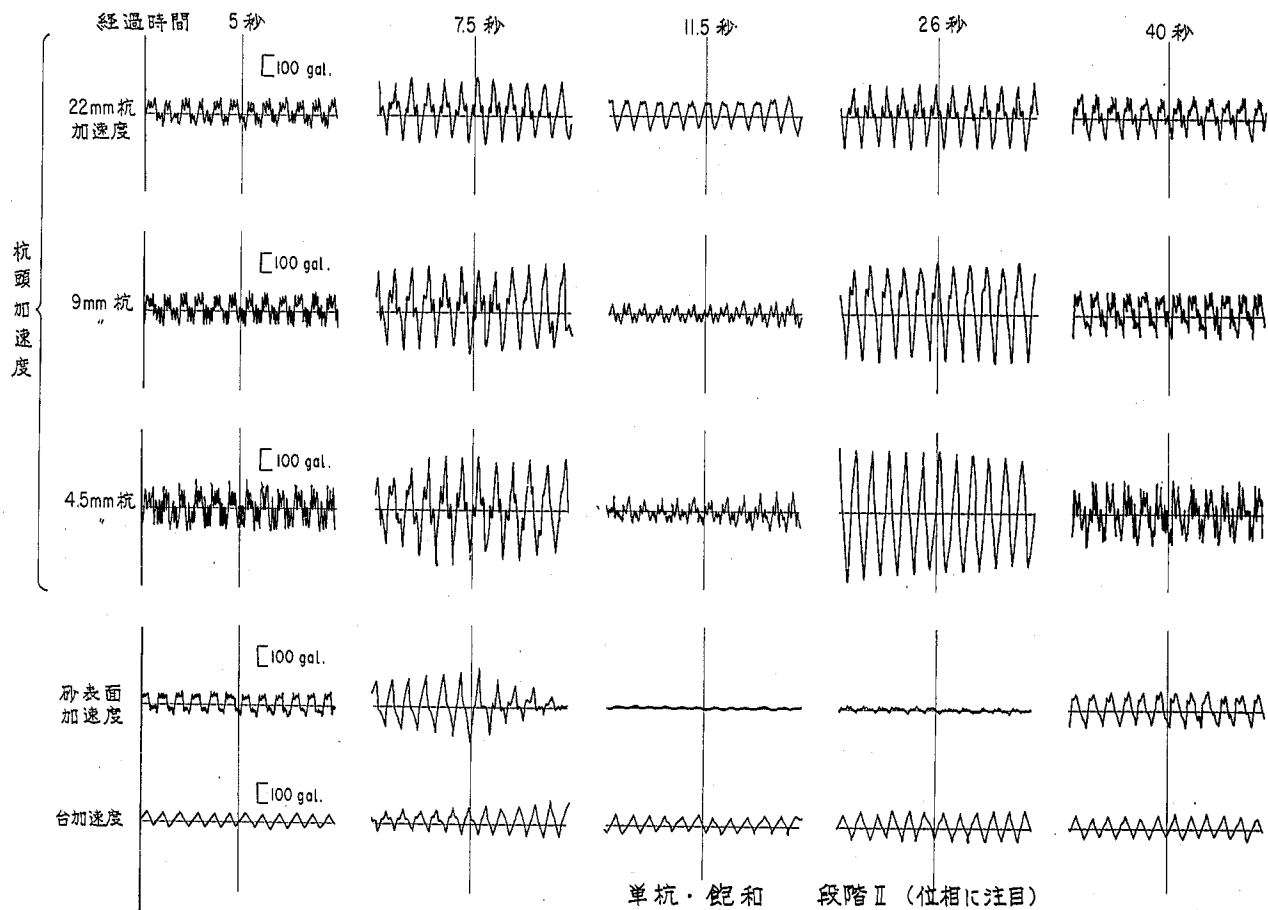


図4-5(5) 原記録派形（単杭・飽和，段階Ⅱ）

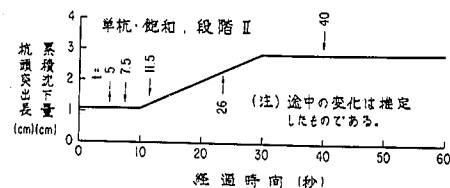
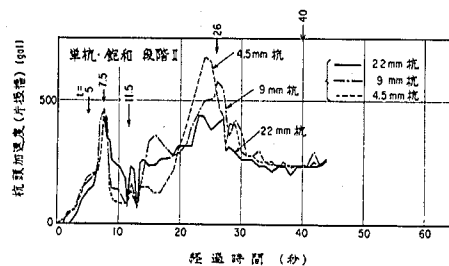
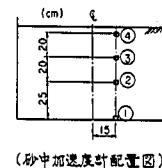
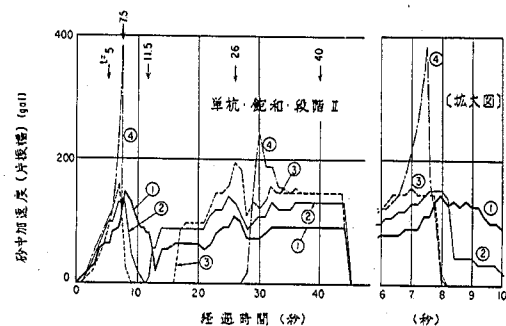
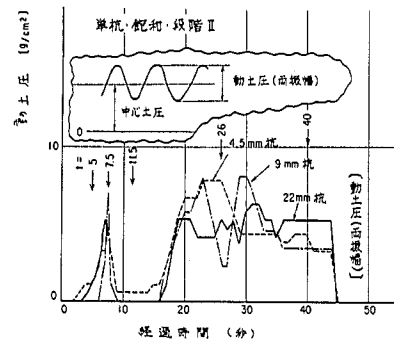
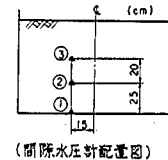
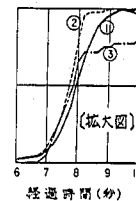
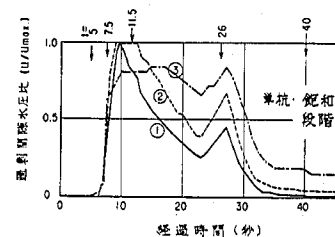
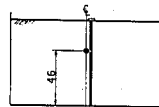
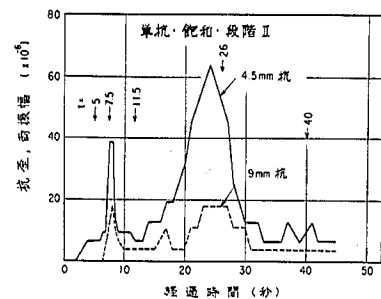


図4-6 単杭・飽和 (段階Ⅱ)

実験の種類：単杭・飽和 段階Ⅲ

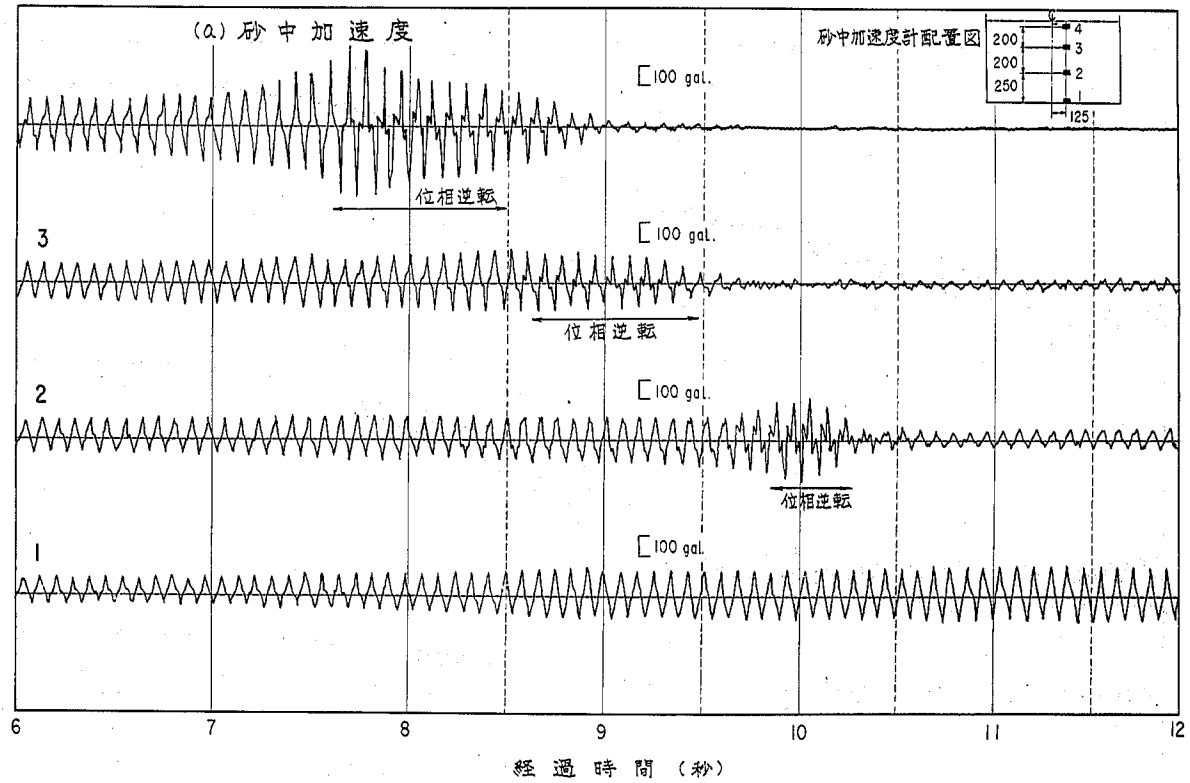


図4-7(1) 原記録波形 (単杭・飽和, 段階Ⅲ)

実験の種類：単杭・飽和砂 段階Ⅲ

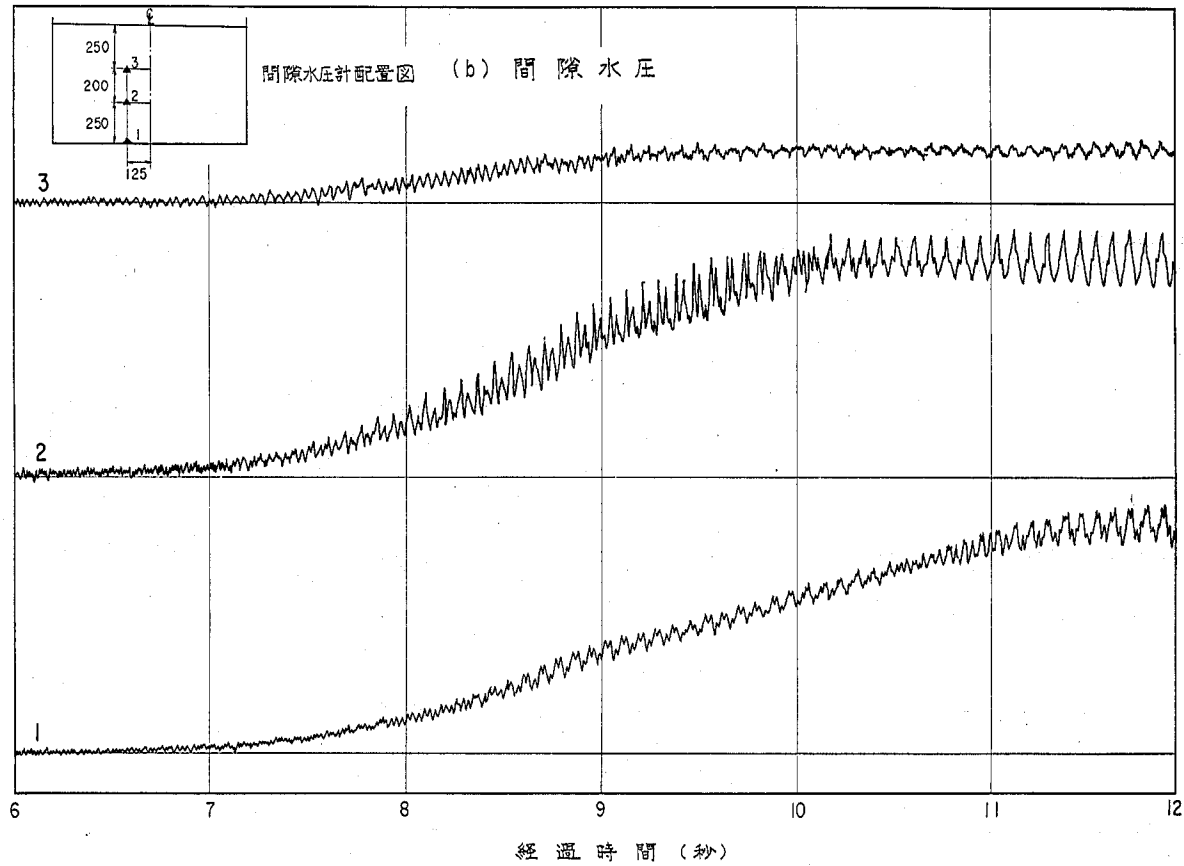


図4-7(2) 原記録派形 (単杭・飽和, 段階Ⅲ)

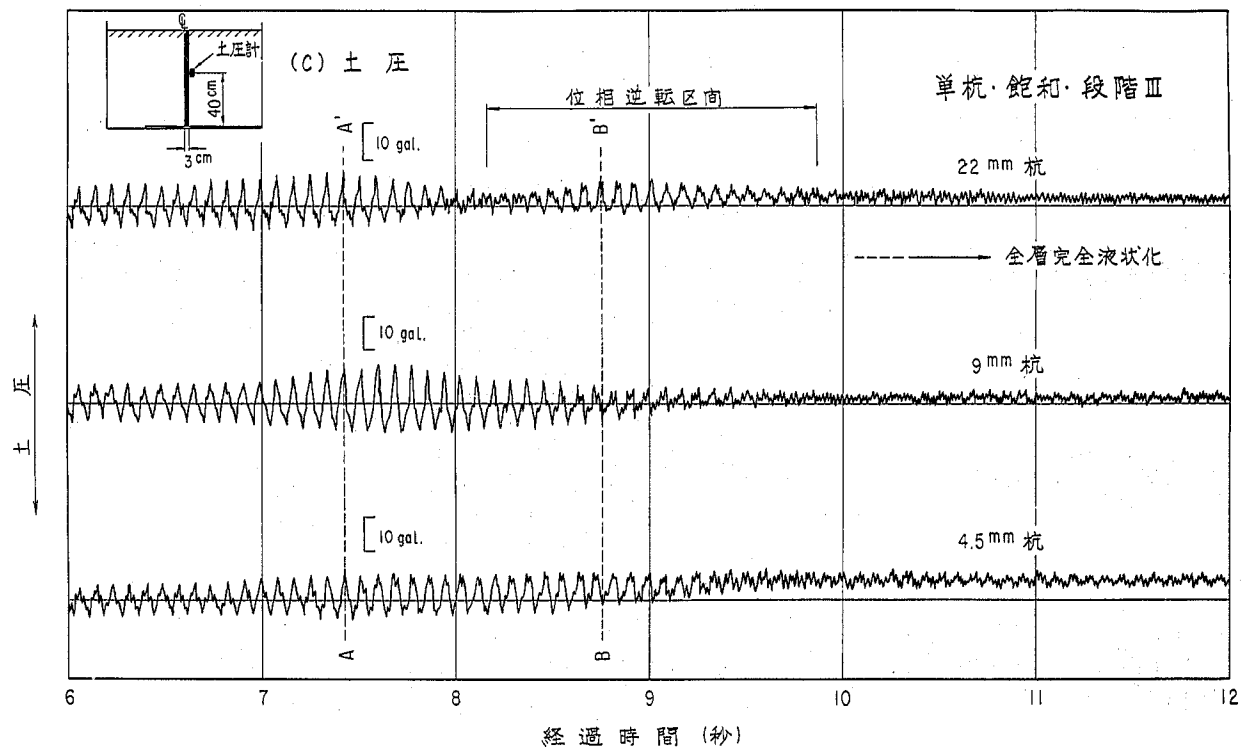


図 4 - 7 (3) 原 記 録 派 形 (单杭・飽和, 段階Ⅲ)

実験の種類：単杭・飽和，段階Ⅲ

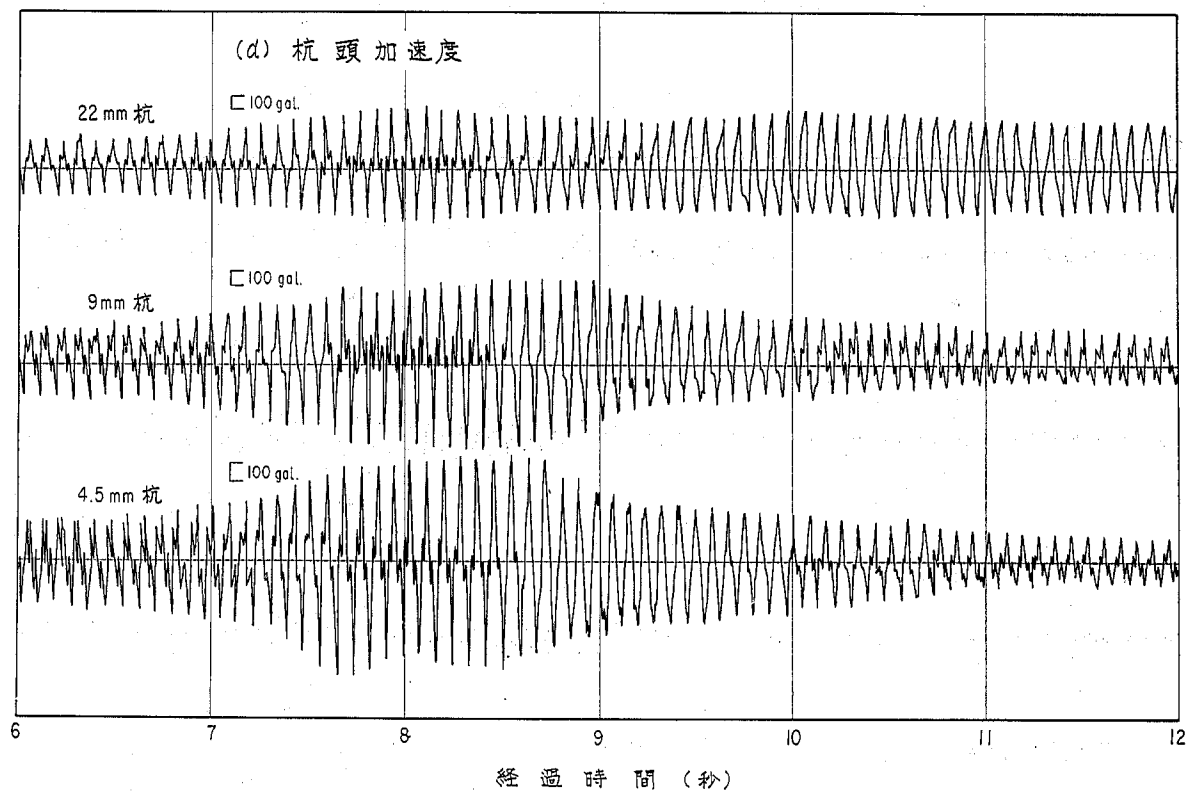


図 4-7 (4) 原記録派形 (単杭・飽和，段階Ⅲ)

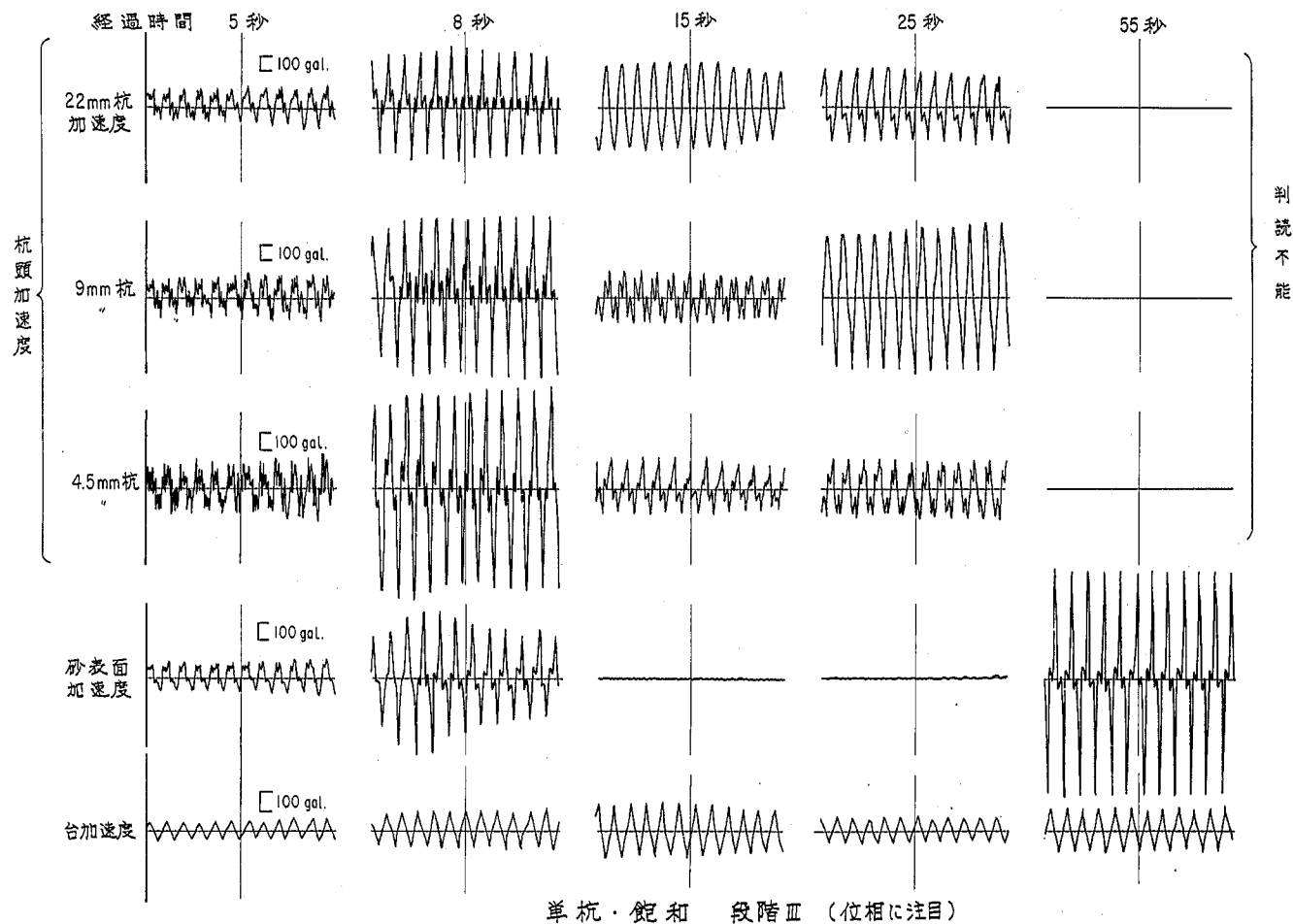


図4-7(5) 原記録派形 (単杭・飽和, 段階Ⅲ)

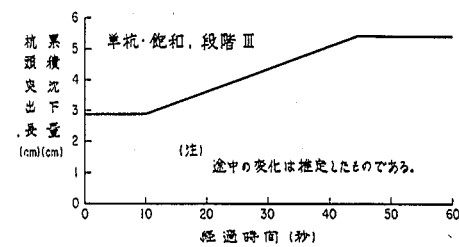
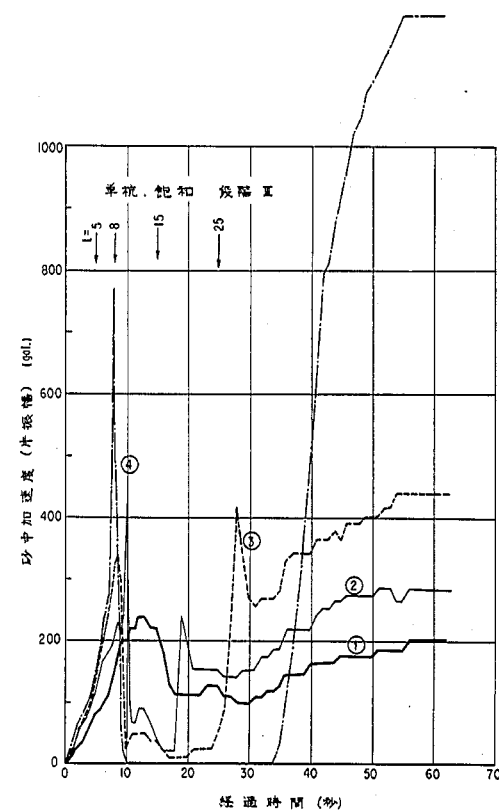
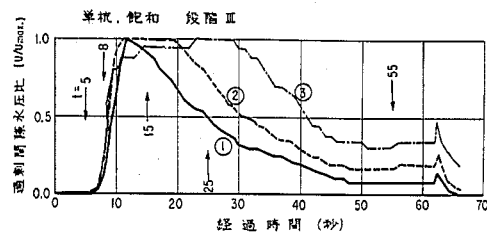
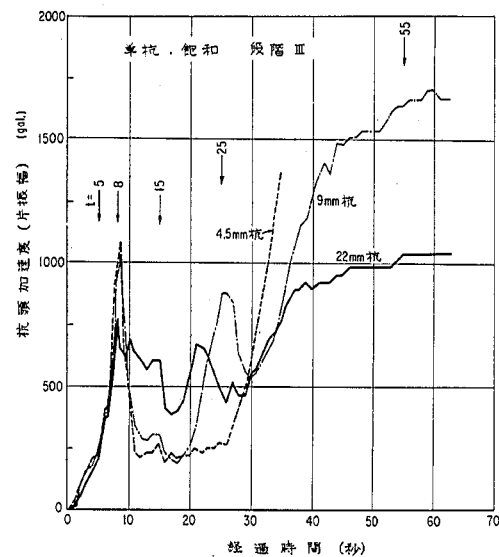
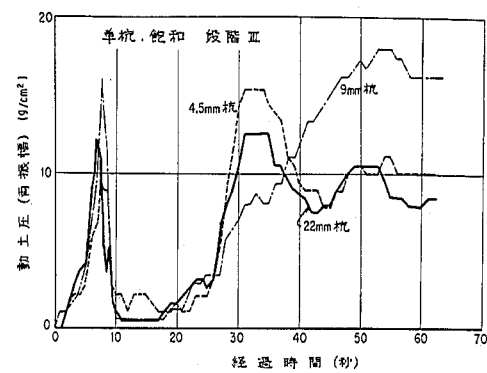
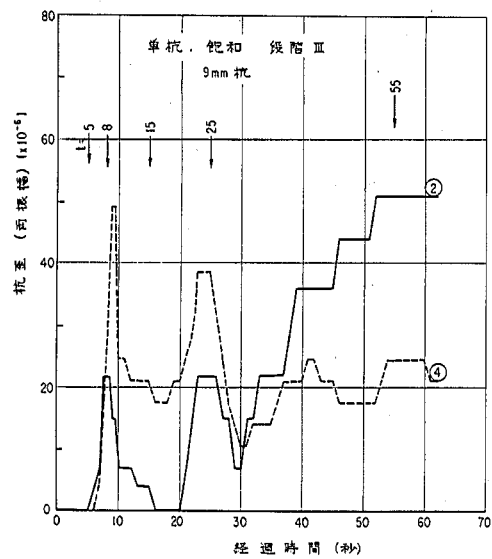
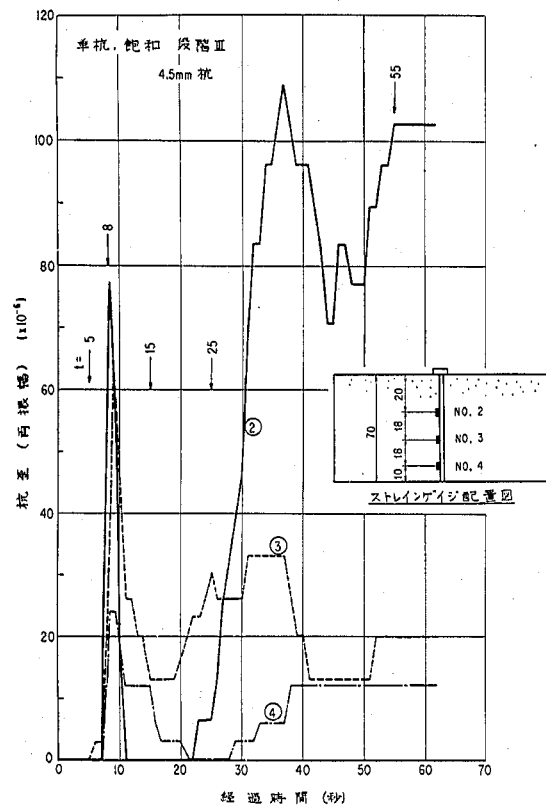


図 4-8 単杭・飽和砂層実験, 段階Ⅲ

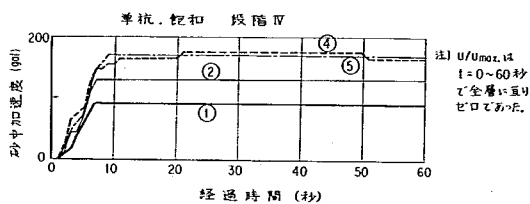
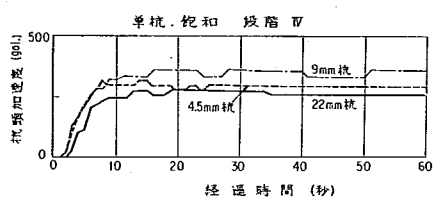
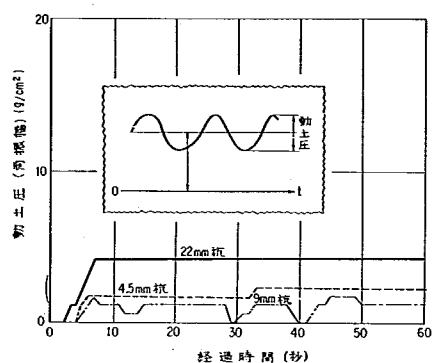


図4-9 単杭・飽和砂層実験段階Ⅳ

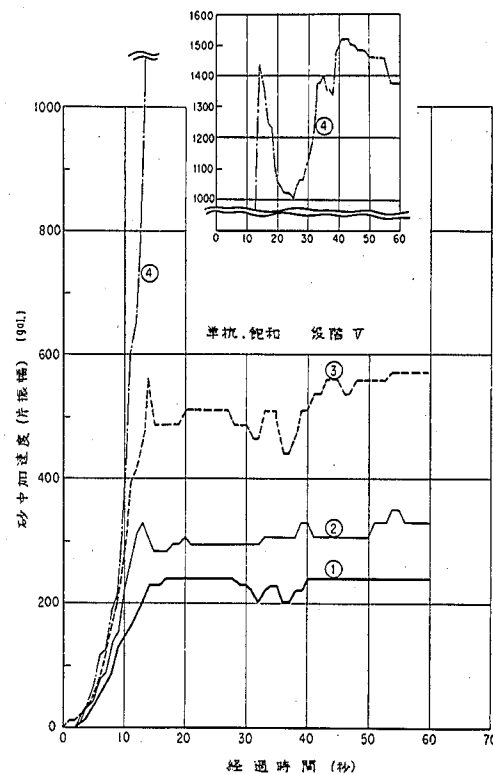
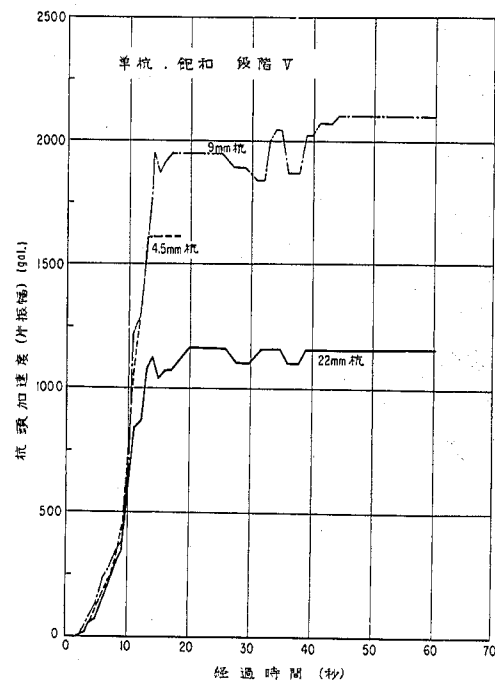
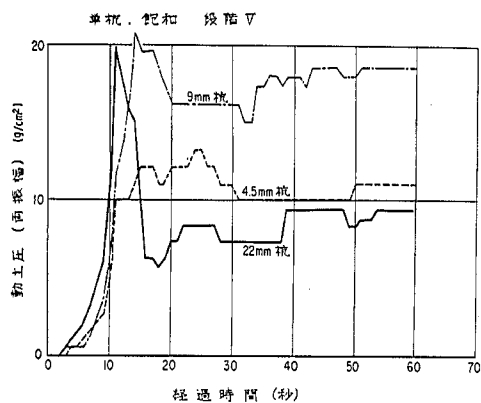
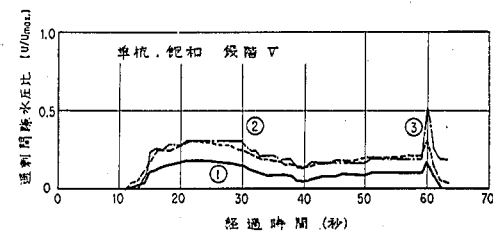
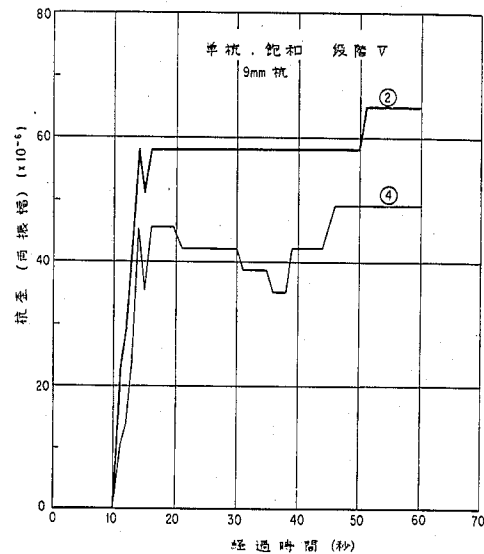
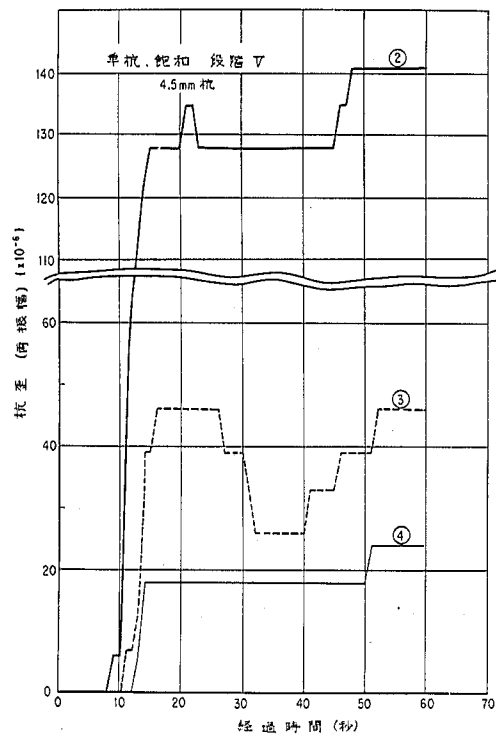
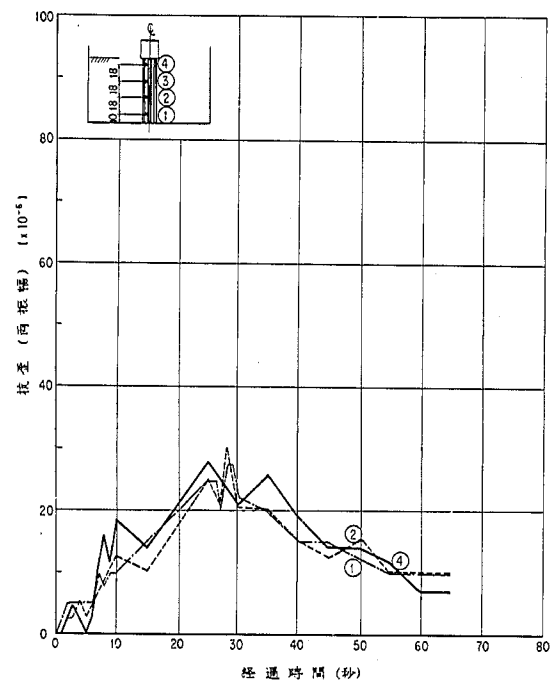
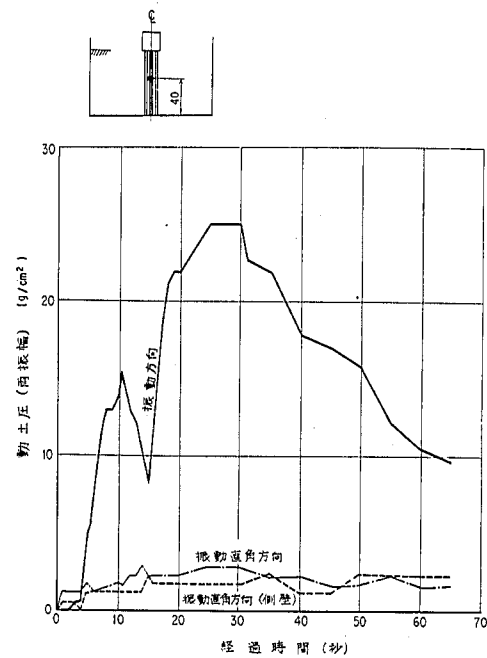


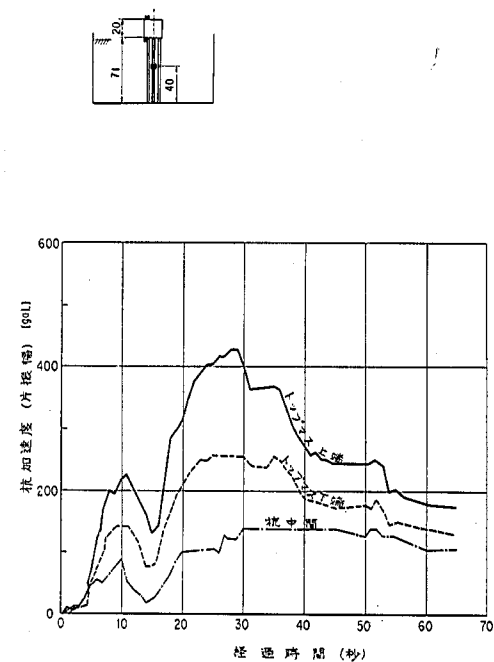
图 4-10 单杭・飽和砂層実験段階 V



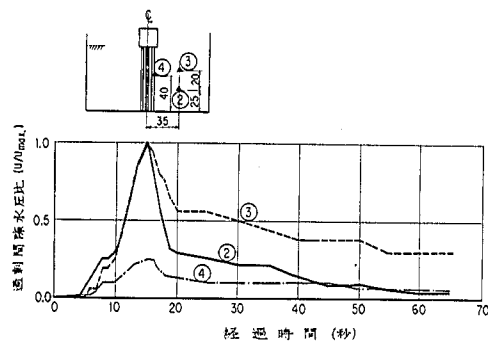
群抗，饱和 级脂 I



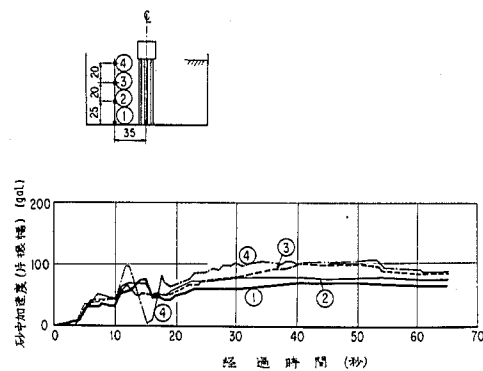
群抗, 饱和 殺菌 I



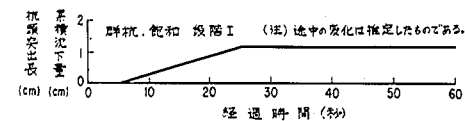
辟枕,飽扣 設陷 I



群枕, 饱和 段階 I



群抗.飽和 段階 I



群杭、飽和 段階Ⅰ (注) 途中の変化は推定したものである。

图 4-1-1 群杭·饱和层实验阶段 I

実験の種類：群杭・飽和 段階Ⅱ

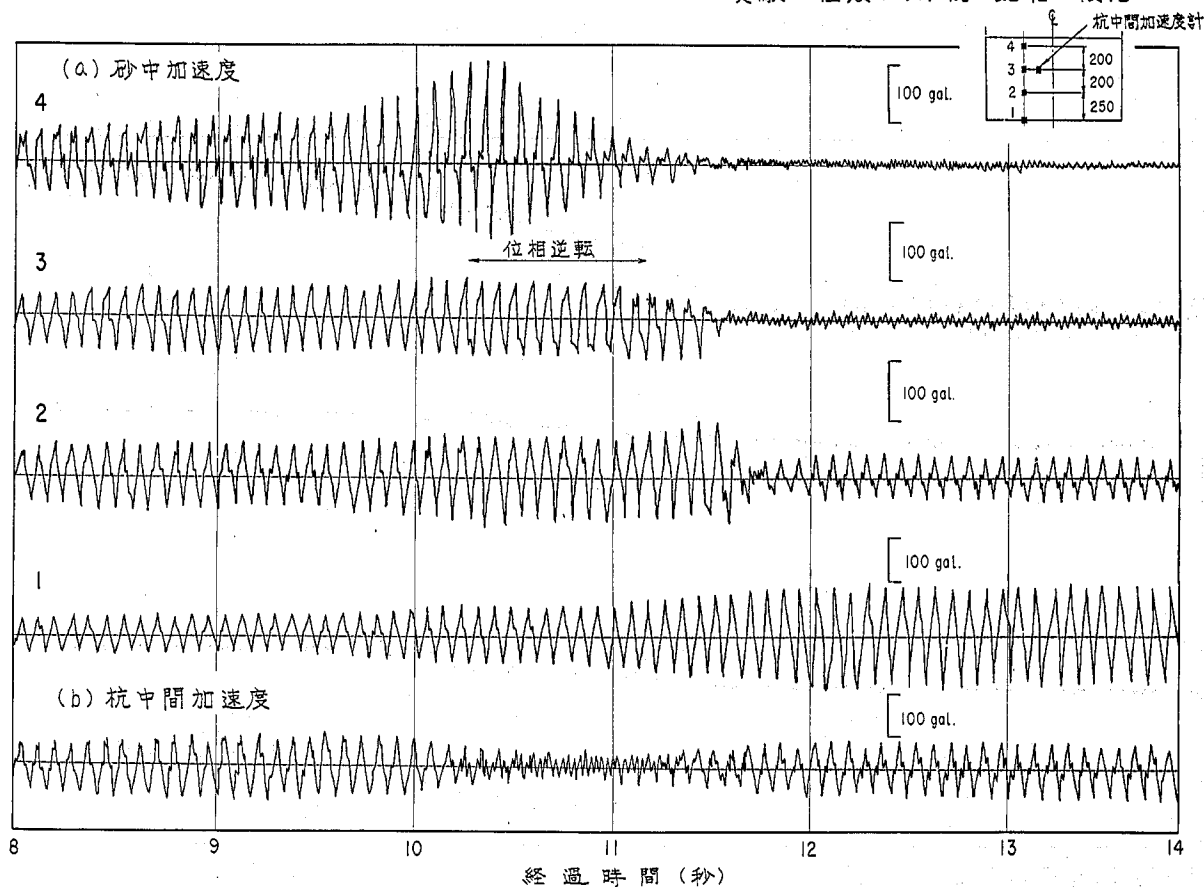


図4-12(1) 原記録波形 (群杭・飽和, 段階Ⅱ)

実験の種類：群杭・飽和，段階Ⅱ

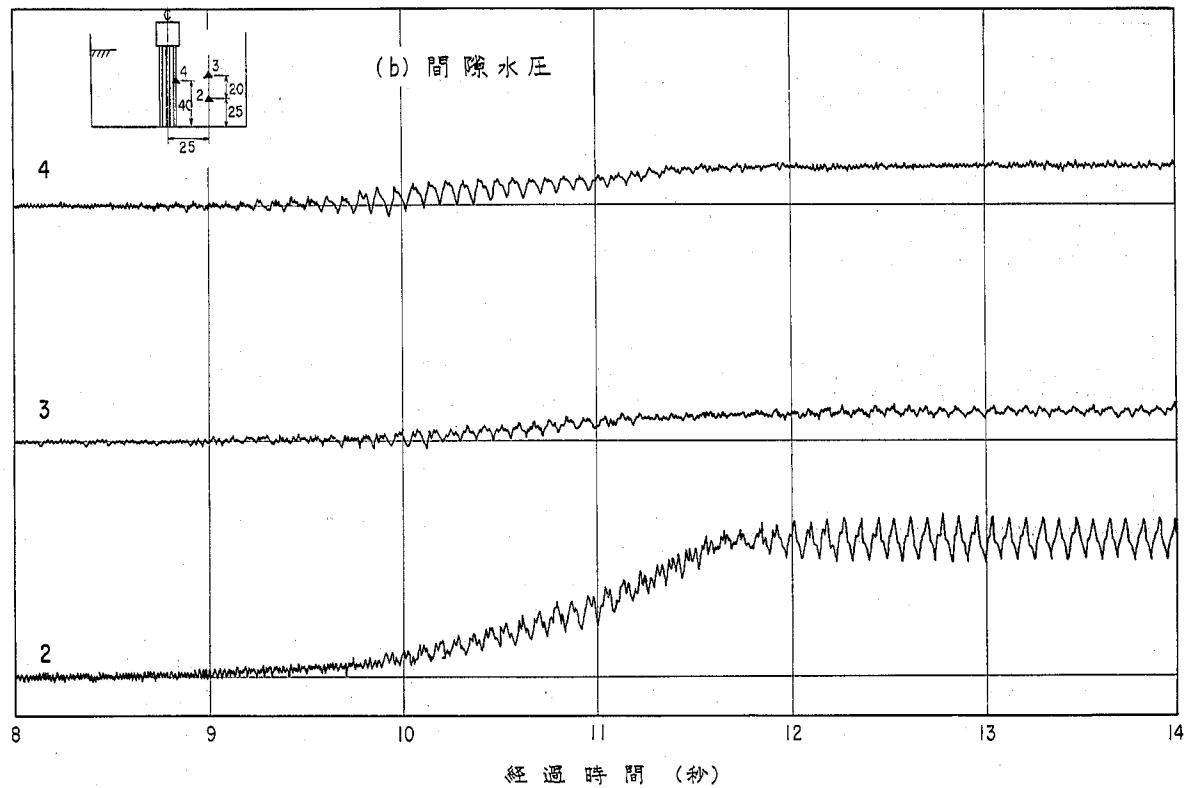
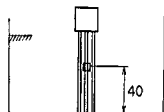


図4-1 2(2) 原記録派形 (群杭・飽和，段階Ⅱ)



実験の種類：群杭・飽和，段階Ⅱ

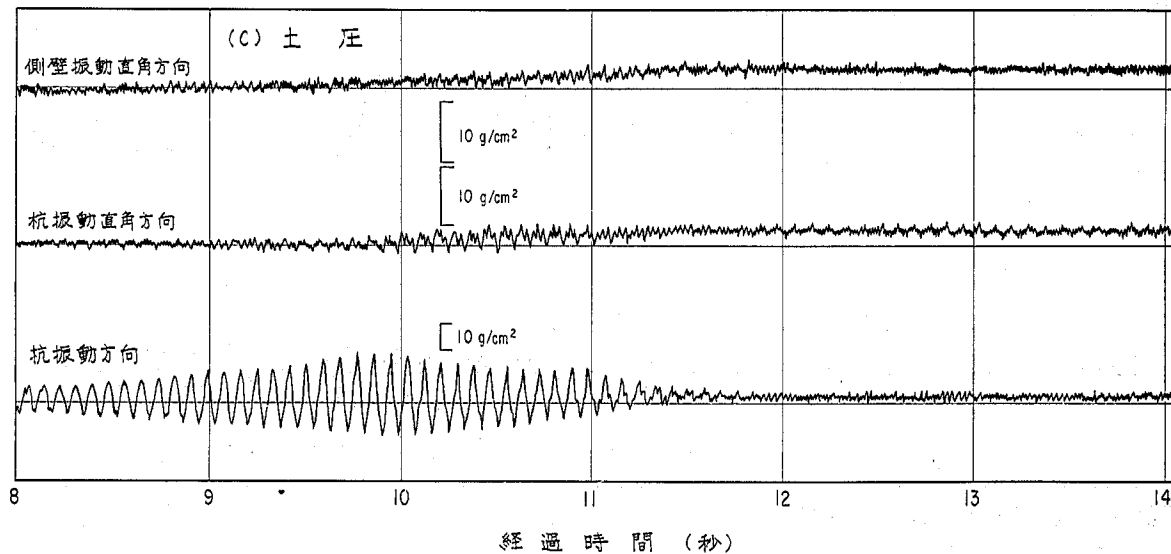
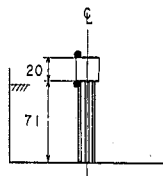


図4-12(3) 原記録派形 (群杭・飽和，段階Ⅱ)



実験の種類：群杭・飽和，段階Ⅱ

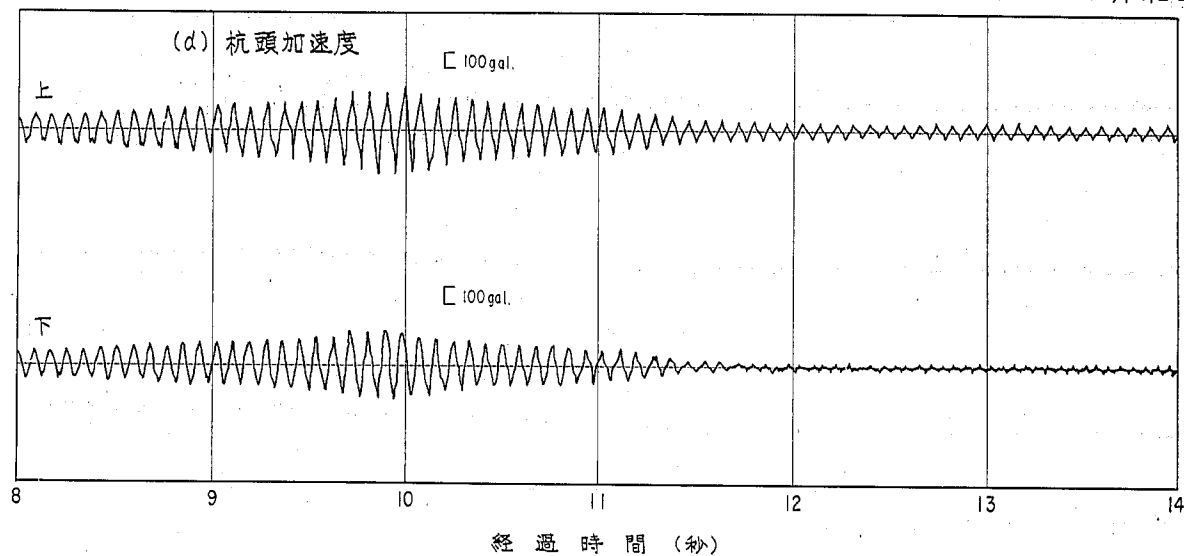


図4-12(4) 原記録派形 (群杭・飽和，段階Ⅱ)

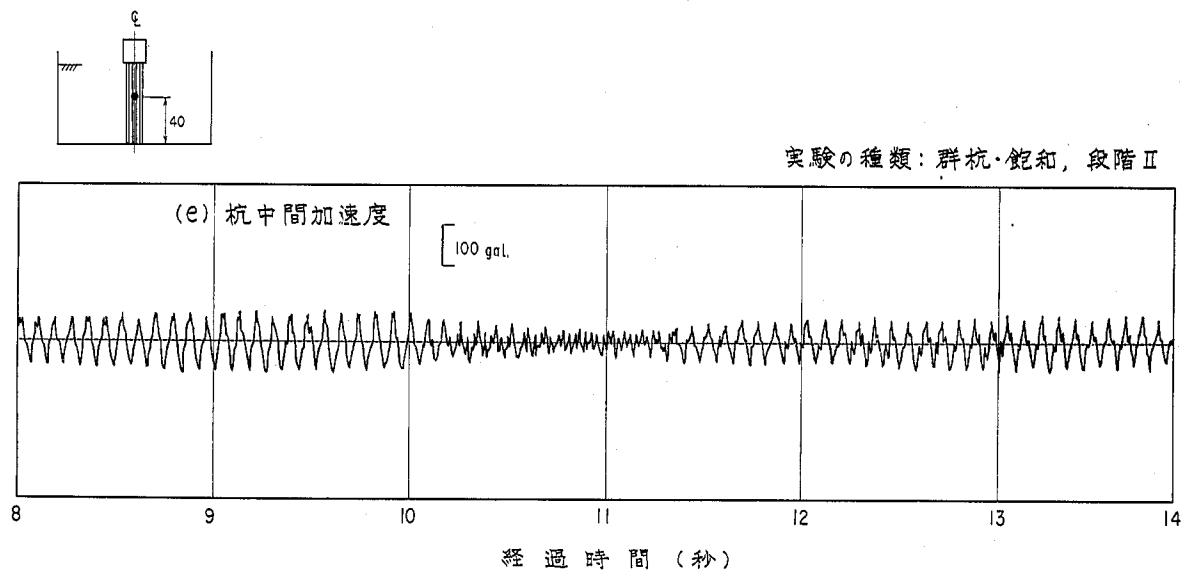
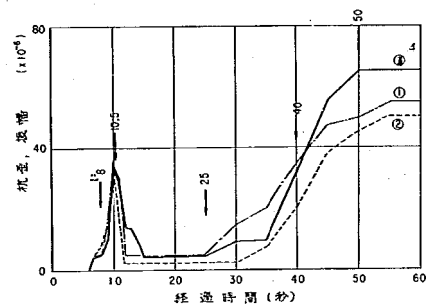
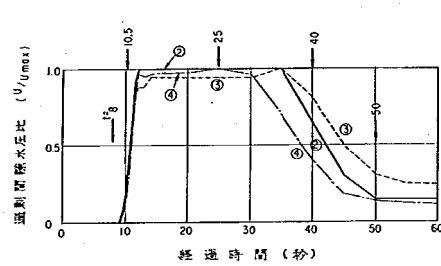


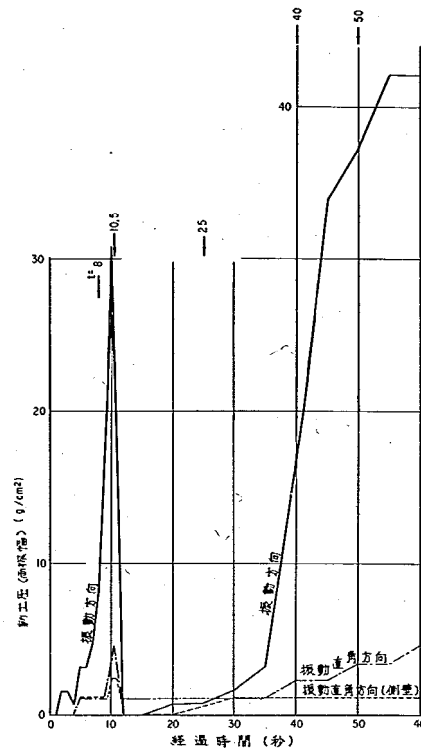
図 4-1 2(5) 原記録派形 (群杭・飽和, 段階Ⅱ)



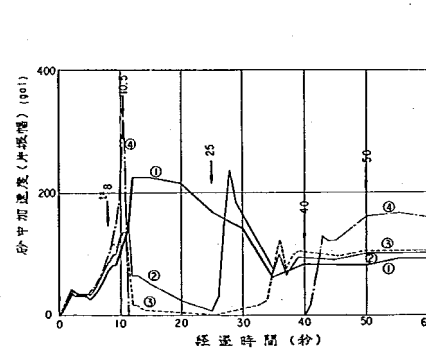
群杭・飽和 段階Ⅱ



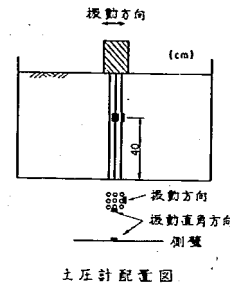
群杭・飽和 段階Ⅱ



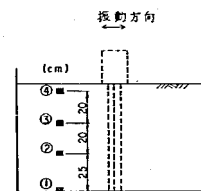
群杭・飽和 段階Ⅱ



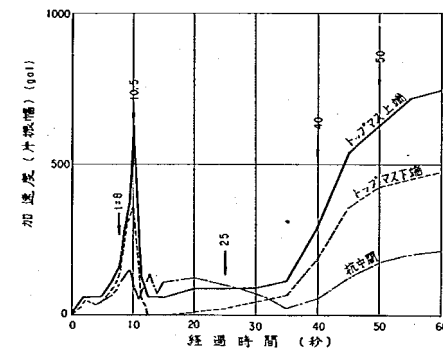
群杭・飽和 段階Ⅱ



土圧計配置図



砂中加速度計配置図



群杭・飽和 段階Ⅱ

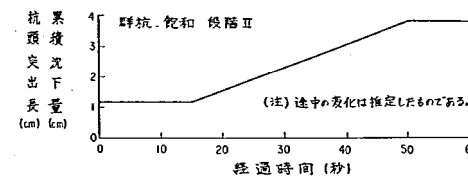


図4-13 群杭・飽和段階Ⅱ

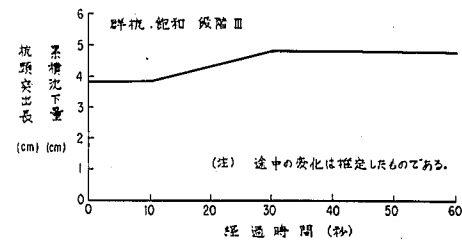
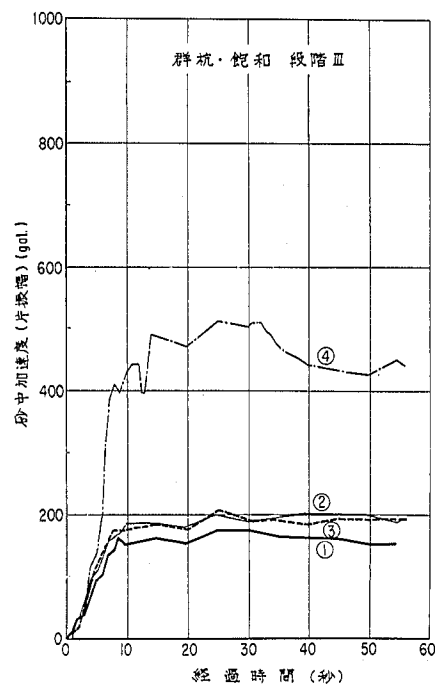
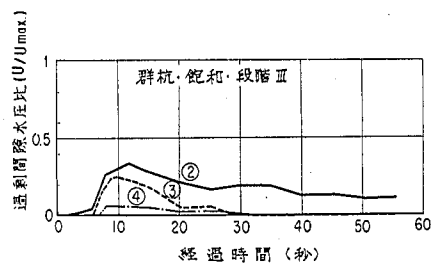
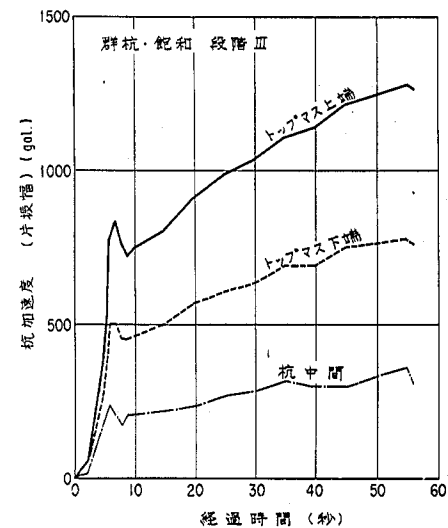
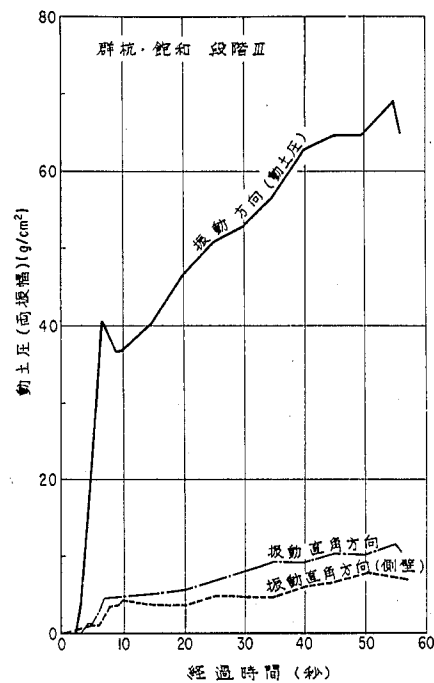
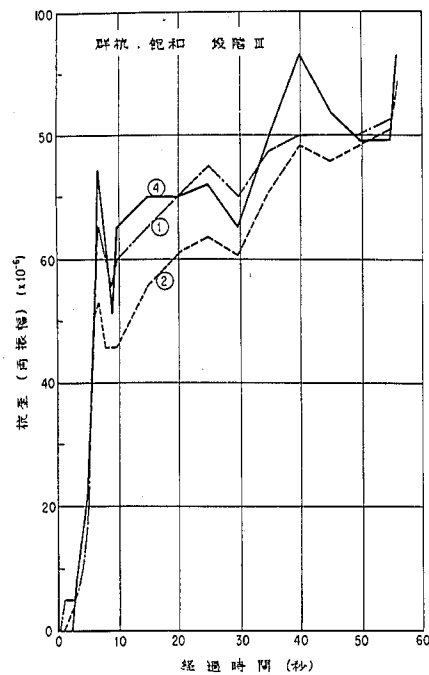


図 4-14 群杭・飽和砂層実験段階Ⅲ

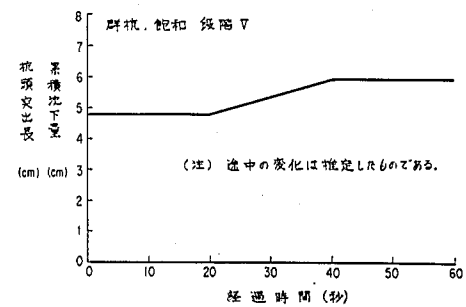
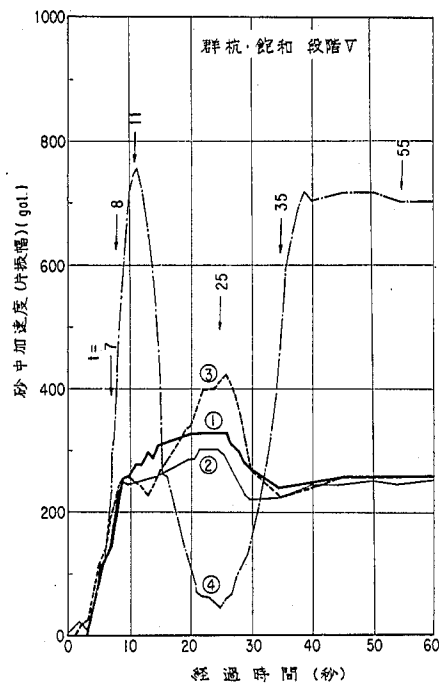
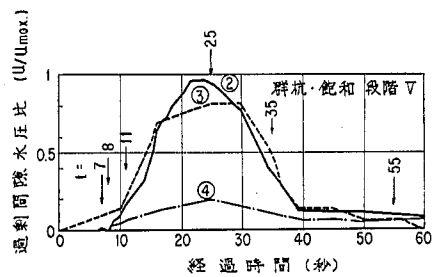
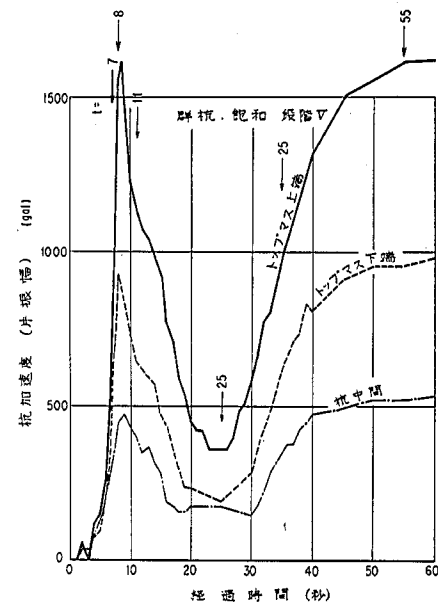
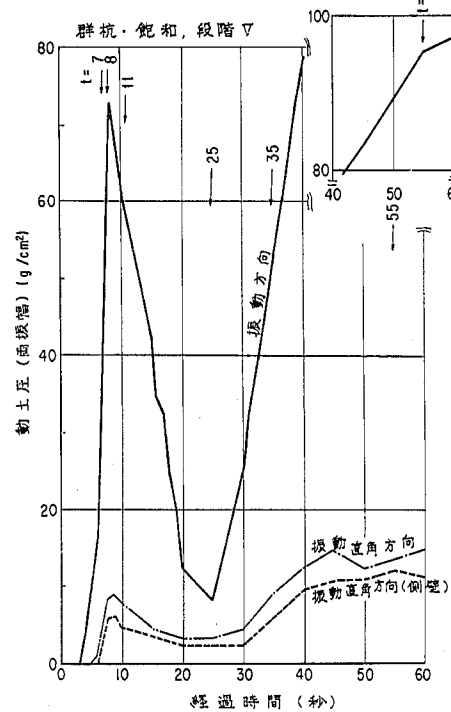
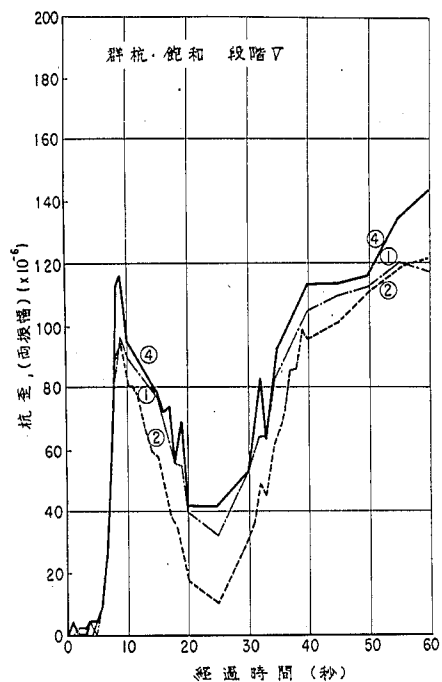


図4-15 群杭・飽和層実験段階V

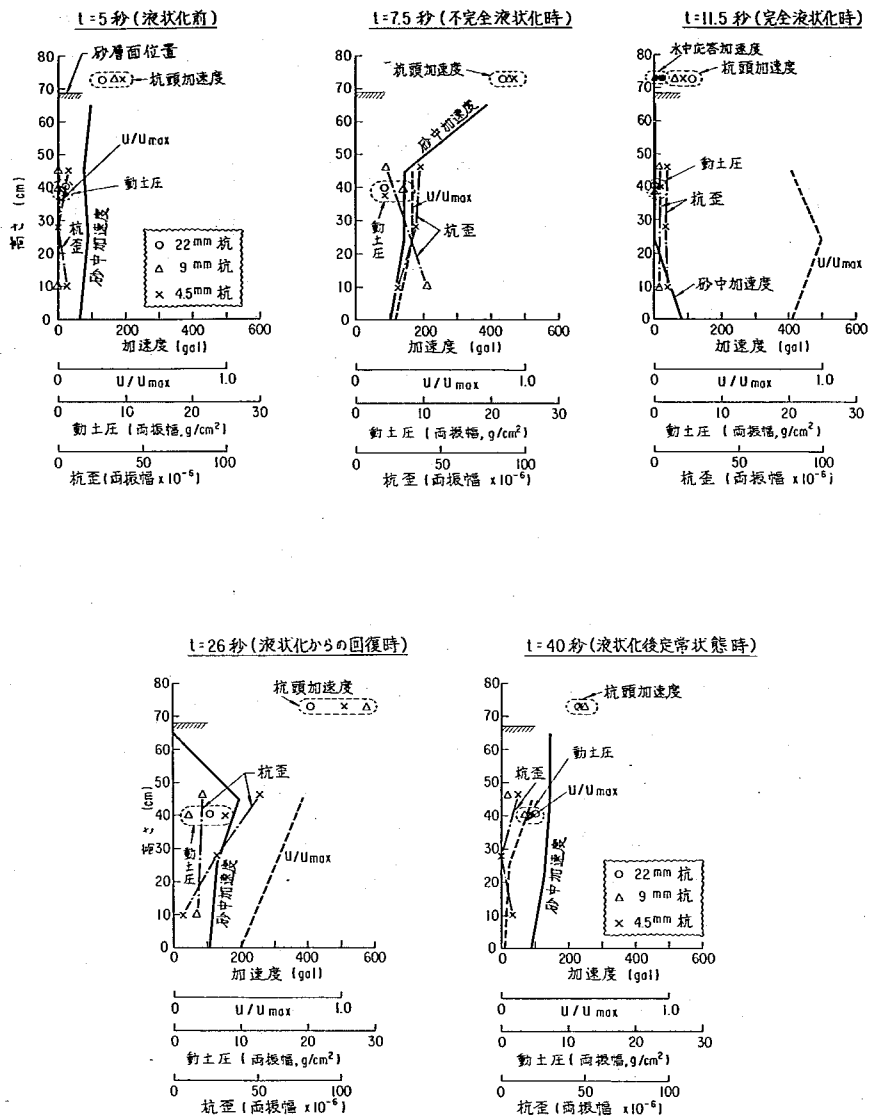


図4-16 単杭・飽和 段階Ⅱ

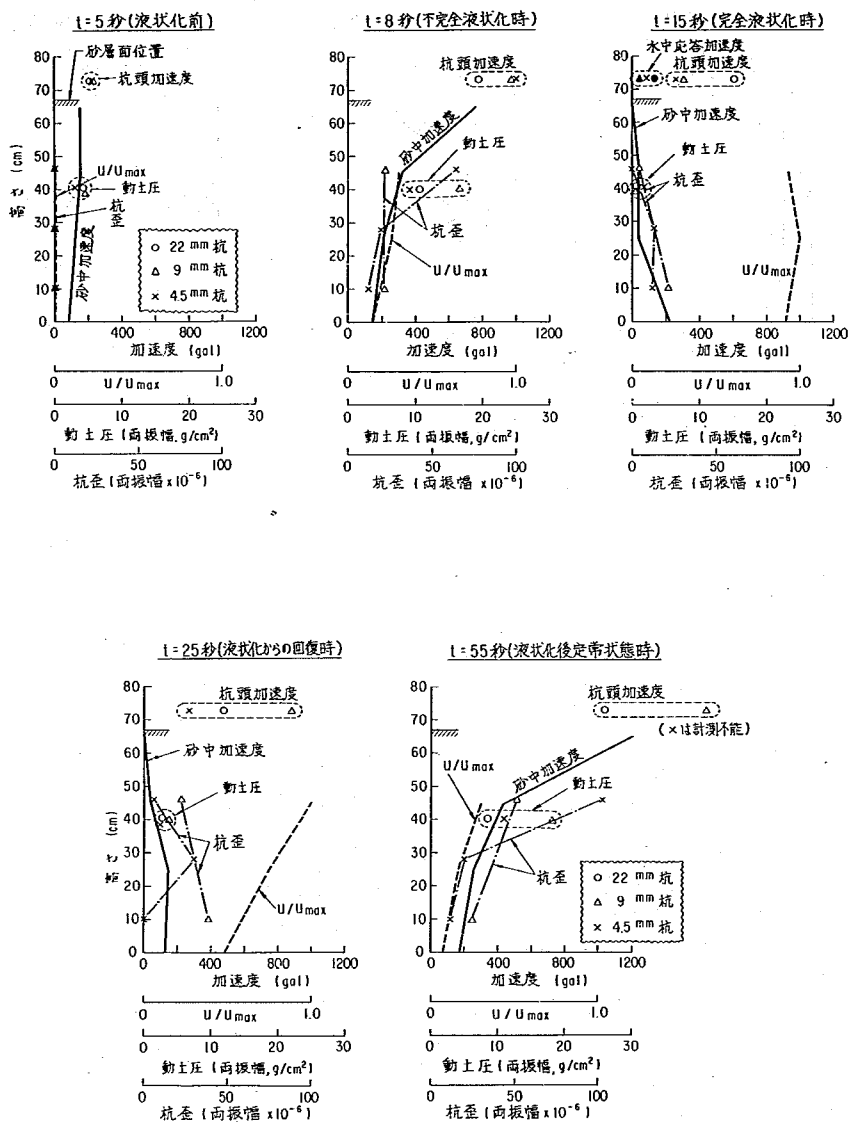


图 4-17 单杭・飽和 段階Ⅲ

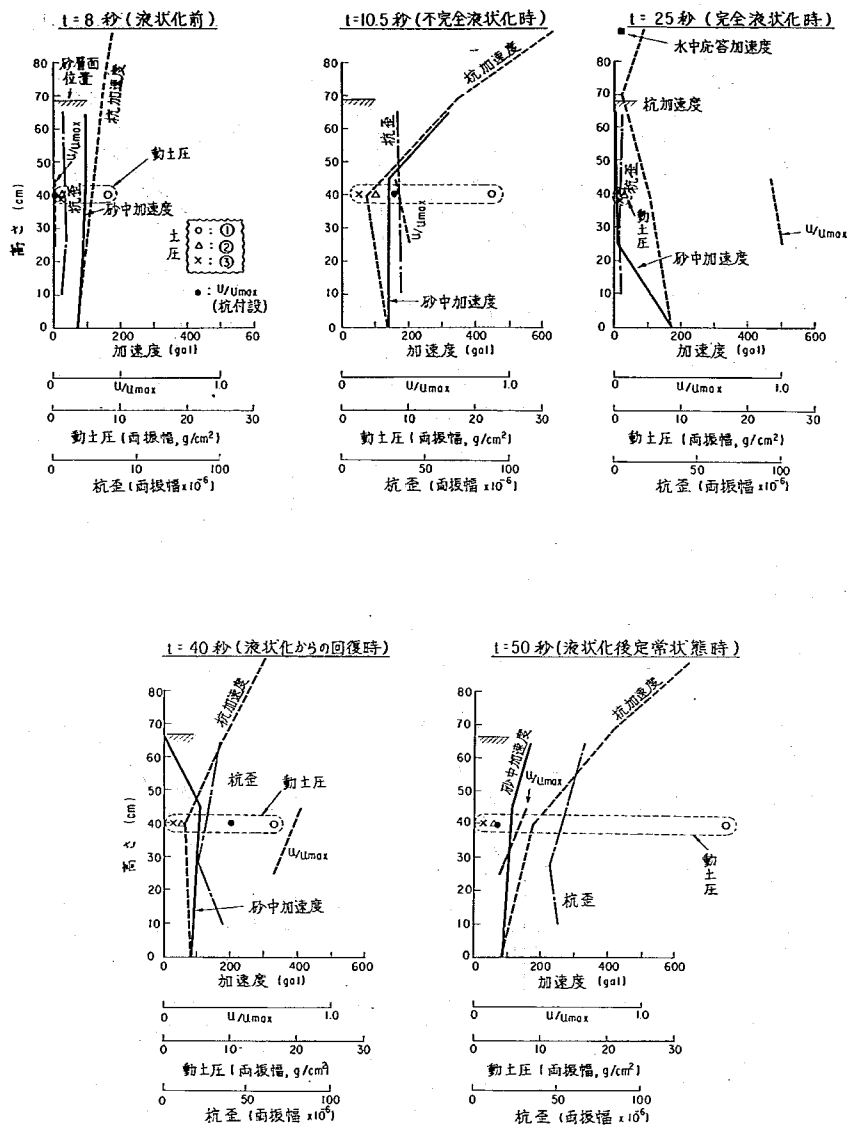


図4-18 群杭・飽和段階Ⅱ

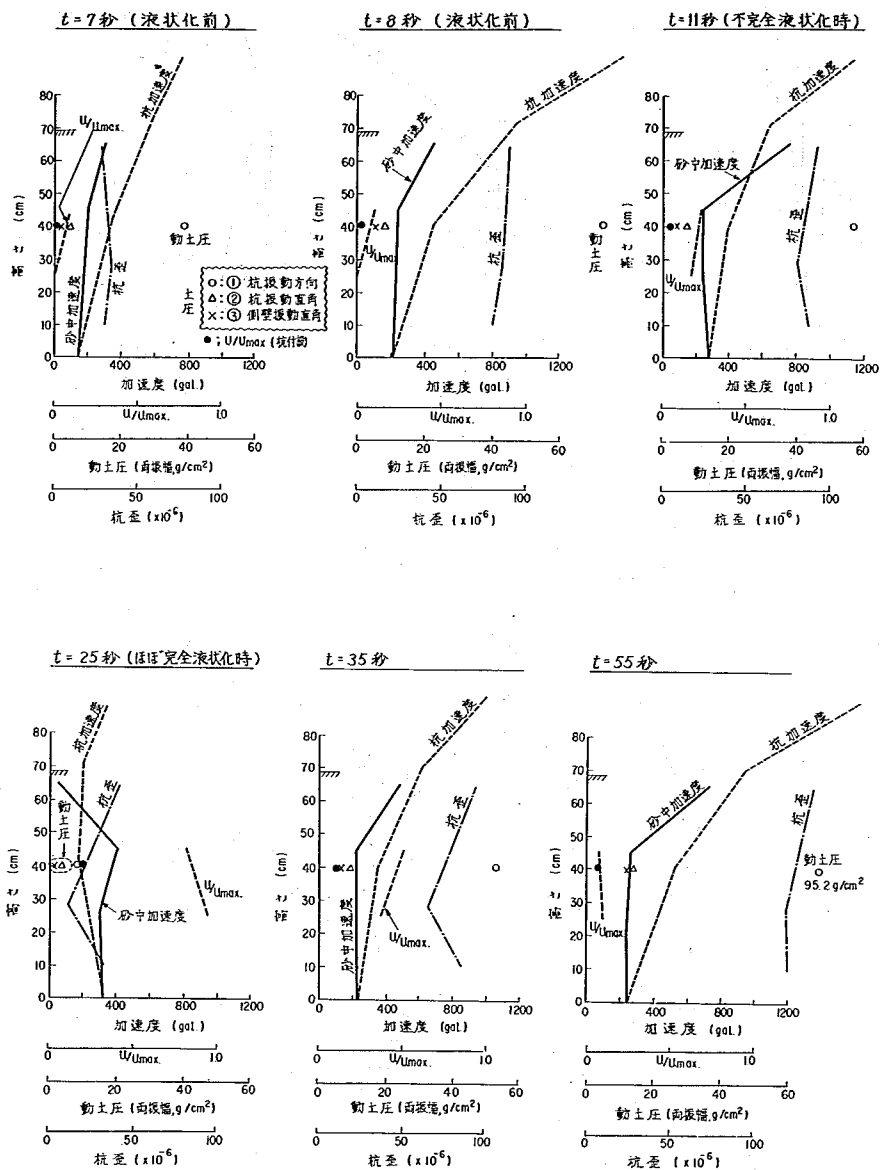


図4-19 群杭・飽和砂層実験 (段階V)

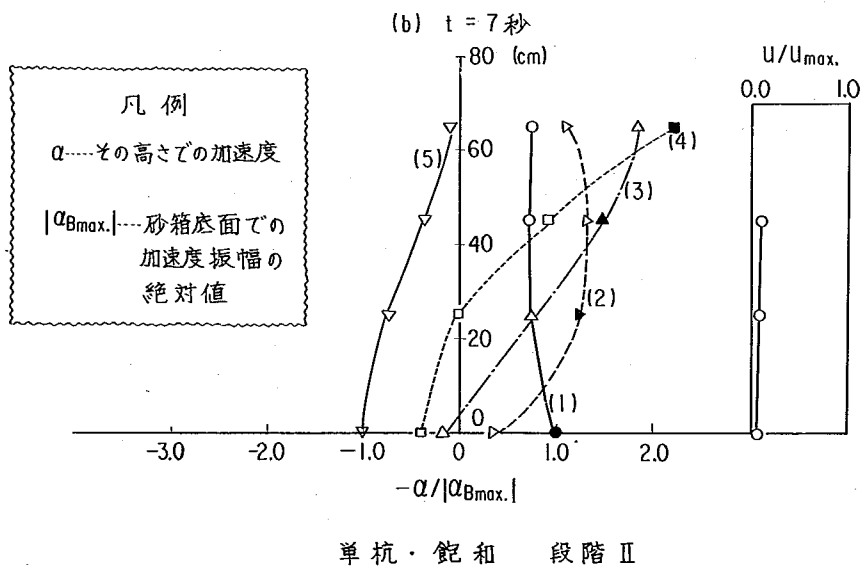
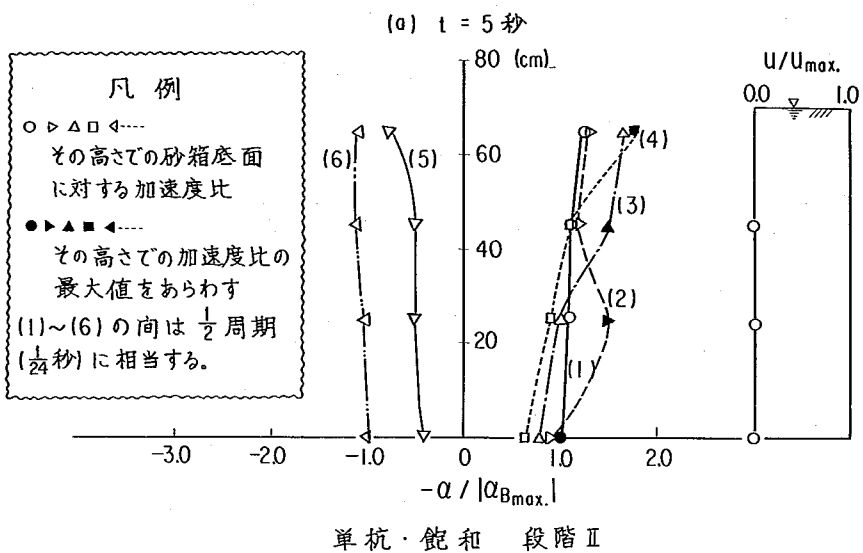
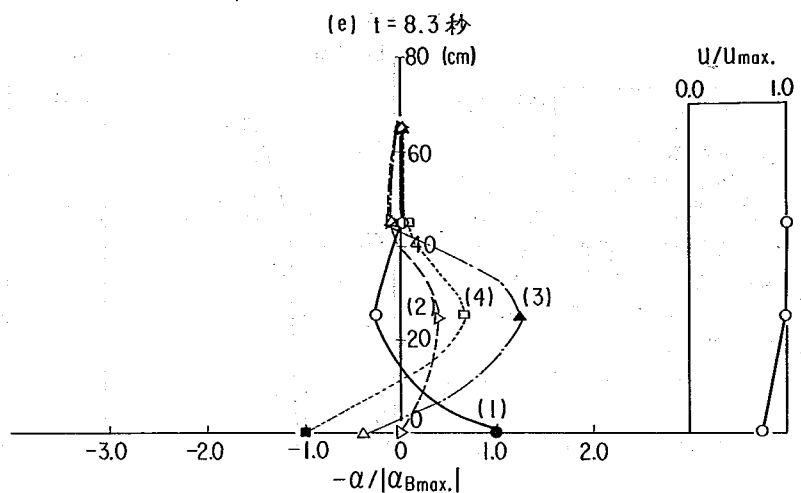
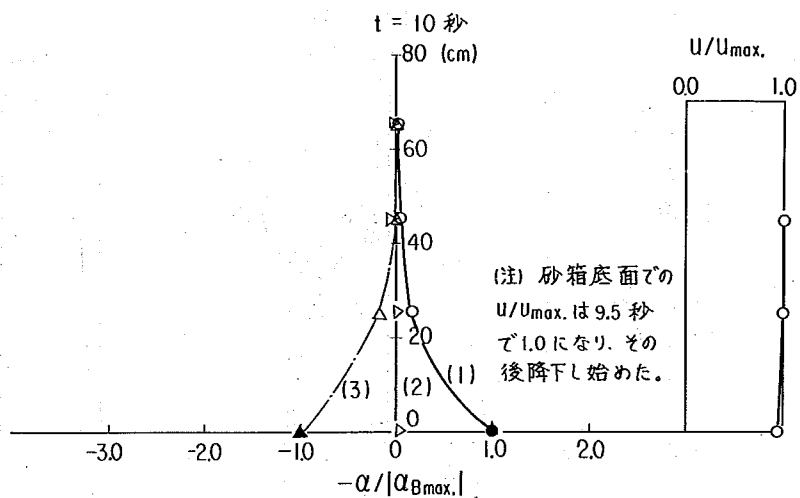


図4-20(1) 加速度比、等の分布の時間的变化(単杭・飽和 段階Ⅱ)

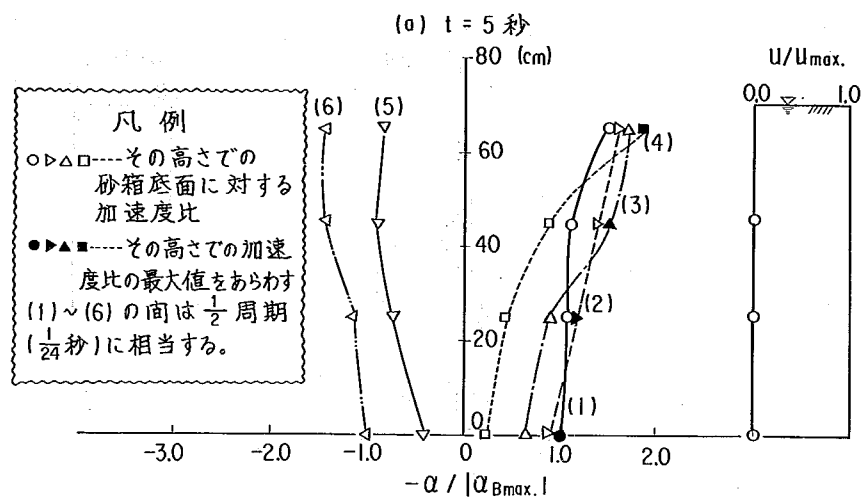


単杭・飽和 段階Ⅱ

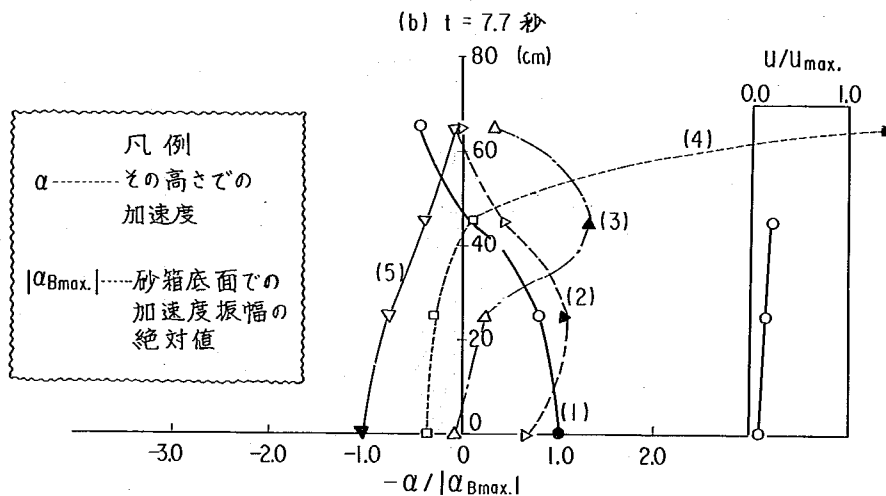


単杭・飽和 段階Ⅱ

図 4-20(3) 加速度比, 等の分布の時間的变化 (単杭・飽和 段階Ⅱ)

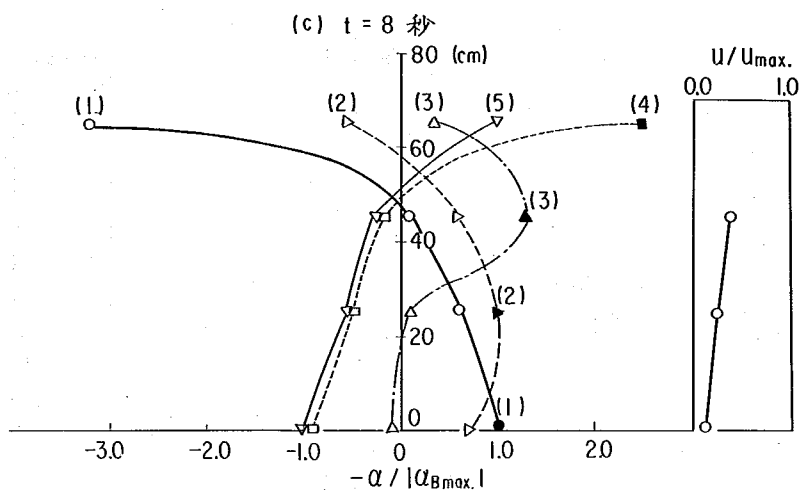


単杭・飽和 段階Ⅲ

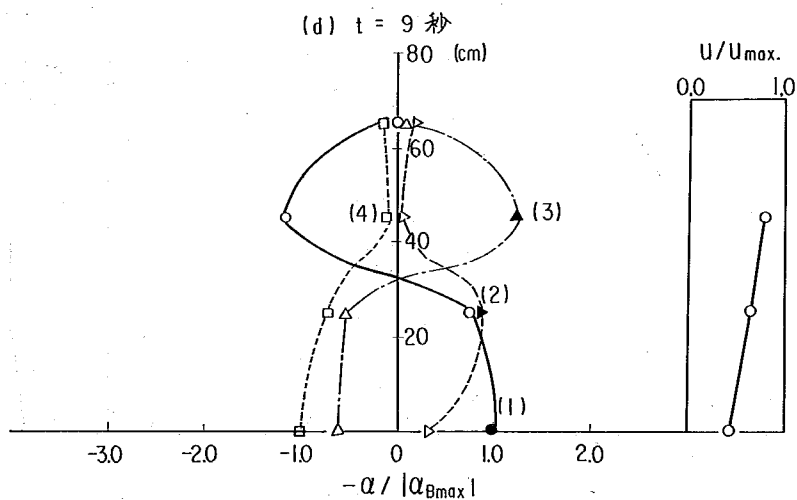


単杭・飽和 段階Ⅲ

図4-2 1(1) 加速度比, 等の分布の時間的变化 (単杭・飽和 段階Ⅲ)



単杭・飽和 段階Ⅲ



単杭・飽和 段階Ⅲ

図4-2 1(2) 加速度比, 等の分布の時間的变化 (単杭・飽和 段階Ⅲ)

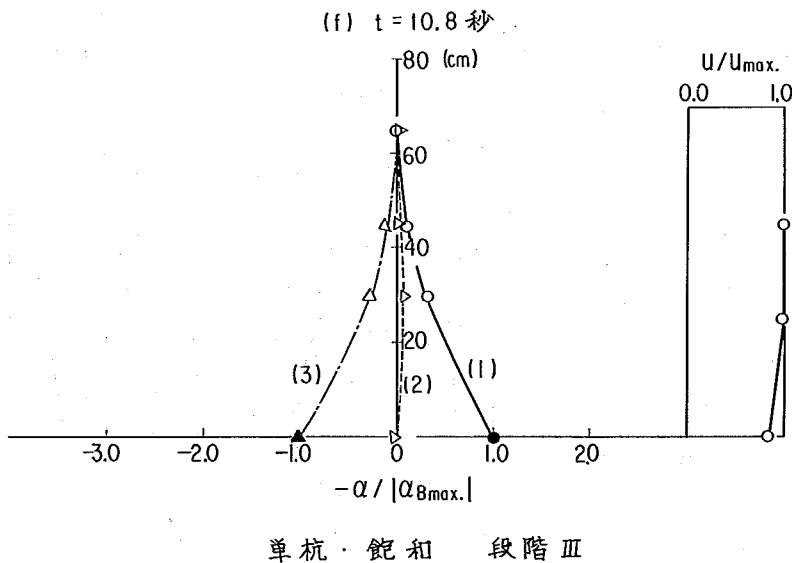
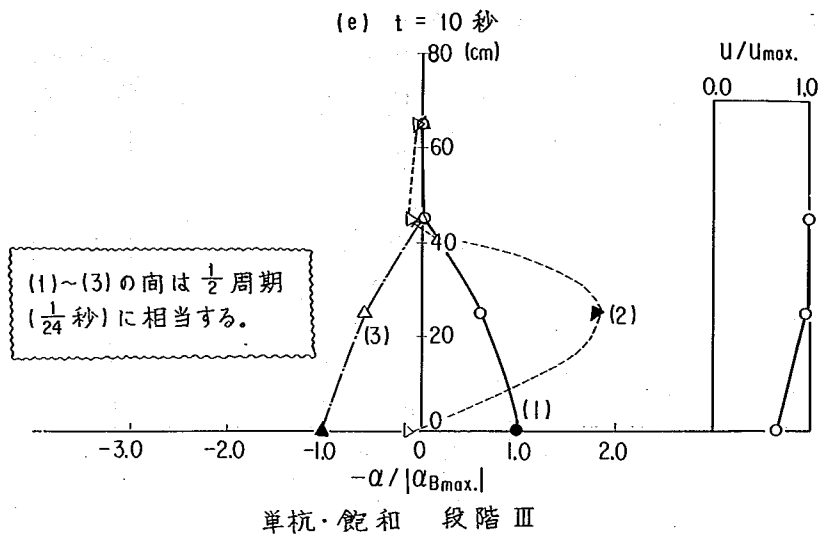
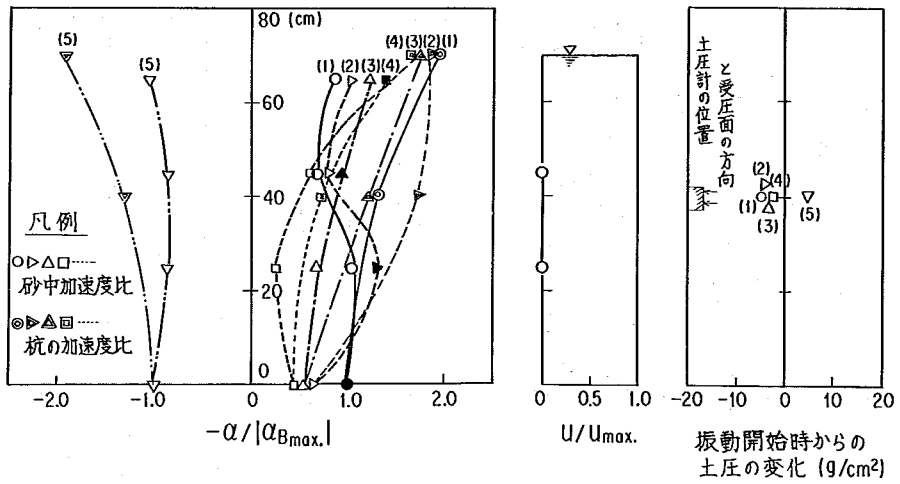
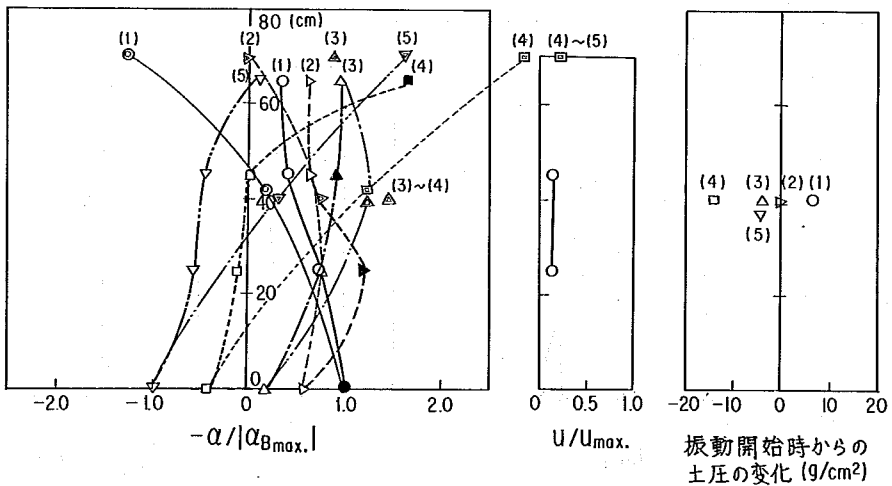


図4-21(3) 加速度比, 等の分布の時間的变化 (単杭・飽和 段階Ⅲ)

(a) $t = 8$ 秒



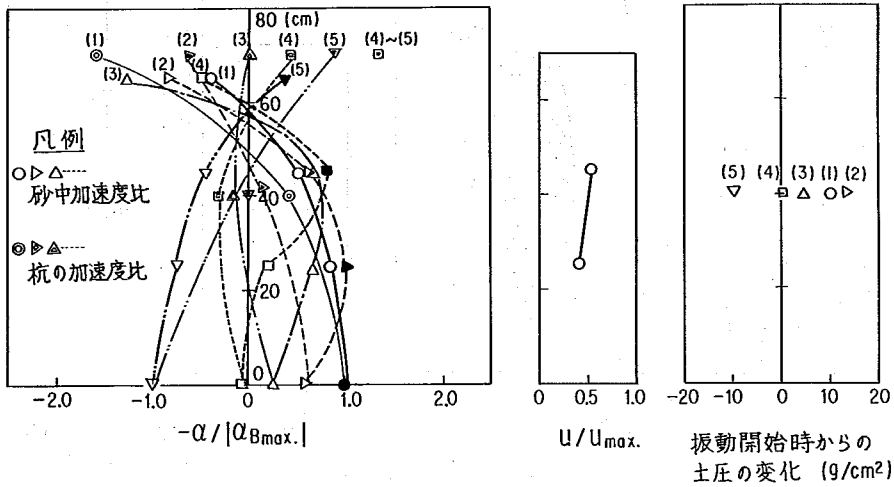
(b) $t = 10$ 秒



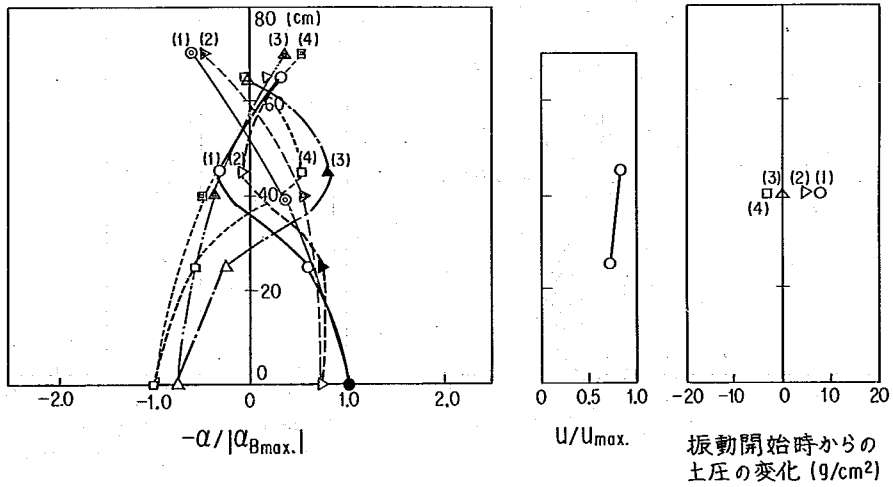
群杭・飽和 段階Ⅱ

図 4-22 (1) 加速度比等の分布の時間的变化 (群杭・飽和 段階Ⅱ)

(c) $t = 10.8$ 秒



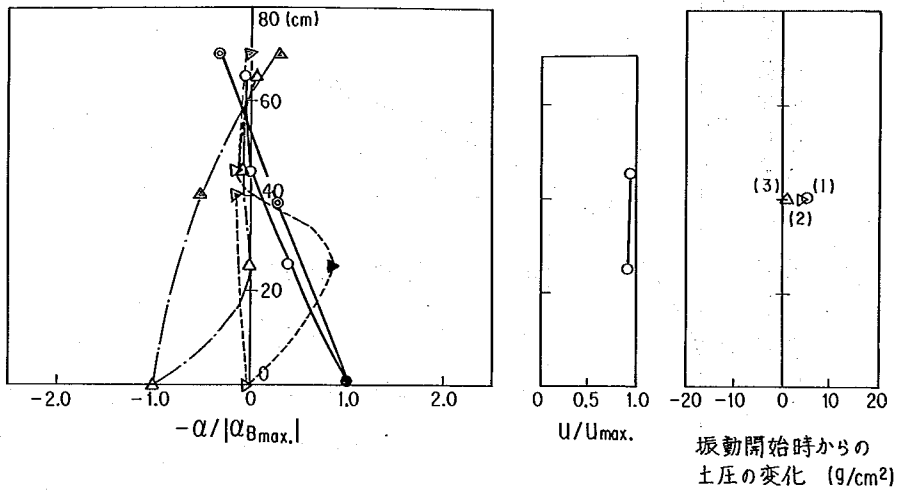
(d) $t = 11.3$ 秒



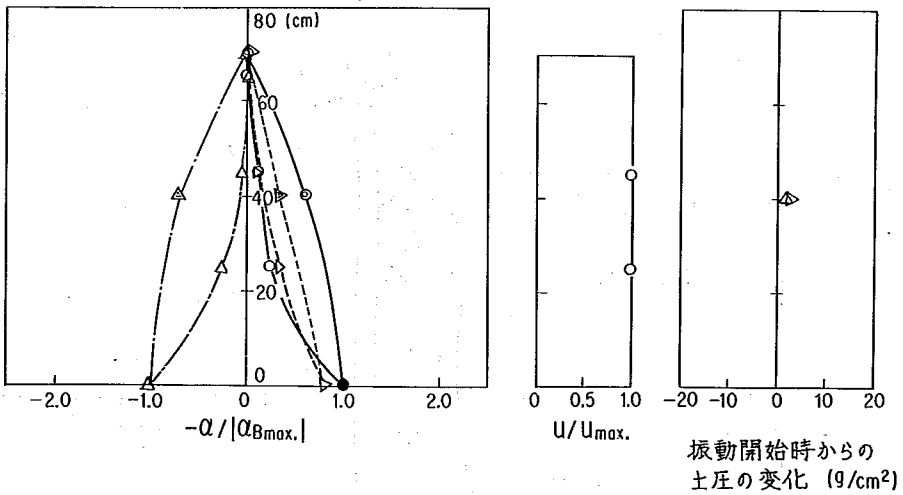
群杭・飽和 段階Ⅱ

図4-22(2) 加速度比等の分布の時間的变化 (群杭・飽和 段階Ⅱ)

(e) $t = 11.6$ 秒



(f) $t = 12.2$ 秒



群杭・飽和 段階Ⅱ

図4-22(3) 加速度比等の分布の時間的变化 (群杭・飽和 段階Ⅱ)

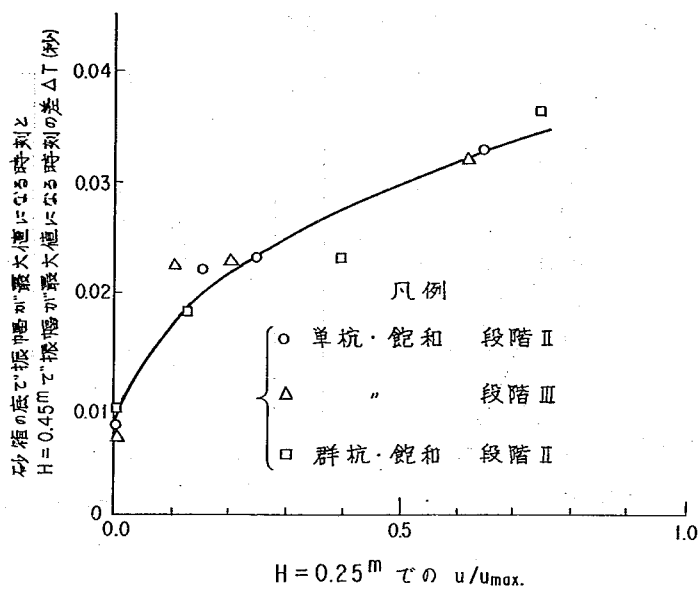


図 4-23 $\Delta T \sim u/u_{\max}$ 関係

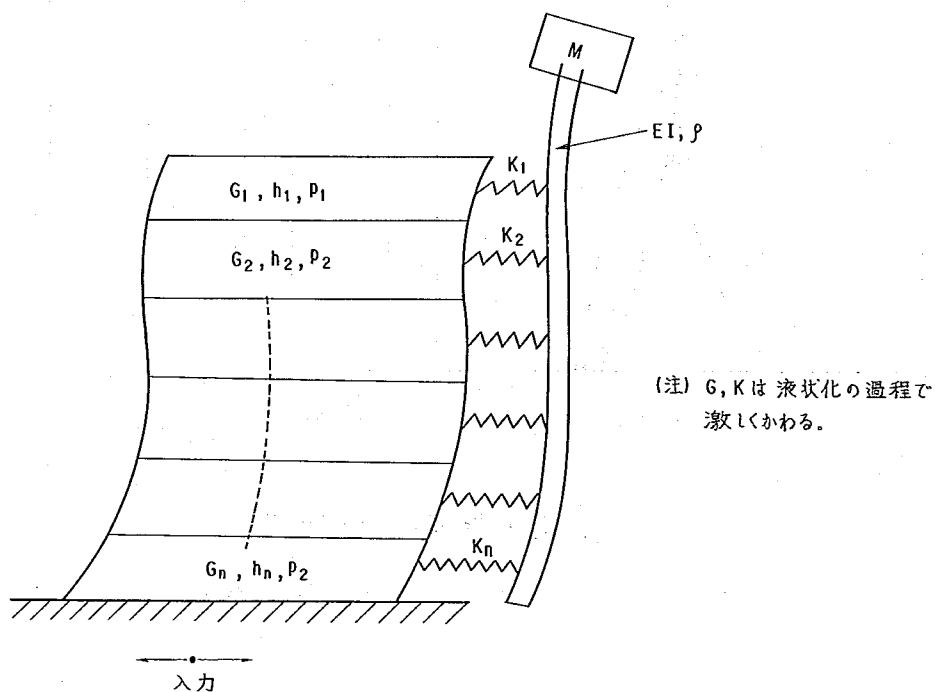


図 4-24 地盤-杭系振動モデル横式図

第 5 章 ま と め

以上示した実験は、種々の点で不満足なものではあるが、以下の定性的な結論が得られた。

- (i) 飽和砂層は乾燥砂層よりも、同じ入力に対して、沈下層がはるかに大きくなり得る。それは、飽和砂層で液状化が発生すると全層に亘って大きなせん断定が発生するからであり、ゆるづめの砂層で最大 7～8 % の沈下が生じうる。
- (ii) 杭は完全液状化時を除いて、地盤の動きに大きく支配される。多少、杭の EI が増加してもこのことは変らない。
- (iii) 液状化してゆく砂層中の杭の挙動は非定常であり、非常に複雑である。完全液状化すると、地盤は静止し液状化砂層中の杭の固有周期が入力の卓越周期と一致しない場合は、杭は振動しない。

しかし、不完全液状化時に地盤が大きく振動する場合は、杭も大きく振動する。

しかし、その時間はそれほど長くはない。

参 考 文 献

- 1) 土木研究所資料 912 号 (1973) 「土の動的変形特性」
- 2) 土木研究所資料 1080 号 (1976) 「広範囲な歪領域での砂の動的変形特性」
- 3) 岩崎敏男・能岡文夫・高木義和 (1976) 「室内実験による砂の動的変形特性の歪依存性」
1976 年土木学会年次学術講演会第Ⅱ部
- 4) 栗林栄一・能岡文夫・吉田精一 (1974 年) 「明治以後の本邦の地盤液化履歴」土木研究所
報 30 号
- 5) 岩崎敏男・能岡文夫・池本正英 (1976) 「振動台実験による砂層の振動特性と沈下特性」
1976 年土木学会年次学術講演会第Ⅱ部
- 6) 岩崎敏男・能岡文夫・吉田精一 (1976) 「我国における地震時の地盤流動化履歴」土木技術資
料 9 月号
- 7) 岩崎敏男・能岡文夫・坂場義雄 (1976) 「砂層中の杭の動的挙動に関する模型振動実験」
1976 年 14 回土木学会地震工学研究発表会
- 8) 鹿籠・佐藤・伯野 (1973) 「不完全液化化の地中構造物に及ぼす影響」土木学会年次学術講演
会第三部
- 9) 吉田・植松 (1975) 「液化化した砂中に於ける杭に関する模型実験」土木学会年次学術講演会
第三部