198
ISSN 0386—5878
土木研究所資料第2715号

土 木 研 究 所 資 料

振動台実験における水平砂地盤の間隙水圧発生特性の検討

Study on the Built-Up Pore Water Pressure in Horizontal Sand Layer during Shaking Table Tests

平成元年2月

建 設 省 土 木 研 究 所
地震防災部振動研究室

「Copyright © (1989) by P. W. R. I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P. W. R. I.

この報告書は，土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって，本報告書の全部又は一部の転載，複製は，土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。」

土木研究所資料
第2715号平成元年2月

振動台実験における水平砂地盤の間隙水圧発生特性の検討

Study on the Built-Up Pore Water Pressure in Horizontal Sand Layer during Shaking Table Tests

振動研究室　室長　佐々木　康
研究員　松本　秀應
昭和62年度部外研究員　増井　仁*
昭和63年度部外研究員　福岡　浩明**

要　旨

液状化の被害防止のためには，地震時に地盤内に発生する間隙水圧の予測精度を向上し，発生間隙水圧が構造物の被害に与える影響度合を明らかにする必要がある。

この報告は，振動台実験で得られた加速度・間隙水圧データを分析し，間隙水圧の発生特性を検討した結果をとりまとめたものである。検討に用いた実験データは，昭和55，56年度に実施した砕石ドレーンに関する大型振動台実験および現在実施中の液状化した地盤内の杭の水平抵抗に関する実験により得られたものである。

検討の結果，加振時に地盤内に発生したひずみ（累積ひずみ）と発生した間隙水圧には密接な関係のあることが明らかとなった。

キーワード：液状化，振動台実験，間隙水圧，せん断ひずみ

まえがき

この報告は、地盤液状化に係わる問題解決のために過去に実施した振動台実験データを用いて、水平な飽和砂層内に発生する加振時の間隙水圧の上昇特性を検討した結果である。

地盤の液状化は構造物の地震時安定性を脅かす甚だ具合いの悪い現象である。液状化に起因する構造物被害を軽減するためには、地盤の液状化の発生を防止するか、液状化が発生しても被害が生じないような構造物の造り方を工夫するかしなければならない。

液状化の発生の可能性が有るか無いかを評価・判定する実用的な方法は、一応出来上がっているが、地盤に生じた液状化がどのような被害を結果としてもたらすかという問題は必ずしも十分解明されているとは云い難い。被害防止という観点からは、液状化の発生の可能性を判定する方法の精度向上とともに、地震動によって地盤内でどのように間隙水圧が発生し、それが構造物にどのような被害をもたらすかを明らかにする必要がある。

このため振動研究室では、地盤震害の予測方法・液状化地盤中の構造物の挙動に関する検討を実施中であるが、これらの主題の解明にとっては土層構成や地震動の大きさを考慮して地盤中に発生する間隙水圧を出来る限り精度良く、しかも、出来るだけ簡易に予測する方法を開発し、その妥当性を検証することが鍵になる。

実地盤における現象は複雑であるが、絡み合った糸をひとつずつ解いていく努力が必要である。ここでは、振動台実験で得られたデータを、“小さな実物“の挙動を表わすデータと考え（縮尺模型としては扱わない）、そこで生じた現象の統一的な説明が可能な解釈を見つけ出せば、その解釈方法が実際の現象にも適用出来るという立場で検討を進める。

検討に用いた実験データの１つは、著者の１人が動土質研究室に在任中に実験した砕石ドレーンに関する大型振動台実験のデータである。この実験は昭和５５年度から昭和５６年度にかけて谷口栄一氏（現企画課長）、ならびに小笠原久氏（現関東地建）との共同作業として他の同僚の協力を得て実施したものである。

実験結果の主要部分については既に報告しているが、この実験に関しては加振周波数の異なる２種類の加振をした時に観測した間隙水圧の発生特性に違いがあるのに気付きながら、その違いを統一的に十分、説明できていなかったことが、その後も永く気にかかっていた。

この点を解明するため、昭和６３年度に部外研究員として滞在した増井仁氏の協力を得て、観測した加速度記録を詳細に追跡し、地盤内の応力とひずみの時間的・空間的な変化を検討してみることとした。その結果、加振時に地盤内に発生したひずみ（累積ひずみ）を用いて説明すれば、加振周波数の異なる２組の実験データが統一的に解釈できることが明かとなった。この検討結果は本報告書の第Ⅰ編に収録してある。

このような解釈が著者らの気付かない何らかの理由によって、たまたま用いたデータの得られた実験についてだけ成り立つものであるのか、いつも成り立つものであるのかどうか吟味するために、さらにもう１つの振動台実験によって得られたデータについても検討してみることとした。

２つ目のこの振動台実験は近藤益央氏（現外務省）ならびに佐谷祥一氏（現振動研究室）の協力を得ながら現在実施中の液状化した地盤内の杭の水平抵抗に関する実験である。この実験については別途、詳細に報告する予定である。

この実験データを用いた検討結果によっても発生間隙水圧と地盤内ひずみとの間には、上述の検討結果が成立することが明らかとなった。この結果が、本報告書の第Ⅱ編に収録してある。

そこで、さらに実地盤で地震時に観測された間隙水圧のデータと加速度記録を用いて、発生した間隙水圧の大きさを地盤内に生じたひずみによって説明することを試みた。この検討に用いたデータ（千葉中部地震，昭和５５．９．２５，Ｍ＝６．１）は、東京大学工学部の石原研而教授の好意によって借り受けたものである。しかし、このデータでは間隙水圧の上昇は最初の大きな衝撃的振動によってもたらされていることから、上述の検討結果をうまく活用することが出来なかった。この検討結果が本報告書の第Ⅲ編に収録してある。また水資源開発公団試験所から、千葉県東方沖の地震（昭和６２．１２．１７，Ｍ＝６．７）に際して得られた強震記録が土木研究所に提供されている。本報告の検討の結果をこの記録を用いて試行してみた結果についても、第Ⅲ編に収録してある。なお、本報告の収録には、今後の再吟味の便を考え、第Ⅰ編で用いた大型振動台実験のデータをあわせて収録しておくこととした。

この報告に収録した検討に用いた実験データは上記の多くの方々との共同作業、または、好意によって得られたものであり、これらの方々に心甚なる敬意と感謝の意を表わす次第である。

本報告に収録した飽和砂層の発生間隙水圧と作用したひずみ（累積ひずみ）の関係を実務の場で直接使えるようにするには、さらに幾つかの検討を要するが、さらにその努力を継続したいと考えている。

平成元年１月

振動研究室　　室長　佐々木　康
研究員　松本　秀應
昭和62年度部外研究員　増井　仁
昭和63年度部外研究員　福岡　浩明

目　　次

まえがき

第Ⅰ編　砕石ドレーンに関する実験データの検討 …… 1

1．検討の目的 …… 1
2．検討を行った振動台実験の概要 …… 2
2．1　実験に用いた模型と材料の特性 …… 2
2．2　加振条件と計測方法 …… 8
3．せん断ひずみの計算方法 …… 11
3．1　加速度記録の補正 …… 11
3．1．1　フーリエ変換における補正 …… 11
3．1．2　直接数値積分における補正 …… 11
3．2　数値積分による変位の計算 …… 14
3．2．1　フーリエ積分による変位の計算 …… 14
3．2．2　直接数値積分による変位の計算 …… 14
3．3　せん断ひずみ …… 16
3．4　過剰間隙水圧の整理 …… 18
4．せん断応力の計算方法 …… 20
4．1　加速度から求めるせん断応力 …… 20
4．2　せん断ひずみから求めるせん断応力 …… 23
4．2．1　せん断弾性係数の設定 …… 23
4．2．2　減衰定数の設定 …… 24
4．3　2つの方法で求めたせん断応力の比較 …… 27
5．　実験データの整理方法とその結果 …… 29
5．1　加速度データの整理 …… 30
5．1．1　記録波形 …… 30
5．1．2　液状化前後の鉛直方向の位相差 …… 30
5．1．3　加速度の空間分布 …… 30
5．1．4　加速度振幅の時刻歴 …… 30

5．2　間隙水圧データの整理 ---- 35
5．2．1　記録波形 ---- 35
5．2．2　過剰間隙水圧の空間分布 ---- 35
5．2．3　過剰間隙水圧の時刻歴 ---- 35
5．2．4　過剰間隙水圧の深度分布 ---- 35
5．3　せん断応力の整理 ---- 41
5．3．1　せん断応力振幅の時刻歴 ---- 41
5．3．2　せん断応力の深度分布 ---- 41
5．4　過剰間隙水圧とせん断応力、せん断ひずみの関係 ---- 44
5．4．1　過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係 ---- 44
5．4．2　過剰間隙水圧とせん断応力の関係 ---- 44
5．4．3　応力－ひずみ関係 ---- 44
6．間隙水圧比と応力、ひずみの関係 ---- 50
6．1　過剰間隙水圧比、せん断応力比、せん断ひずみの経時変化 ---- 50
6．1．1　過剰間隙水圧比の経時変化 ---- 50
6．1．2　せん断応力振幅の経時変化 ---- 54
6．1．3　せん断ひずみの経時変化 ---- 58
6．2　間隙水圧の発生特性の考察 ---- 63
6．2．1　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係 ---- 63
6．2．2　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係 ---- 68
7．　間隙水圧発生モデルについて ---- 73
7．1　間隙水圧発生モデルの提案 ---- 73
7．2　今回の実験データによる検証 ---- 74
7．2．1　応力－ひずみモデル ---- 74
7．2．2　検証の手順 ---- 74
7．2．3　せん断応力の計算結果 ---- 77
7．2．4　検証結果の考察 ---- 82
7．3　実測値と既往の算定法との比較 ---- 83
7．3．1　ねじりせん断試験結果との対比 ---- 83
7．3．2　FLによる判定法との対比 ---- 83
7．3．3　石原モデルの適用 ---- 84
8．　第Ⅰ編のまとめ ---- 88
9．　第Ⅰ編の参考文献 ---- 91

第Ⅱ編　液状化地盤中の杭の水平抵抗に関する実験データの検討 ---------- 93

1．　検討を実施した振動台実験の概要 ---------- 93
1．1　実験模型と材料特性 ---------- 93
1．2　加振条件と計測方法 ---------- 93
2．　実験データの整理方法 ---------- 98
2．1　加速度データの整理 ---------- 98
2．2　間隙水圧データの整理 ---------- 99
3．　間隙水圧とせん断ひずみ関係 ---------- 100
3．1　せん断ひずみの算出方法 ---------- 100
3．2　間隙水圧比の算出方法 ---------- 102
3．3　間隙水圧比とせん断ひずみの時刻歴波形 ---------- 102
3．4　間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係 ---------- 116
3．4．1　累積せん断ひずみの定義 ---------- 116
3．4．2　間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係 ---------- 116
4．　第Ⅱ編のまとめ ---------- 123
5．　第Ⅱ編の参考文献 ---------- 124
付属資料 ---------- 125

第Ⅲ編　実地盤の強震観測データの検討 ---------- 131

1．　大井埋立地での間隙水圧観測データの検討 ---------- 131
1．1　観測地点および観測方法の概要 ---------- 131
1．2　観測記録の概要 ---------- 133
1．2．1　地震の概要 ---------- 133
1．2．2　加速度と間隙水圧記録 ---------- 133
1．3　地震応答解析によるせん断ひずみの算出 ---------- 135
1．3．1　観測使用地盤モデルと使用地盤定数 ---------- 135
1．3．2　解析結果 ---------- 136
1．4　地盤内せん断ひずみと間隙水圧比との関係 ---------- 139

2．　長柄ダムでの観測データの検討 ---------- 143
2．1　観測地点および観測方法の概要 ---------- 143
2．2　観測記録の概要 ---------- 149
2．2．1　地震の概要 ---------- 149
2．2．2　加速度記録の概要 ---------- 150
2．3　重複反射理論によるせん断ひずみの算出 ---------- 152
2．3．1　重複反射理論によるせん断ひずみの算出方法 ---------- 152
2．3．2　地盤のせん断弾性波速度 ---------- 154
2．4　累積せん断ひずみから算出した間隙水圧比 ---------- 155
3．　第Ⅲ編のまとめ ---------- 160
4．　第Ⅲ編の参考文献 ---------- 161

付属資料

1．砕石ドレーンの実験データ

第Ⅰ編　砕石ドレーンに関する実験データの検討

1．検討の目的

飽和砂地盤が地震時に液状化するかどうかを判定することは重要なことである。これまでいくつかの判定法が提案され，実際に適用されてきたが，判定は液状化するかしないかといった定性的な側面が大きいように思われる。しかし，特に液状化に対して対策を行う場合等は，液状化の程度を定量的に把握することが重要になってくる。液状化抵抗係数による判定は，ある程度定量的な判定と考えられるが，液状化が地盤内の過剰間隙水圧の上昇による抵抗力の低下と考えるならば，過剰間隙水圧の発生量を定量的に算定する方法を確立することはきわめて重要と思われる。

ここでは実地盤を想定した大型振動台実験のデータを用い，過剰間隙水圧の発生特性を検討し，間隙水圧の発生を定量的に評価するモデルを提案することを目的とする。

2．検討を行った振動台実験の概要

検討を行った実験データは昭和55年度，昭和56年度の2カ年にわたって実施された大型振動台を用いた模型実験によって得られたデータである[1]。この実験は 12m×12m の大型振動台上に高さ3.5m，長さ 12m，奥行き2m の鋼製の土槽を設置し，この中に厚さ3m の飽和した模型砂地盤を作成し，水平方向に加振して液状化させ，この時の間隙水圧挙動，砕石ドレーンの埋設構造物浮上り抑制効果などを検討する目的で行われたものである。

2．1　実験に用いた模型と材料の特性

実験に用いられた模型地盤は図－2・1・1，図－2・1・2に示すような11種類のものである。これら11種類のうち模型－1～6は昭和55年度に実施されたもので，地盤作成時のまき出し厚さが50cm，模型－7～11は昭和56年度に実施されたもので，地盤作成時のまき出し厚さは30cmである。いずれも締固めは足踏みで行って模型地盤を作成した後，模型底面より低水頭で注水して飽和させている。表－2・1・1に各模型地盤の平均密度を示す。地盤密度はコアカッタ法により測定されている。同表に一部の模型について行われた透水試験，S波速度の計測結果も合わせて示す。

模型地盤に用いられた砂は千葉県君津市付近の浅間山産の山砂である。図－2・1・3に粒度分布を示す。表－2・1・2に浅間山砂とドレーンに用いられた砕石の物理特性を示す、

砕石ドレーンは図－2・1・4に示すように幅20cmの部分に5号砕石を用いその両側に幅10cmずつの7号砕石をフィルタゾーンとして用い，透水性の確保と目詰まりの防止が図られている。

図－2・1・5に掘割道路模型の諸元を示す。鉄筋コンクリート性のますで，見かけの比重は約1.03である。

気乾試料を締固めてから注水するという模型地盤の作成過程を考慮して，過圧密比ＯＣＲ＝1.73，飽和度S_r＝60％ の低拘束圧下（σ_3'＝0.2kgf/cm^2）の繰返しねじりせん断試験により浅間山砂の液状化試験が行われている。その結果を図－2・1・6に示す。繰返し回数20回で両振幅ひずみが5％になる応力比は0.35程度である。この値は繰返し三軸試験によって得られている値よりいくぶん大きいが，これは過圧密であることおよび完全飽和でないことの影響と思われる。これらの試験結果は等方圧密した供試体に対する値でせん断応力比Ｒは等方圧密圧力σ_0'で正規化されているが模型地盤のように異方圧密されたものについてはσ_0'で正規化するよりは有効上載圧σ_v'で正規化した方が便利である。これらの換算には静止土圧係数K_0 が関係する換算係数c_r が用いられるが，ここではSeed[2]らの提案にならってc_r＝0.57 として補正した。補正後の液状化特性を図－2・1・7に示す。これらの関係を両対数紙上で直線関係に近似すると

$$\log_{10}R = -0.123 \cdot \log_{10}N_1 - 0.5287 \qquad (2.1.1)$$

と表わせる。N_1 ＝20に対するＲは0.20程度となる。

また，同じく繰返しねじりせん断試験結果から，石原モデル[3]における間隙水圧発生特性を表わす定数を求めると，$B_p' = 0.211$，$B_u' = 0.072$となる。

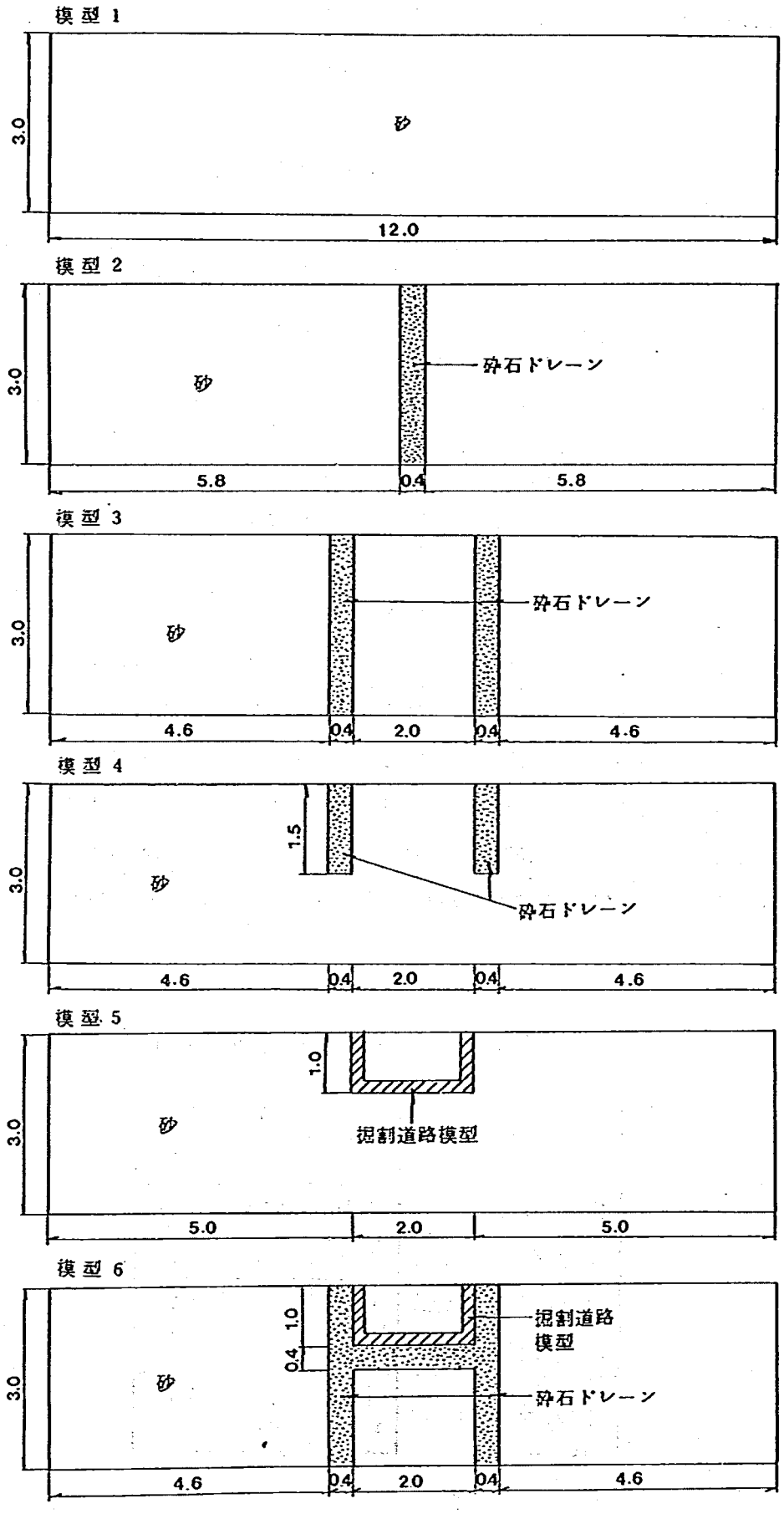
表－２・１・１ 模型地盤の土質特性

模型番号	乾燥密度 ρ_d (g/cm³)	湿潤密度 ρ_t (g/cm³)	間隙比 e	相対密度 D_r (%)	鉛直方向透水係数 k_V (cm/s)	水平方向透水係数 k_H (cm/s)	飽和度 S_r 注1) (%)	S波速度 V_s 注2) (m/s)
1	1.46	1.92	0.868	42.6	－	－	－	－
2	1.44	1.91	0.888	39.6	15.74×10^{-3}	9.92×10^{-3}	－	－
3	1.45	1.92	0.875	40.6	－	－	－	－
4	1.49	1.94	0.821	54.6	7.90×10^{-3}	－	－	－
5	1.47	1.93	0.850	47.2	－	－	－	－
6	1.48	1.93	0.841	49.5	－	－	－	－
7	1.47	1.93	0.855	45.9	7.60×10^{-3}	10.87×10^{-3}	92.5	89
8	1.45	1.92	0.874	41.1	11.97×10^{-3}	8.54×10^{-3}	－	95
9	1.45	1.92	0.874	41.1	13.59×10^{-3}	11.88×10^{-3}	92.8	86
10	1.44	1.91	0.884	38.6	9.62×10^{-3}	11.10×10^{-3}	－	91
11	1.44	1.91	0.890	37.1	12.34×10^{-3}	10.30×10^{-3}	－	83

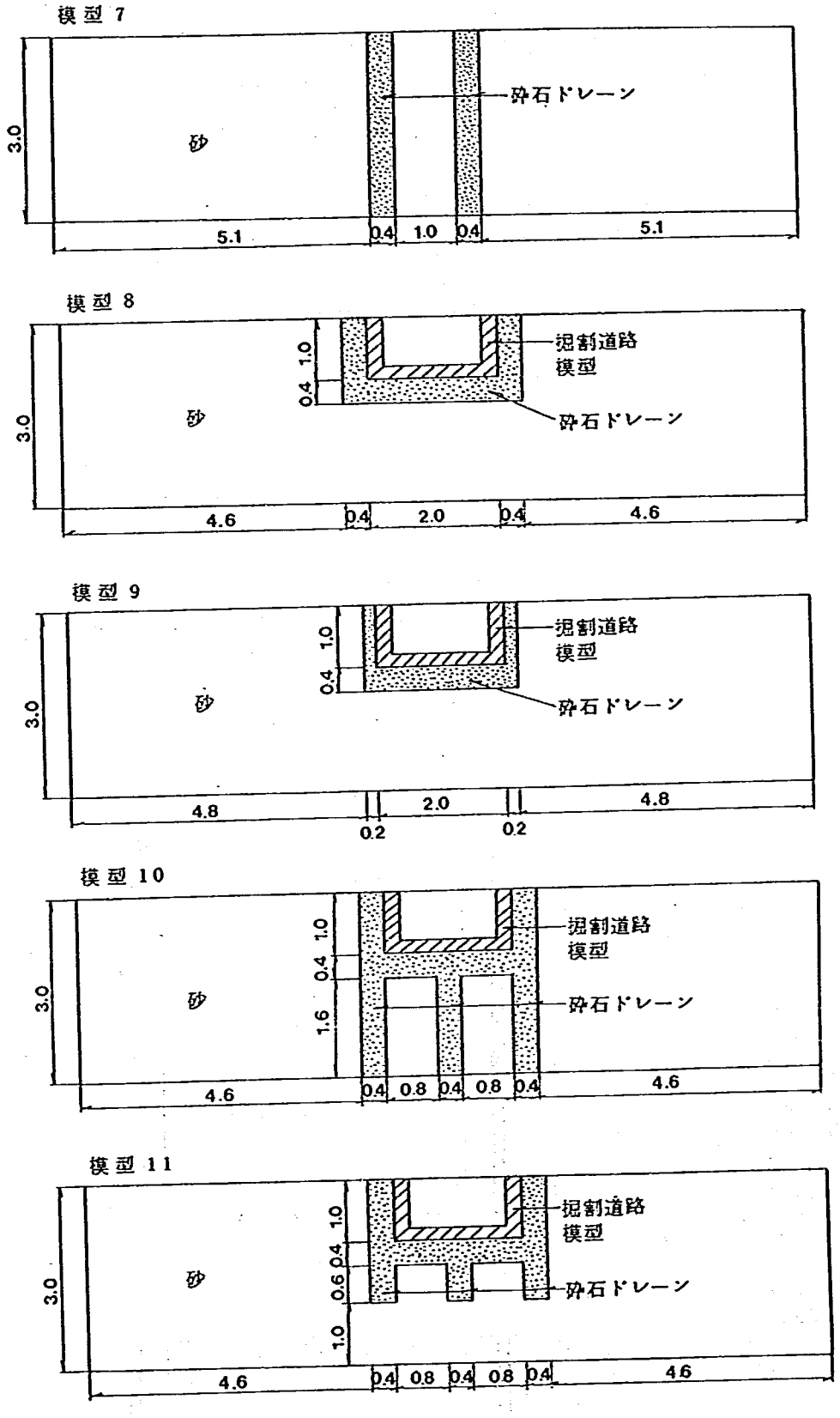
注1) S_rはサンドサンプリングによる試料の実測の平均値　　注2) V_sは板たたき法による実測値

表－２・１・２　浅間山および砕石の物理特性

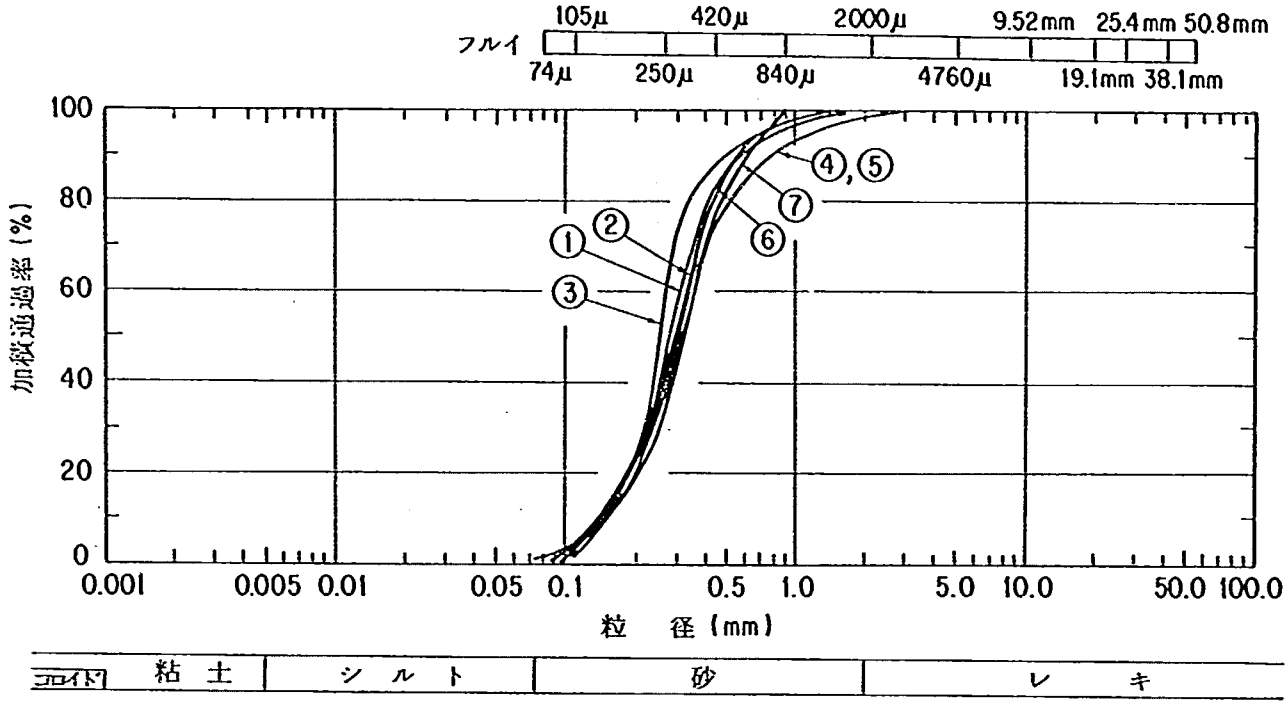
	砂	砕石	
		5号	7号
比　重 G_s	2.73	2.69	2.69
最大粒径 (mm)	4.76	39	9.5
平均粒径 D_{50} (mm)	0.28	22	3.3
均等係数 U_c	2.91		
透水係数 k (cm/s)	1.18×10^{-2}	6.1×10	5.79



図－２・１・１　実験に用いた模型（模型－１～６，単位；ｍ）

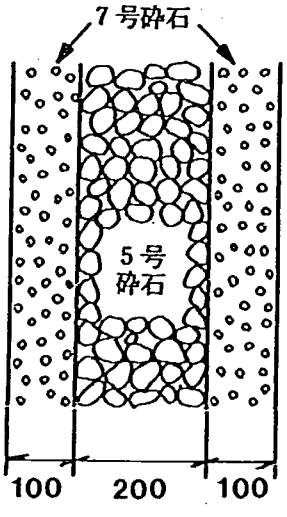


図－2・1・2　実験に用いた模型（模型－7～11，単位；m）



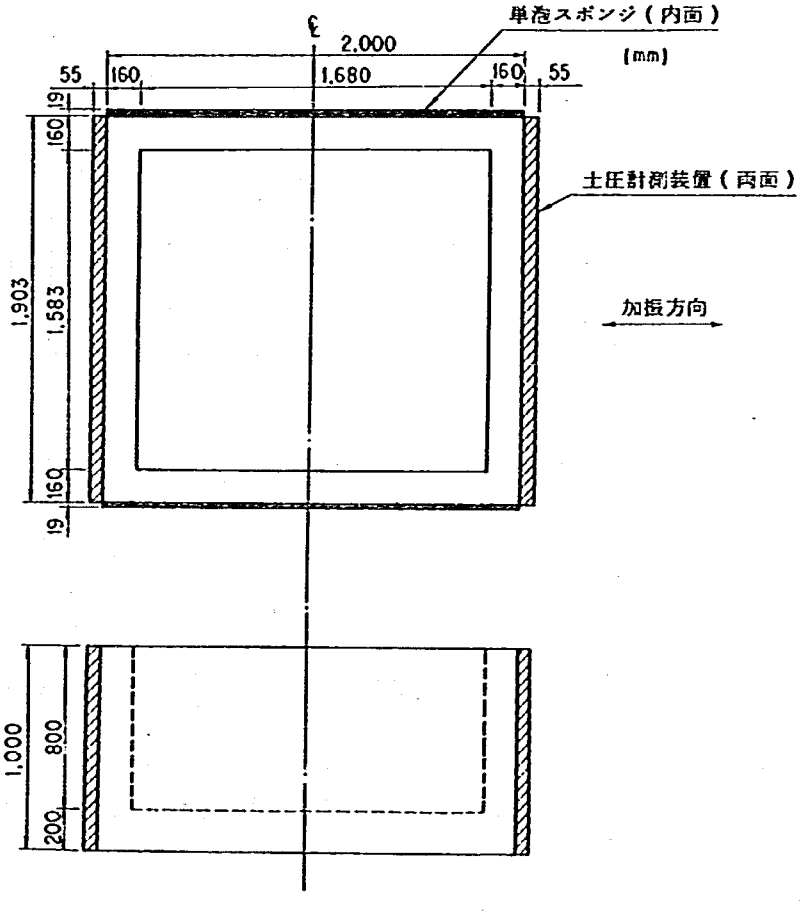
粒径加積曲線　　①～③ 55年度試験
④～⑦ 56年度試験

図－2・1・3　浅間山砂の粒度分布

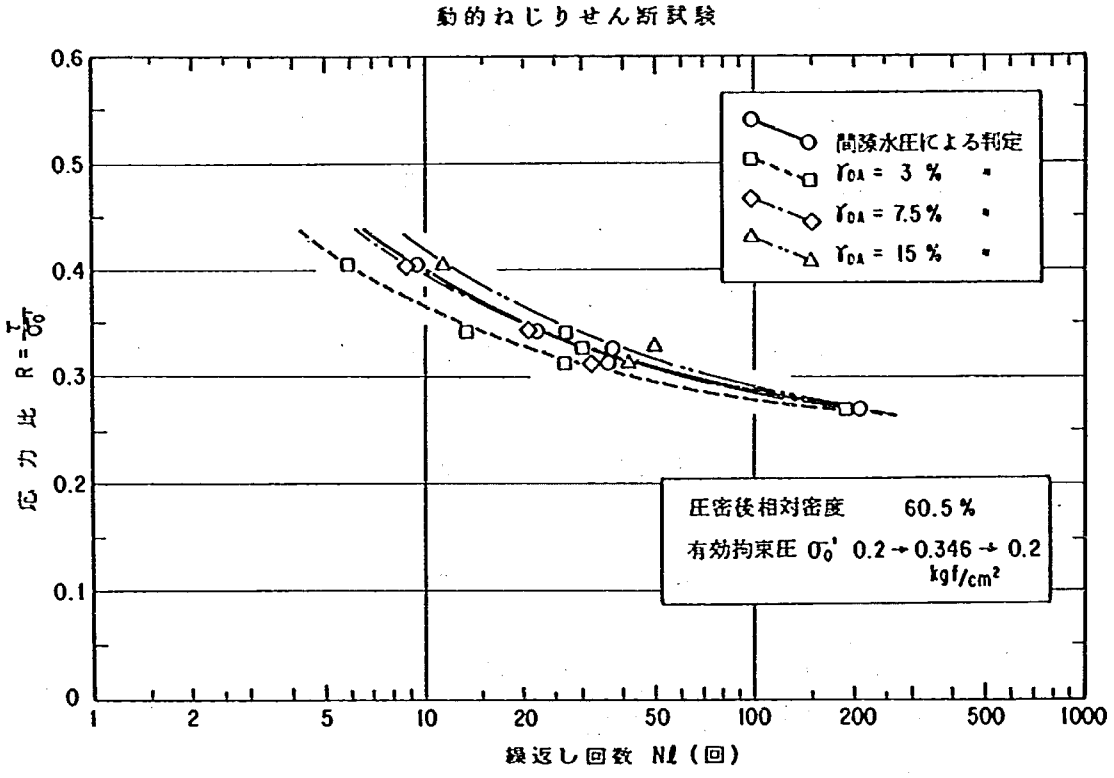


（単位；㎜）

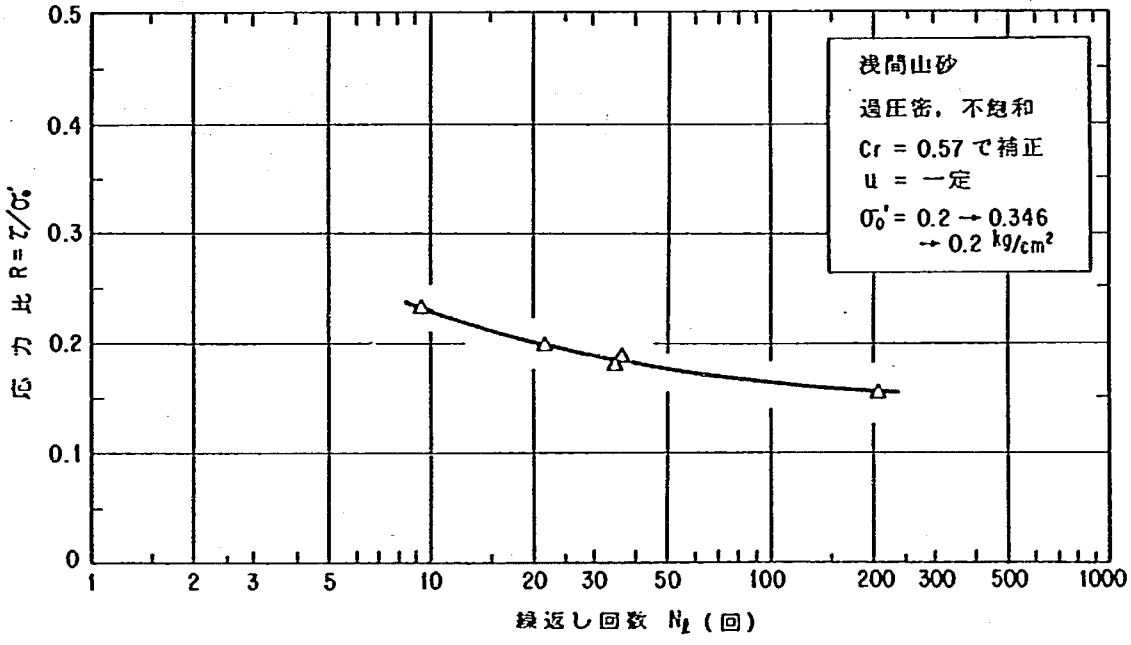
図－2・1・4 模型に用いた砕石ドレーン断面



図－2・1・5　掘割道路模型の諸元



図－２・１・６　浅間山砂の液状化特性



図－２・１・７　補正後の液状化特性

2．2　加振条件と計測方法

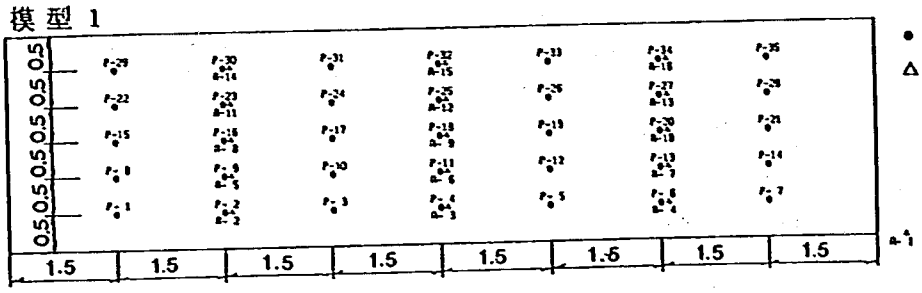
加振方向は模型の長手方向で水平方向のみである。昭和55年度に実施された模型－１～６については加振周波数５Hz，加振継続時間60秒，加振加速度は正弦波で振幅は200galである。同じく昭和56年度に実施された模型－７～11については加振周波数２Hz，加振継続時間30秒，加速度振幅は150galである。

図－２・２・１，図－２・２・２に各模型ごとの計測器の配置を示す。計測項目は振動台，掘割道路模型および地盤内の加速度（加速度計15～17個），地盤内の過剰間隙水圧（間隙水圧計35～40個），地表面および掘割道路模型の沈下，浮上り量（変位計０～２個）と掘割道路模型に作用する土圧（土圧計０～２個）である。計測器の諸元を表－２・２・１に示す。

表－２・２・１ 計測器の諸元

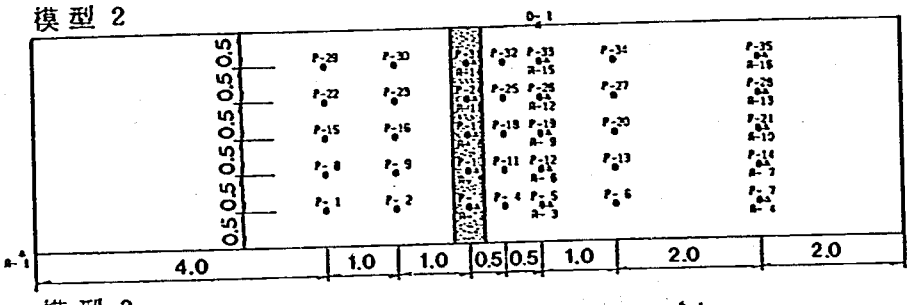
計測器	形　式	容　量	精　度	周波数特性	寸　法	備　考
間隙水圧計	BP-2KB	2 kg/cm²	2 %FS	DC～50 Hz	φ30×55.5mm	ひずみゲージ式
	BP-1KCs	1 〃	〃	〃	φ20×40 mm	ポーラスメタルメッシュ100μ
	BP-0.5KCs	0.5 〃	〃	〃	〃	
加速度計	AS-2GA	2 G	1 %FS	DC～60 Hz	20×40×23mm	ひずみゲージ式
	AS-1GA	1 G	〃	DC～40 Hz	〃	振動台、道路模型、地盤加速度
荷重計	TR-202	2 t	0.5%FS	DC～2000Hz	φ50×25 mm	ひずみゲージ式 道路模型に作用する土圧計測
変位計	DLT-100A	±100 mm	0.5%FS	DC～50 Hz	φ42×600 mm	差動変圧式
	LR-19	－	－	－	－	摺動抵抗式 地盤、道路模型変位

模型 1



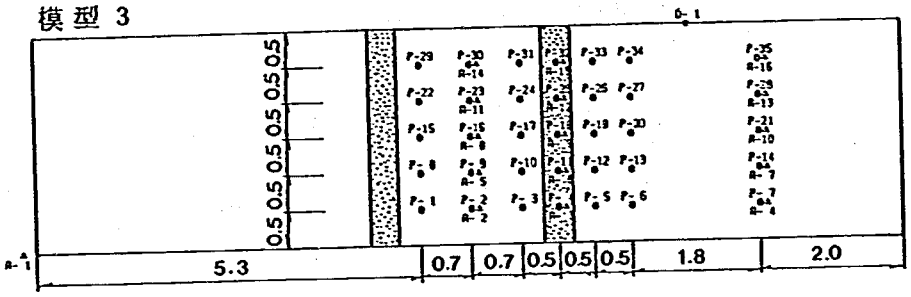
• 間隙水圧計 （３５）
△ 加速度計 （１６）

模型 2



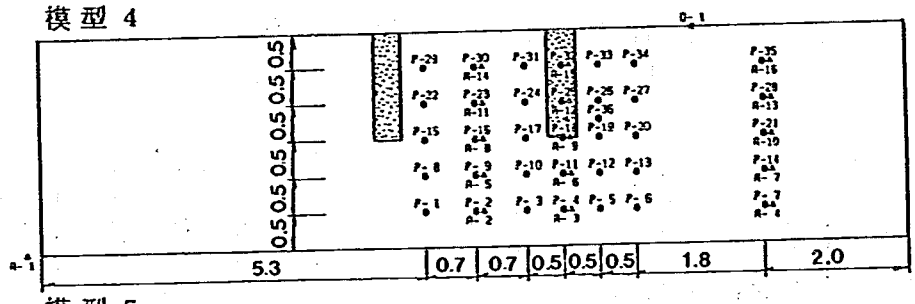
• 間隙水圧計 （３５）
△ 加速度計 （１６）
× 変位計 （１）

模型 3



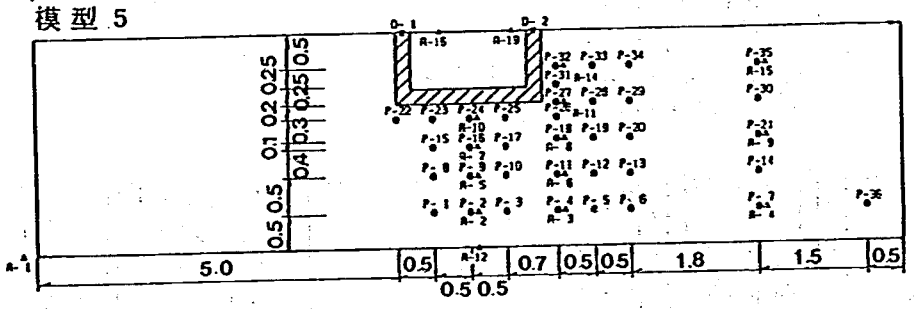
• 間隙水圧計 （３５）
△ 加速度計 （１６）
× 変位計 （１）

模型 4



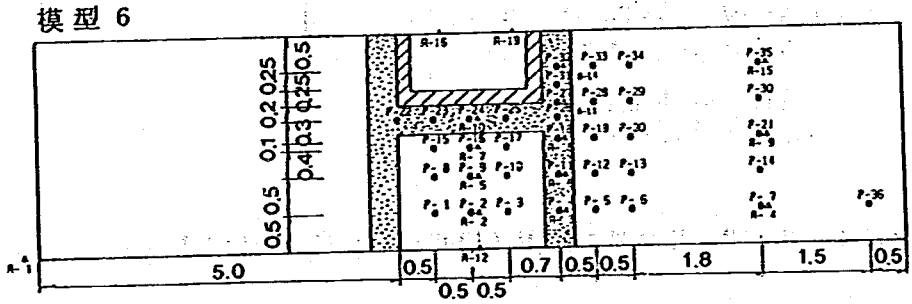
• 間隙水圧計 （３６）
△ 加速度計 （１６）
× 変位計 （１）

模型 5



• 間隙水圧計 （３６）
△ 加速度計 （１６）
× 変位計 （２）

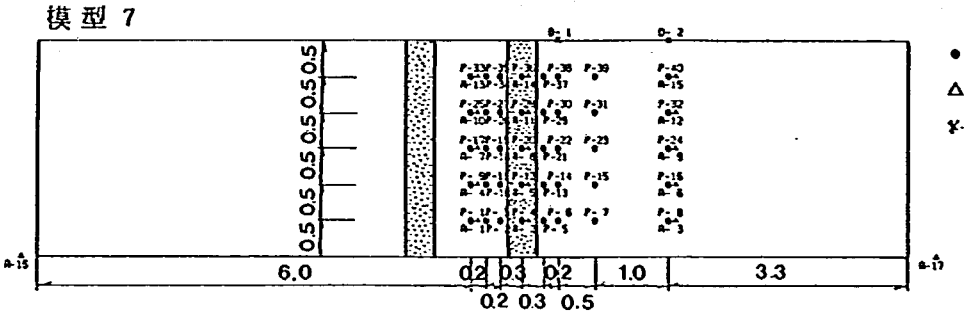
模型 6



• 間隙水圧計 （３６）
△ 加速度計 （１６）

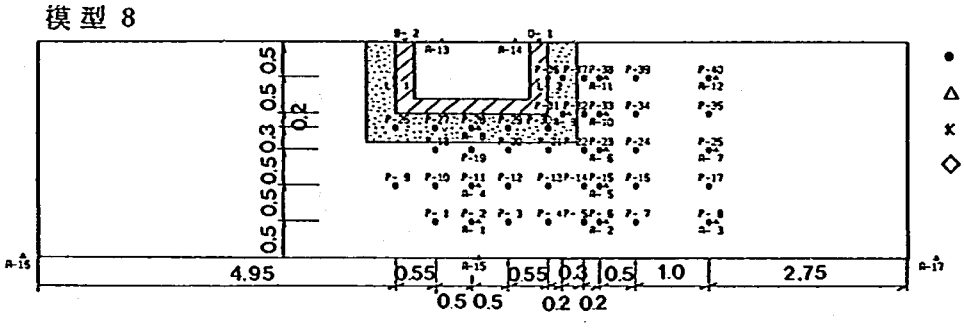
図－２・２・１ 計測器の配置（模型－１～６，単位；m）

模型 7



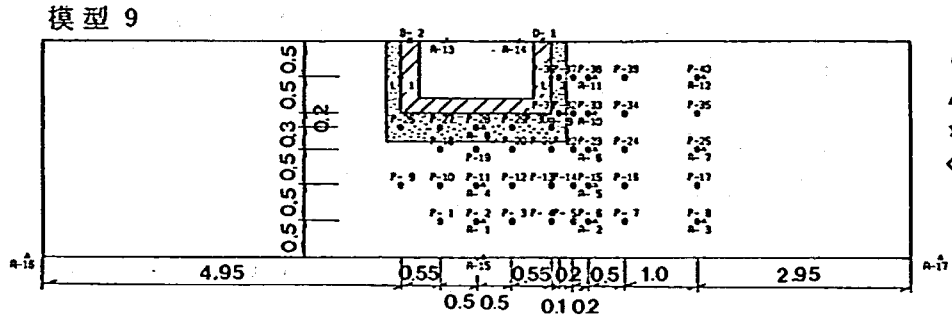
• 間隙水圧計 （４０）
△ 加速度計 （１７）
× 変位計 （２）

模型 8



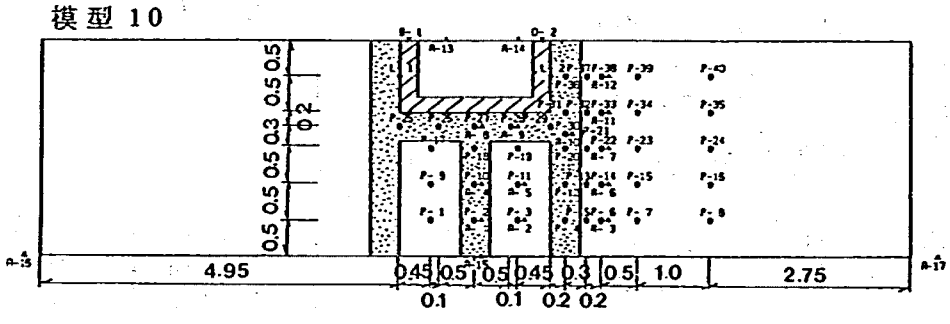
• 間隙水圧計 （４０）
△ 加速度計 （１７）
× 変位計 （２）
◇ 土圧計 （２）

模型 9



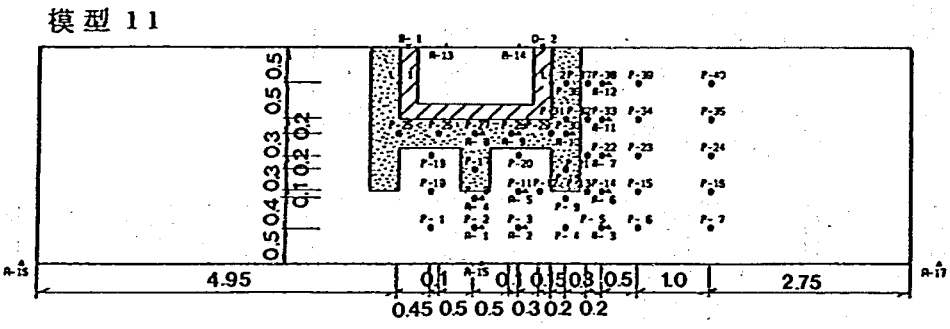
• 間隙水圧計 （４０）
△ 加速度計 （１７）
× 変位計 （２）
◇ 土圧計 （２）

模型 10



• 間隙水圧計 （４０）
△ 加速度計 （１７）
× 変位計 （２）
◇ 土圧計 （２）

模型 11



• 間隙水圧計 （４０）
△ 加速度計 （１７）
× 変位計 （２）
◇ 土圧計 （２）

図－２・２・２ 計測器の配置（模型－７～11、単位；m）

３．せん断ひずみの計算方法

３．１　加速度記録の補正

加速度から変位を計算したり，せん断応力を求めようとする場合，記録された加速度には，主に加速度計の傾斜に起因すると思われる成分が存在するので，これを取り除くことが必要になる。

補正前の加速度波形の一例を図－３・１・１に示す。地盤内の応答加速度は，加振後半部で振幅の中心が基線からずれているのがわかる。

３．１．１　フーリエ変換における補正

記録された加速度波形のフーリエスペクトルの一例を図－３・１・２に示す。加振振動数である５Hzのところに大きなピークがあり，その整数倍である10Hz，15Hz，20Hzにピークがあるほか，振動数ゼロ（線形項）にも一つのピークが現れている。この４Hz以下の長周期成分をカットするハイパスフィルタをかけて補正した加速度波形を加振直後の部分を拡大し，補正前の加速度波形と比較して図－３・１・３に示す。

加振直後は加速度計の傾斜も小さく，全体の補正効果は読み取れないが，加振開始時点の波形の立上りがうまく補正できておらず，補正後の波形では加振前から振動が生じていることになる。

３．１．２　直接数値積分における補正

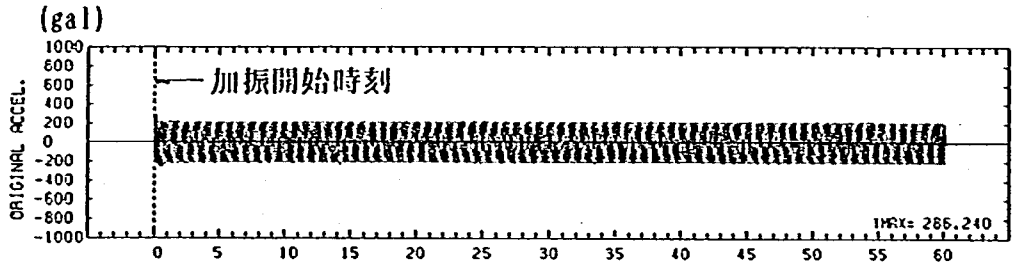
補正すべき成分が，加速度計の傾斜による重力加速度ｇの混入であると考えると，水平面からθだけ加速度計が傾斜すれば，記録される加速度αは，

$$\alpha = \alpha_h \cdot \cos\theta + g \cdot \sin\theta \qquad (3.1.1)$$

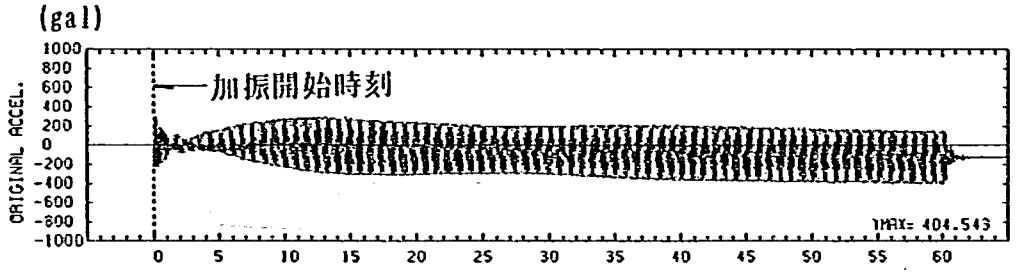
で表わされる。ここに，α_hは水平方向に作用する加速度で，$g \cdot \sin\theta$は基線からの補正量である。いま，この補正量をα_Hとすると，水平方向加速度α_hは，

$$\alpha_h = \frac{\alpha - \alpha_H}{\sqrt{\{1 - (\alpha_H/g)^2\}}} \qquad (3.1.2)$$

で求められる。この補正量α_Hを１波ごと（データ個数はサンプリング周波数／加振周波数）に求めていく手法を用いている（APPENDIX－１参照）。この方法で補正した加速度波形の加振直後の拡大図を補正前の加速度波形と比較して図－３・１・４に示す。１波ごとに補正量α_Hが異なり，補正量自体には段差が生じるが，その変化は大きくなく，波形の顕著な乱れは生じていない。立上り部は原波形をほとんどくずしておらず，ハイパスフィルタによる補正に比較してうまく補正できていると考えられる。

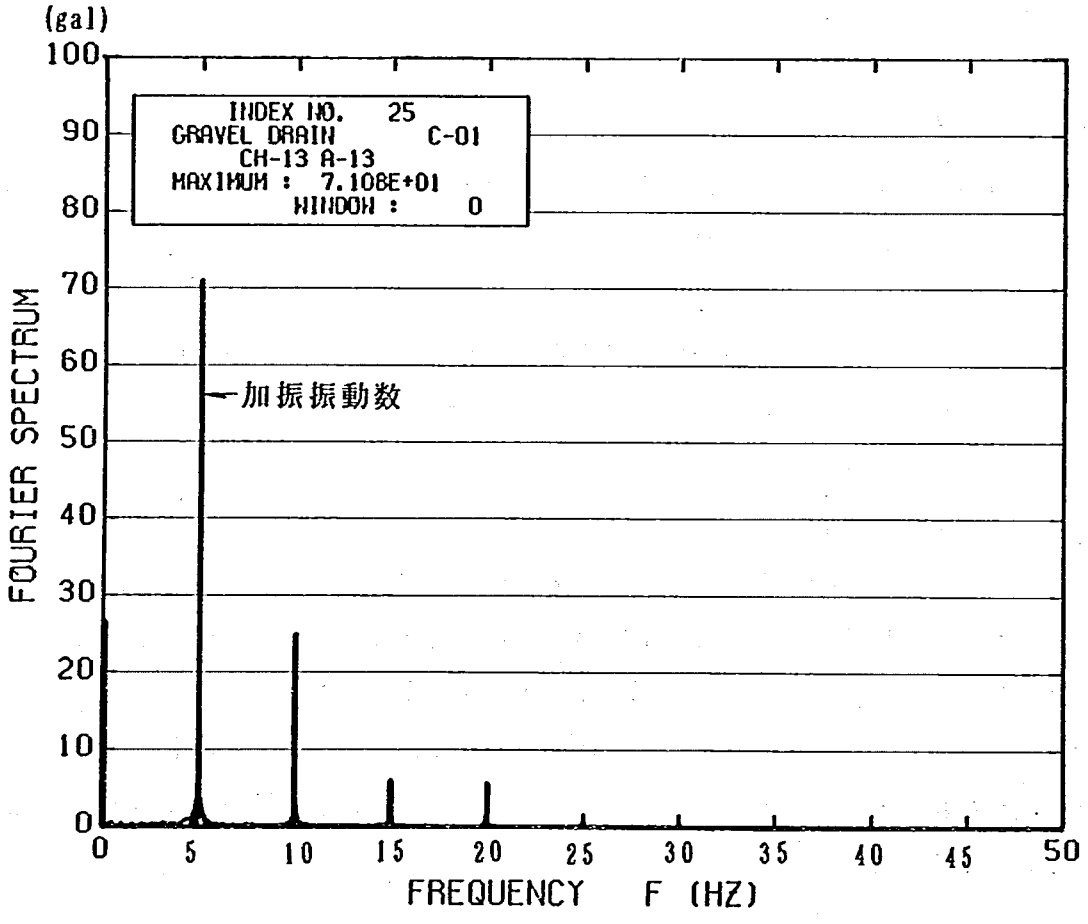


（ａ）振動台の入力加速度（模型－１　Ａ－１）

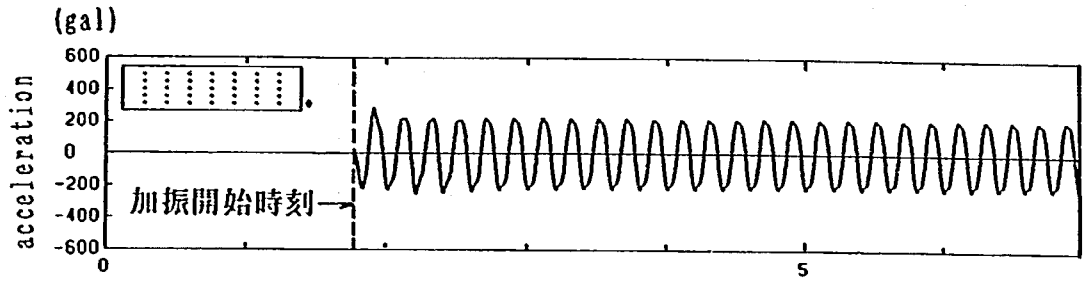


（ｂ）地盤内の応答加速度（模型－１　Ａ－13）

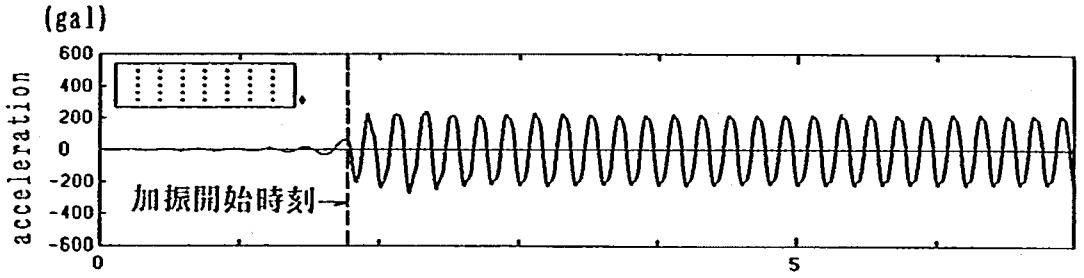
図－３・１・１　補正前の加速度波形



図－３・１・２　補正前の加速度フーリエスペクトル（模型－１　Ａ－13）

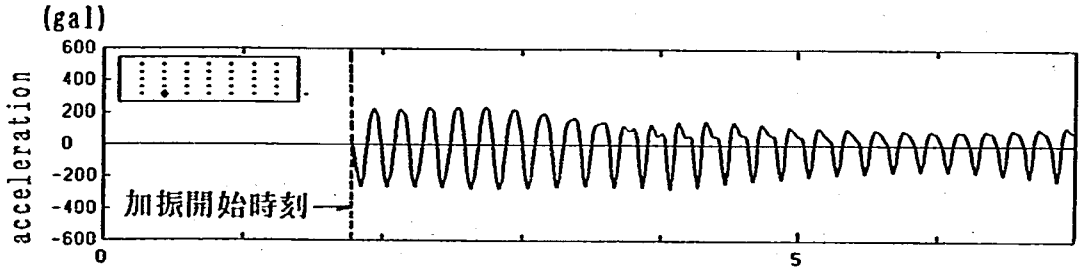


（ａ）補正前の加速度波形（加振開始直後、模型－１　Ａ－１）

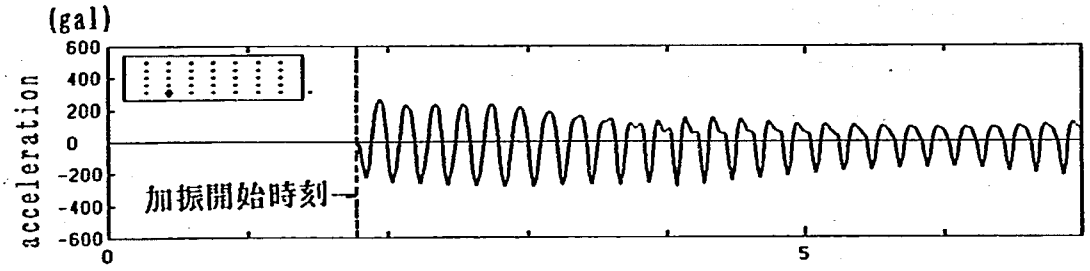


（ｂ）補正後の加速度波形（加振開始直後、模型－１　Ａ－１）

図－３・１・３　ハイバスフィルタによる加速度記録の補正



（ａ）補正前の加速度波形（加振開始直後、模型－１　Ａ－２）



（ｂ）補正後の加速度波形（加振開始直後、模型－１　Ａ－２）

図－３・１・４　１波ごとの基線補正による加速度記録の補正

３．２　数値積分による変位の計算

補正前の加速度記録から，フーリエ積分あるいは直接数値積分して変位波形を求めると図－３・２・１，図－３・２・２のようになる。但し，フーリエ積分の場合は定数項のみを無視している。いずれも，きわめて大きな変位値あるいは長周期成分が現われて，ほとんど無意味なものとなっている。

３．２．１　フーリエ積分による変位の計算

加振振動数よりも長周期成分をカットするハイパスフィルタによる補正を行った加速度を周波数領域で積分して求めた変位波形の加振直後の拡大図を図－３・２・３に示す。加速度の場合と同様に，加振前から振動が生じている。

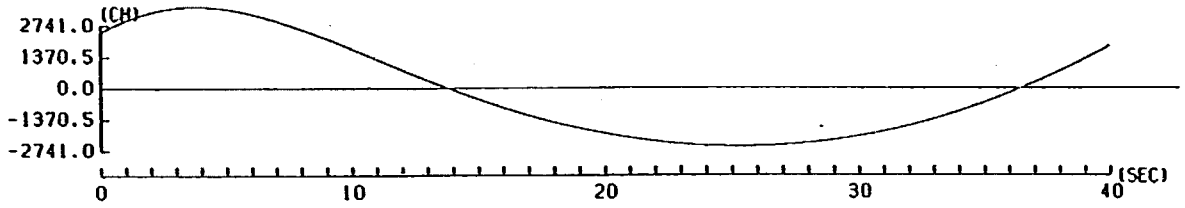
このように，比較的急激な立上りを示す加速度の補正方法としてハイパスフィルタを用いるのは不適当であると考えられる。

３．２．２　直接数値積分による変位の計算

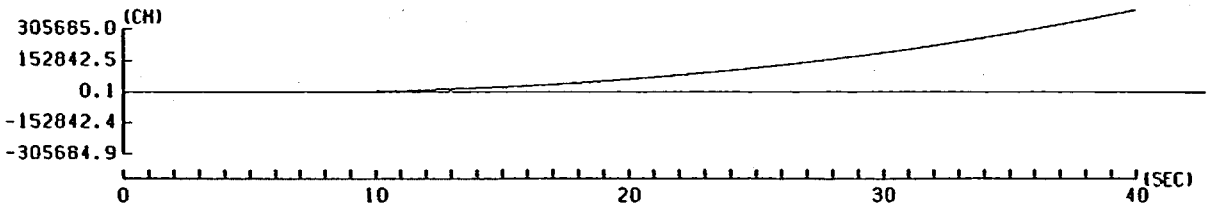
１波ごとに補正した加速度から直接数値積分によって変位を計算する。測定時刻間の加速度の変化は直線的であると仮定している。変位までは，速度を介して２回の積分を要するが，１回積分した速度の段階で，おもにデータサンプリング周波数と加振周波数が厳密には整数倍でないことに起因すると思われる周期成分が現われるので，この段階でも加速度の補正と同様の補正を行っている。

直接数値積分によって求めた変位波形の加振直後の拡大図を図－３・２・４に示す。地盤上部で振動台の入力加速度と位相差が生じる場合には加振開始までの（計算上の）初期速度の影響が現われるほか，１波目と２波目の間での補正量の差が大きいことによる乱れが生じているが，全体に及ぼす影響は小さいと考えられる。

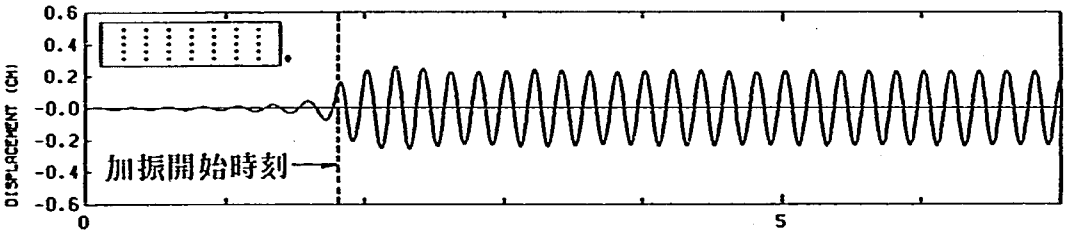
上記の検討から，計算変位としては，加速度の原記録を１波ごとに基線補正し，直接数値積分で求めたものを用いることとする。



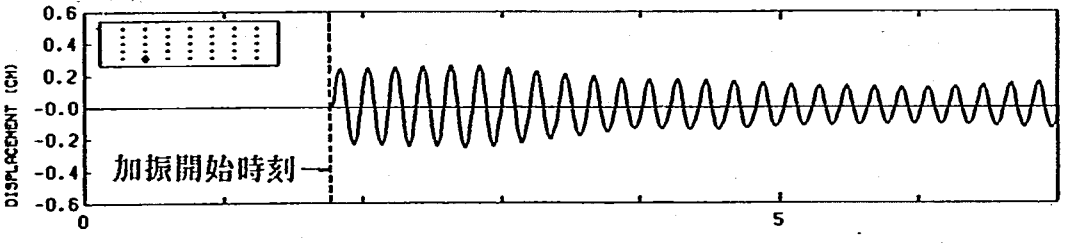
図－３・２・１　補正前の加速度のフーリエ積分による変位波形（模型－５　Ａ－２）



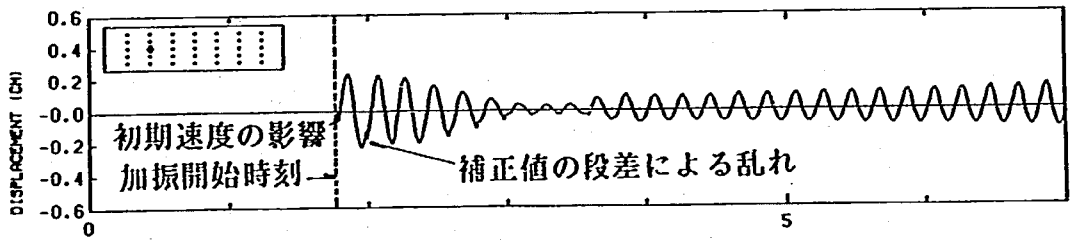
図－３・２・２　補正前の加速度の直接数値積分による変位波形（模型－５　Ａ－６）



図－３・２・３　ハイパスフィルタによる補正後の加速度のフーリエ積分による変位波形
（加振開始直後，模型－１　Ａ－１）



（ａ）振動台との位相差が小さい場合（模型－１　Ａ－２）



（ｂ）振動台との位相差が大きい場合（模型－１　Ａ－８）

図－３・２・４　１波ごとの基線補正による補正後の加速度の直接数値積分による
変位波形（加振開始直後）

3．3　せん断ひずみ

せん断ひずみγは

$$\gamma = \frac{dy}{dz} \qquad (3.3.1)$$

で求められる。ここに，yは水平方向変位，zは深さである。したがって水平方向変位の深さ方向の分布がわかれば，その勾配からせん断ひずみを算定することができる。

いま，せん断ひずみを求めたい点を中心に，上下それぞれ1点ずつ計3点の変位（加速度より直接数値積分によって求めたもの）を取り出し，それぞれの変位を上から順にy_1，y_2，y_3とし，それぞれの位置の深さをz_1，z_2，z_3とする（図－3・3・1参照）。変位の分布が深さの2次関数

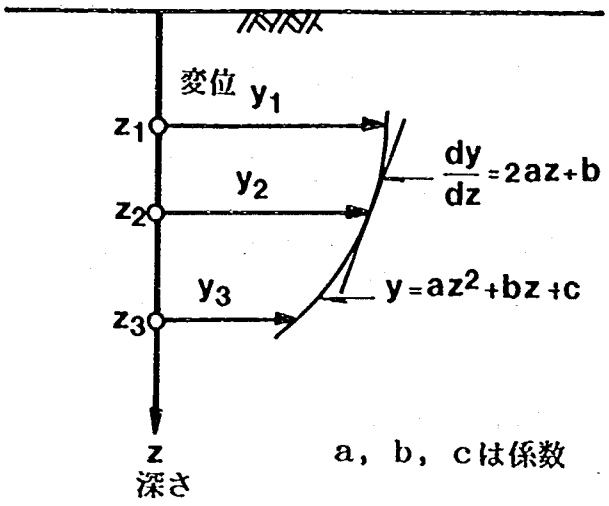
$$y = a z^2 + b z + c \qquad (3.3.2)$$

で表わされるものとすれば，3点の値を代入することによって，係数a，b，cを算定することができる。せん断ひずみは

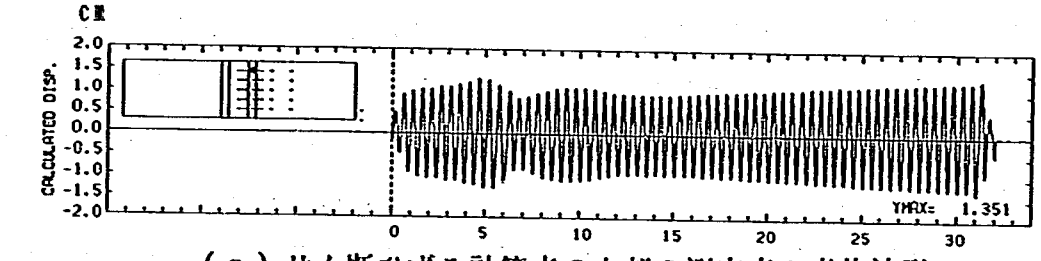
$$\gamma = \frac{dy}{dz} = 2 a z + b \qquad (3.3.3)$$

より求められ，求めたい点の座標z_2を代入すればγが算定できる。測定点のうち，最上部および最下部については隣接する2点間の相対変位を2点間の距離で除して求めている。なお，地表面におけるせん断ひずみゼロの条件は課していない。

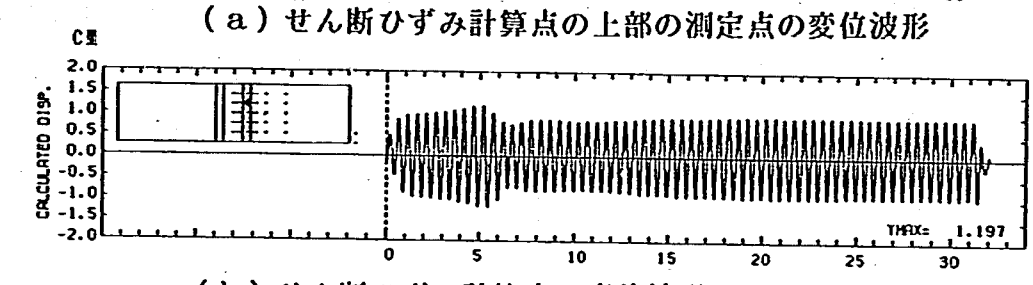
図－3・3・2に用いた3点の変位の時刻歴波形と上記の方法で求めたせん断ひずみの時刻歴波形を示す。必ずしも求めたい点の変位振幅に比例しておらず，相対変位あるいは位相差といったものが影響し，初期に剛性が高くせん断ひずみが小さかったものが液状化の進行につれて剛性が低下し，せん断ひずみが増大するようすが表われている。



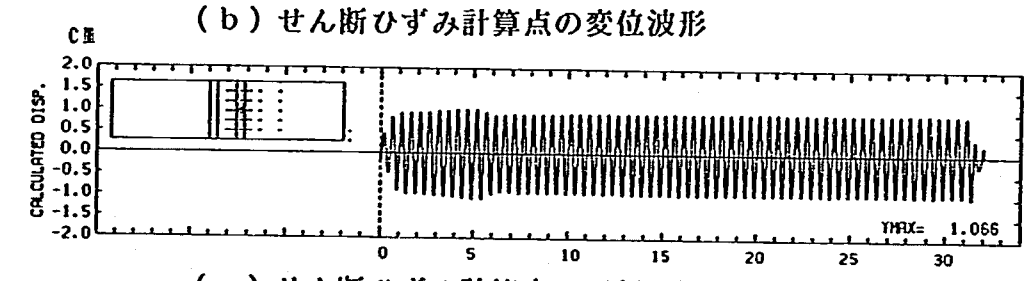
図－３・３・１　せん断ひずみの計算方法



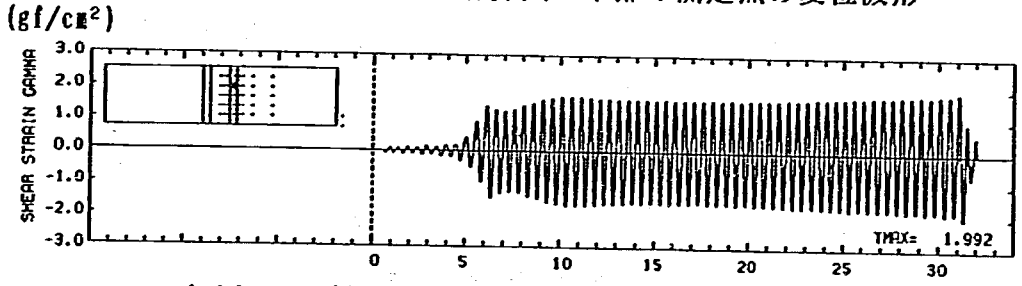
（ａ）せん断ひずみ計算点の上部の測定点の変位波形



（ｂ）せん断ひずみ計算点の変位波形



（ｃ）せん断ひずみ計算点の下部の測定点の変位波形



（ｄ）せん断ひずみの計算結果

図－３・３・２　せん断ひずみの時刻歴波形（模型－７）

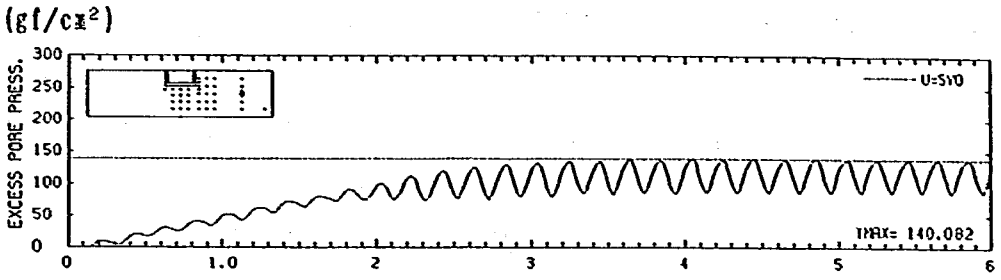
３．４　過剰間隙水圧の整理

加振中に発生する過剰間隙水圧は間隙水圧計により測定されている。加振直後の測定例を図－３・４・１に示す。

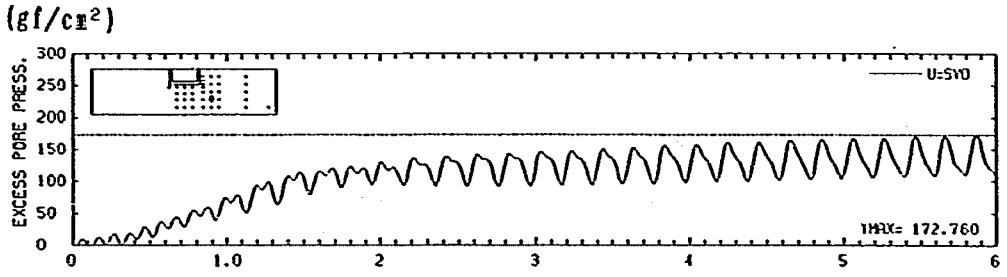
過剰間隙水圧は理論的には有効上載圧以上には上昇しないが，実測されたデータの最大値は有効上載圧以上の値を示すものが多い。また，過剰間隙水圧がせん断応力の振動的な載荷によって変動する場合，せん断応力のプラス側とマイナス側で２回，つまり加振周波数の２倍の周波数で振動することになる。

実際，過剰間隙水圧の上昇過程で，一部に２倍の周波数の振動成分が現われているものもあるが（図－３・４・１(b)）その場合の振幅はそれほど大きくなく，液状化がある程度進行すると加振振動数に一致した振動となりその振幅も大きくなる。図－３・４・１に示した例は加振振動数５Hzの例である。

このような振動成分を有する過剰間隙水圧データの整理方法として，１波ごとの移動平均（スムージング）をとることとする。すなわち，ある測定時刻のデータをその時刻を中心とする前後1/2 波分づつのデータの平均値として設定する方法を用いた（APPENDIX－２参照）。この方法では加振周波数の２倍の周波数で振動する成分は無視されることになるが，巨視的な過剰間隙水圧の上昇をみる上では都合がよい。スムージングによって得られた過剰間隙水圧の時刻歴波形を図－３・４・２に示す。スムージングを行わない場合は加振後半部では有効上載圧（図中に破線で示す）を超えて振動しているのが，スムージングによって滑らかな上昇曲線を描き，徐々に有効上載圧にまで達するようすがわかる。

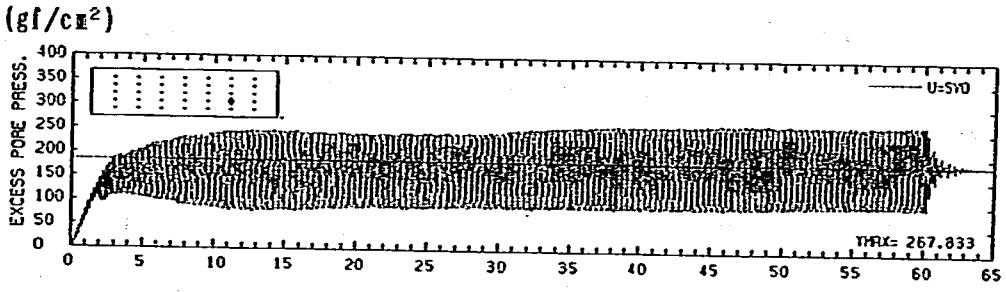


（ａ）加振振動数と同じ振動数で変動する例（模型－５　Ｐ－21）

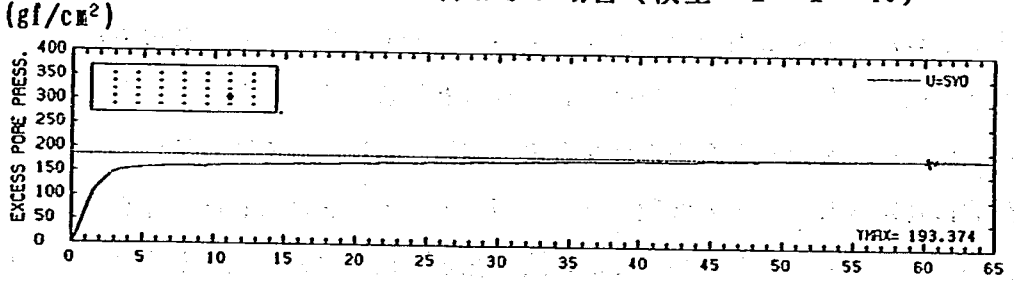


（ｂ）加振振動数の２倍の振動数で変動する成分がある例（模型－５　Ｐ－12）

図－３・４・１　過剰間隙水圧の測定結果



（ａ）スムージングを行わない場合（模型－１　Ｐ－13）



（ｂ）スムージングを行った場合（模型－１　Ｐ－13）

図－３・４・２　スムージングによる過剰間隙水圧の整理結果

4．せん断応力の計算方法

地盤内の過剰間隙水圧の上昇と最も密接な関係にあると考えられるファクタの一つは，せん断応力振幅である。振動台実験では過剰間隙水圧は直接計測されるが，せん断応力は直接計測されることがないため，何らかの方法で求めることが必要になる。ここでは，せん断応力を算定する方法として，加速度に質量を乗じて求める方法と，3．で示した方法によって求めたせん断ひずみに剛性を乗じて求める方法の2種類について検討した。

4．1　加速度から求めるせん断応力

地盤を剛体とみなした場合，深さzにおける地中のせん断応力は，地表面における加速度αを用いて

$$\tau = \frac{\alpha}{g} \cdot \sigma_v \qquad (4.1.1)$$

で計算される。ここに，gは重力加速度，σ_vは深さzにおける鉛直全応力である。しかし，一般に地盤は剛体ではないため，低減係数r_dを乗ずることが行われる。

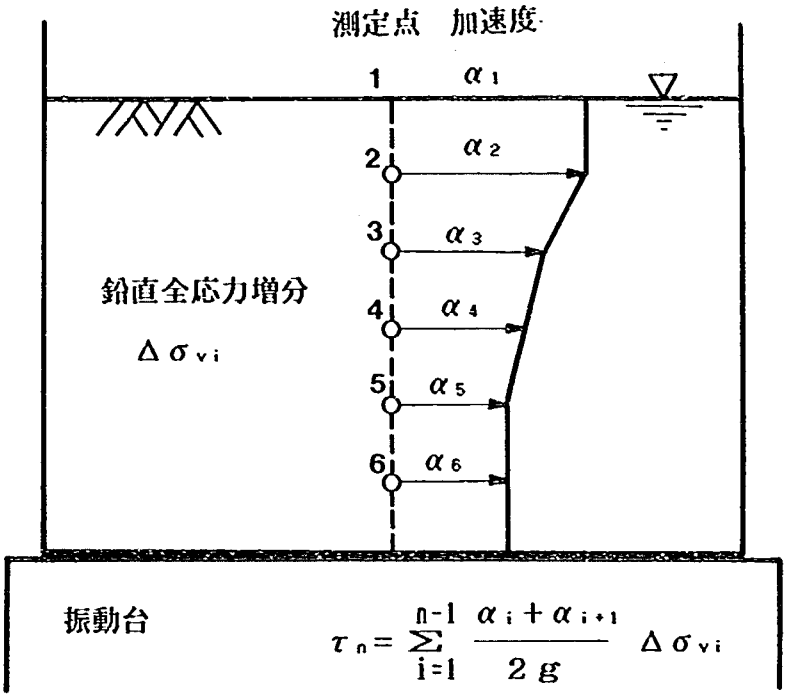
振動台を用いた実験では，地表面だけでなく地中においても加速度記録が得られているので，これらを用いてせん断応力を求めることとする[4)]。

いま，地表から順に測定点を1，2，……，nとし，それぞれの測定点における加速度をα_1，α_2，……，α_nとする。測定点iから測定点i+1の間の鉛直全応力増分を$\Delta\sigma_{vi}$として，点nにおけるせん断応力τ_nを

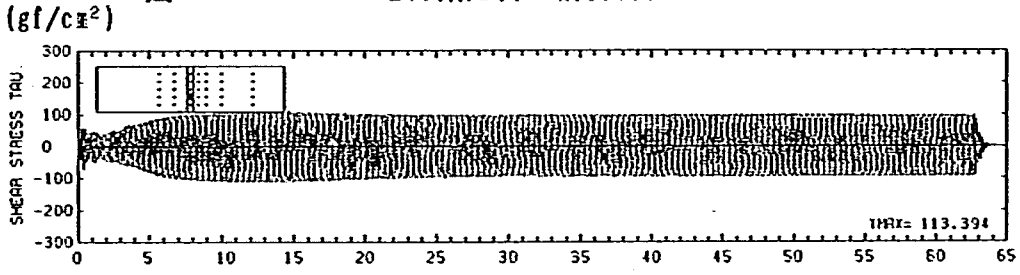
$$\tau_n = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\alpha_i + \alpha_{i+1}}{2g} \Delta\sigma_{vi} \qquad (4.1.2)$$

により計算する（図－4・1・1参照）。

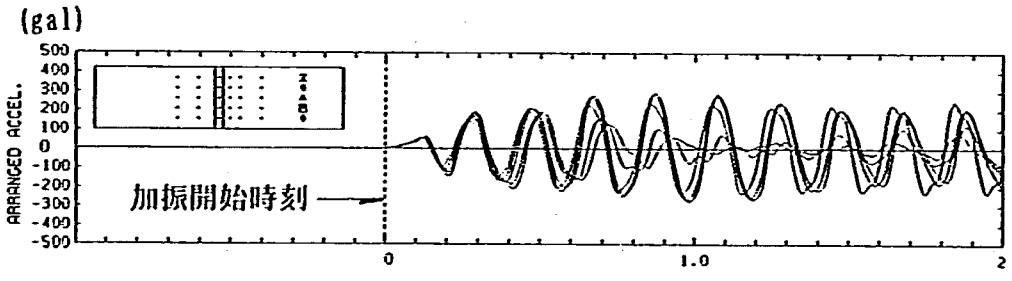
上記の方法で求めたせん断応力の時刻歴波形を図－4・1・2に示す。この方法によれば，各測定点の加速度に位相差があればそれを反映したものとなる。すなわち，せん断応力のピークは必ずしも加速度のピークを連ねたものとはならず，地盤の剛性（せん断波速度）に応じた低減係数r_dが自動的に設定されるものと解釈できる。図－4・1・2によれば，加振直後に比較的大きな応力振幅があり，その後一度減少してから液状化後も徐々に応力振幅が大きくなる傾向を示している。このことは液状化後はせん断剛性が低下しせん断応力振幅が小さくなるといわれている一般的傾向とは異なっている。この理由を検討するために，鉛直方向同列の加速度記録の加振直後および液状化後の一部分の拡大図を図－4・1・3に示す。これによれば，加振直後は各測定点間に加速度の位相差があり，せん断波の鉛直上方への伝播が読み取れるが，液状化後は各測定点が同位相になり，もはやせん断波の伝播とは見なせないと考えられる。液状化後のこのような動きはむしろ流体の波動的な運動と解釈できる。これには土槽の側方拘束の影響が大きく現わ



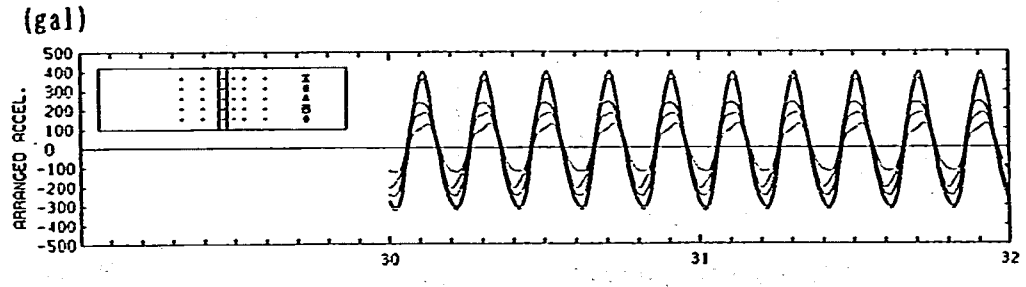
図－４・１・１　せん断応力の計算方法



図－４・１・２　加速度から求めたせん断応力波形（模型－１）



（ａ）加振直後（０～２秒）

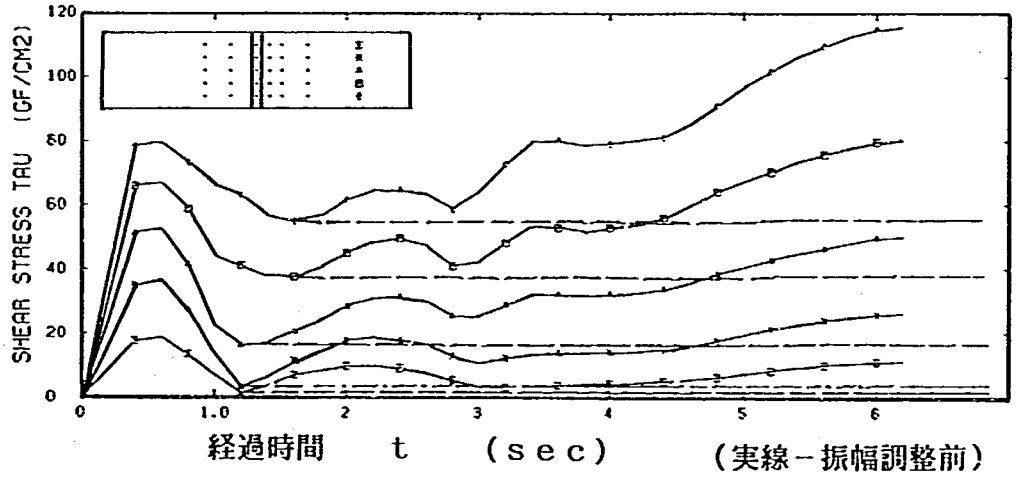


（ｂ）液状化後（３０～３２秒）

図－４・１・３　鉛直方向の加速度波形（模型－２　砂地盤部）

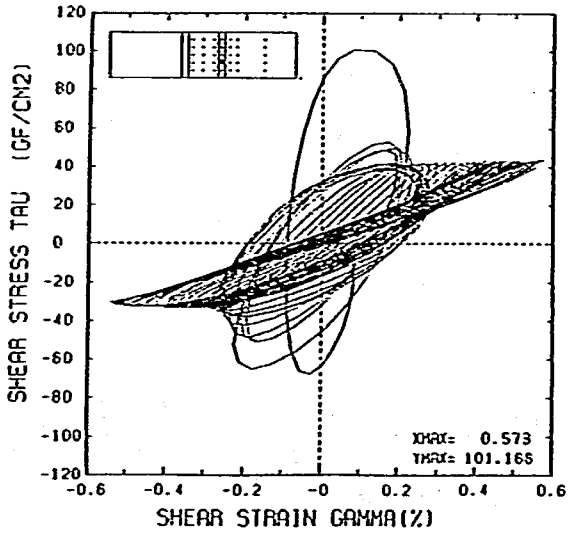
れていると考えられる。したがって，せん断応力が一度減少してからの増大分については以降の検討では無視する（以後振幅調整という）こととした。せん断応力振幅の時刻歴を図－４・１・４に示す。図中の破線が振幅調整後のせん断応力振幅である。

図－４・１・５に振幅調整後のせん断応力と３．の方法で求めたせん断ひずみの関係の一例を示す。同図(ａ)は過剰間隙水圧の発生が小さい砕石ドレーン内の応力－ひずみ関係であるが，せん断応力振幅はあまり変化しないがひずみ振幅が徐々に大きくなっている。同図(ｂ)は過剰間隙水圧の発生が大きい砂地盤部で，履歴減衰のループがきわめて大きく，途中で骨格曲線の傾きが負になっている。全体としてばらつきも大きく，これらの応力－ひずみ関係からせん断弾性係数Ｇを算定したり，そのひずみ依存性，拘束圧依存性などを検討することは困難であると考えられる。

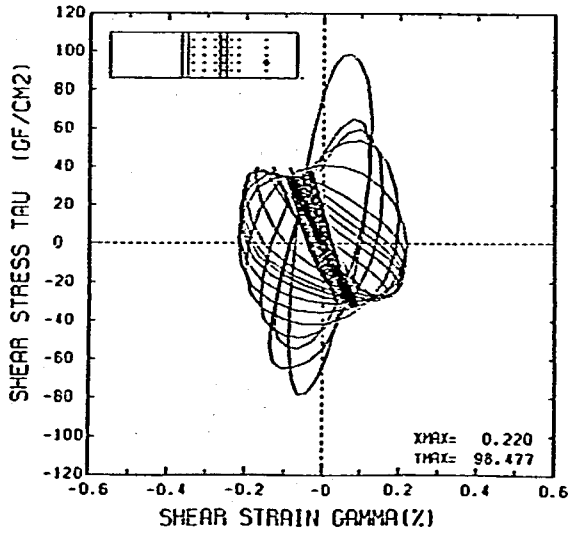


(実線－振幅調整前)

図－４・１・４　振幅調整後のせん断応力振幅（模型－２　砂地盤部）



（ａ）過剰間隙水圧の発生が
小さい場合（砕石ドレーン内）



（ｂ）過剰間隙水圧の発生が
大きい場合（砂地盤部）

図－４・１・５　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－３）

4．2　せん断ひずみから求めるせん断応力

3．で示した方法によって求めたせん断ひずみにせん断弾性係数を乗じることによりせん断応力を求める。せん断弾性係数はひずみ依存性および拘束圧依存性を有しており，また履歴減衰を考慮することも必要になってくる[5)～8)]。ここでは，これらに簡単なモデルを設定して，せん断応力の概略的な大きさ，時刻歴の傾向を見るための計算を行う。

4．2．1　せん断弾性係数の設定

初期せん断弾性係数G_0は次式により設定する。

$$G_0=\rho V_s^2=\frac{\gamma_t V_s^2}{98}\qquad(kgf/cm^2)\qquad(4.2.1)$$

ここにV_sはせん断波速度（m/s），γ_tは土の単位体積重量（gf/cm^3）である。これらは振動実験前に測定されている。また，G_0は次式で表わされるような平均有効主応力σ_m'の関数として与えられる。

$$G_0=A_0\cdot\sigma_m'^{0.5}\qquad(4.2.2)$$

ここにA_0は$\sigma_m'=1.0kgf/cm^2$における初期せん断弾性係数である。さらに，G_0で基準化したせん断弾性係数G/G_0のひずみ振幅γ_aに対する依存性を次式で表わす。

$$\left[\frac{G}{G_0}\right]_{\sigma_m'}=\left[\frac{G}{G_0}\right]_{\sigma_m'=1.0}\cdot\sigma_m'^{\,m(\gamma a)-m(\gamma=10^{-6})}\qquad(4.2.3)$$

ここに$\left[G/G_0\right]_{\sigma_m'=1.0}$は$\sigma_m'=1.0kgf/cm^2$における$G/G_0\sim\gamma_a$の関係で，標準的な図－4・2・1を用いた。$m(\gamma_a)-m(\gamma=10^{-6})$は$G/G_0\sim\gamma_a$曲線の拘束圧による変化を表わしたものであるが，今回の計算では$\sigma_m'=1.0kgf/cm^2$に対して与えられたものを用いた。せん断弾性係数は拘束圧依存性を有するものとして設定したが，拘束圧は過剰間隙水圧の発生に伴って変化する。加振前における平均有効主応力σ_{m0}'は，水平地盤においては

$$\sigma_{m0}'=\frac{1}{3}(\sigma_{v0}'+2\sigma_{h0}')=\frac{1+2K_0}{3}\sigma_{v0}'\qquad(4.2.4)$$

で与えられる。ここに，σ_{v0}'は初期有効上載圧，σ_{h0}'は初期水平方向有効土圧，K_0は水平方向土圧係数である。この初期状態から過剰間隙水圧uの発生によって鉛直有効応力σ_v'と水平有効応力σ_h'がそれぞれuだけ減少するものとすれば

$$\sigma_m'=\frac{1}{3}(\sigma_v'+2\sigma_h')=\frac{1+2K_0}{3}\sigma_{v0}'-u\qquad(4.2.5)$$

となる。しかし，uが大きくなれば応力比

$$\frac{\sigma_h'}{\sigma_v'}=\frac{K_0-(u/\sigma_{v0}')}{1-(u/\sigma_{v0}')}\qquad(4.2.6)$$

が小さくなり，破壊線に接することになる（図－4・2・2参照）。破壊線に接した後は接した

状態を保ったまま応力状態が変化するとすれば，このときの平均有効主応力σ_m'は破壊線の角度をϕとして

$$\sigma_m' = \frac{3-\sin\phi}{3(1+\sin\phi)}(\sigma_{v0}' - u) \qquad (4.2.7)$$

で算定できる。はじめて破壊線に接するときの過剰間隙水圧比は動的せん断応力が作用していない場合は

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'} = \frac{1+K_0}{2} - \frac{1-K_0}{2}\cdot\frac{1}{\sin\phi} \qquad (4.2.8)$$

で与えられるが，動的せん断応力を考慮した場合はもっと複雑になる。しかし，動的せん断応力自体がこれから求めようとするものであるので，厳密な設定はできず，ここでは無視した。

4．2．2　減衰定数の設定

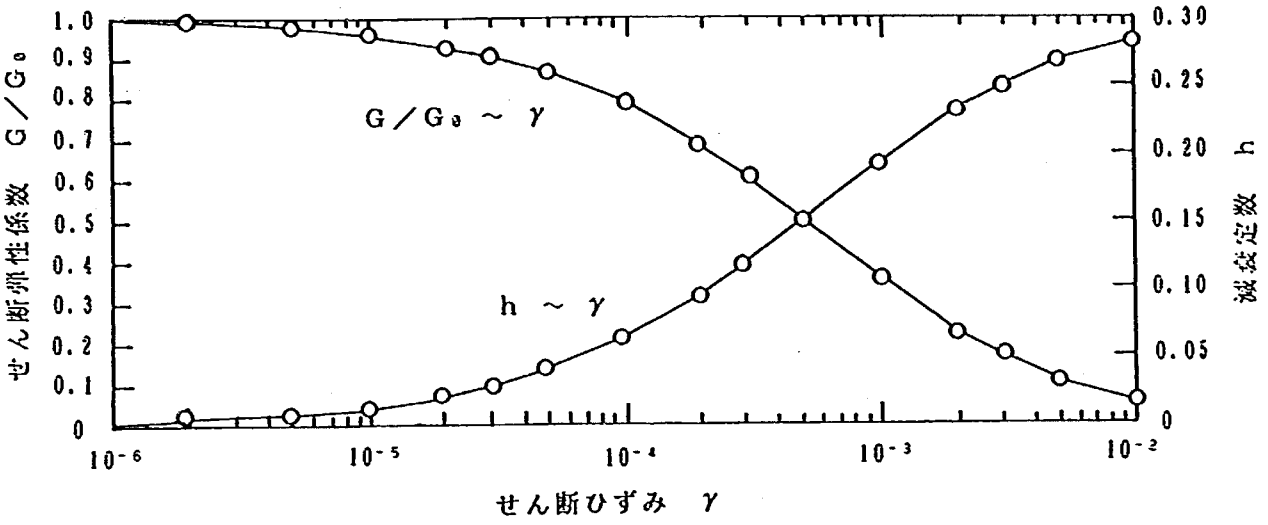
減衰は線形履歴減衰モデルを適用する。減衰定数hのひずみ依存性はG/G$_0$のひずみ依存性との関連から

$$h = 0.3\left(1-\frac{G}{G_0}\right) \qquad (4.2.9)$$

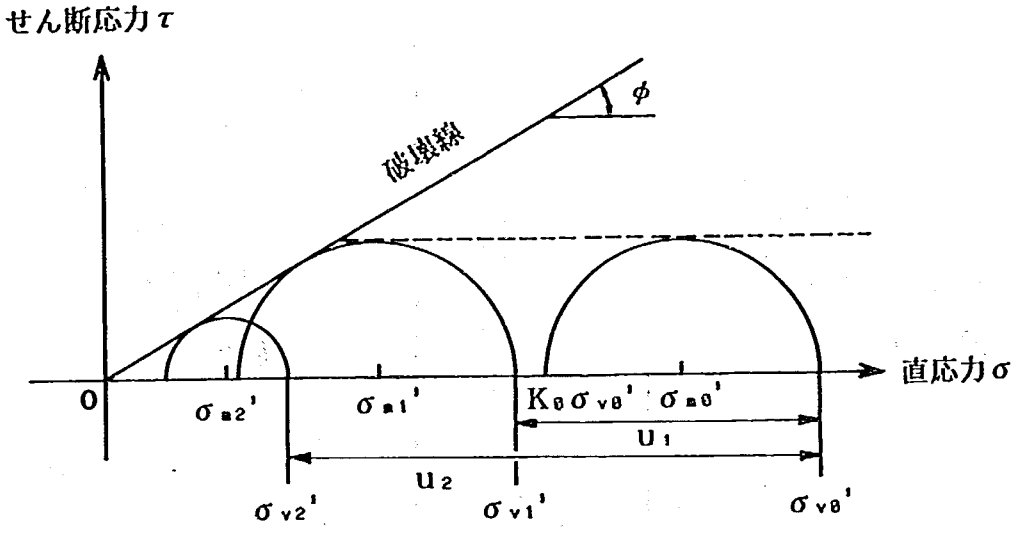
で与えた。この関係を図－4・2・1に合わせて示す。以上から，せん断ひずみから求めるせん断応力は

$$\tau = G\gamma \pm G'\sqrt{(\gamma_s^2-\gamma^2)}, \quad \frac{G'}{G} = 2h \qquad (4.2.10)$$

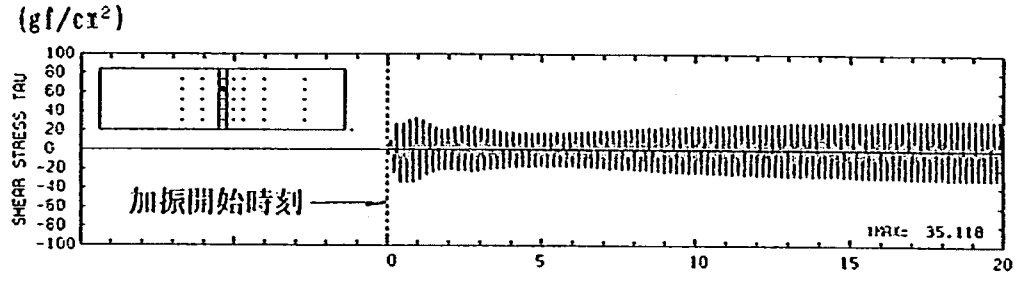
より計算した。この方法により求めたせん断応力の時刻歴を図－4・2・3に示す。用いた数値は$\phi=40°$，$K_0=0.5$，$V_s=135$m/s（$G_0=357$kgf/cm^2）である。過剰間隙水圧が初期有効上載圧より大きくなった時点で（計算上のσ_m'がゼロになる）計算をストップさせている。図－4・2・4に応力－ひずみ関係を示す。設定した計算条件の確認になるが，ひずみ振幅の増大による履歴減衰の増大あるいは過剰間隙水圧の発生に伴うせん断弾性係数の低下が読み取れる。



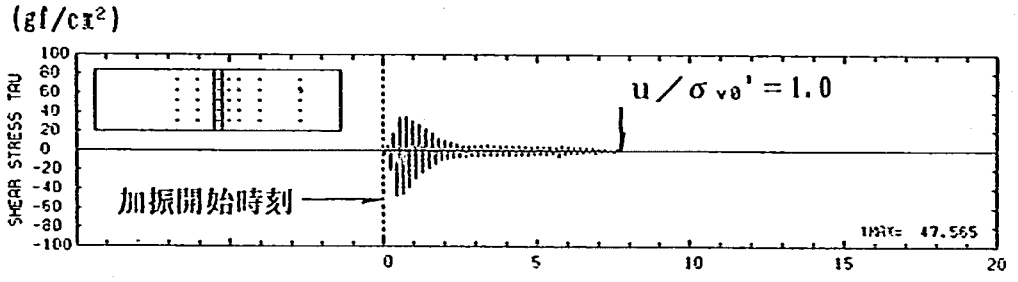
図－４・２・１　せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性



図－４・２・２　間隙水圧発生に伴う平均有効主応力の低下

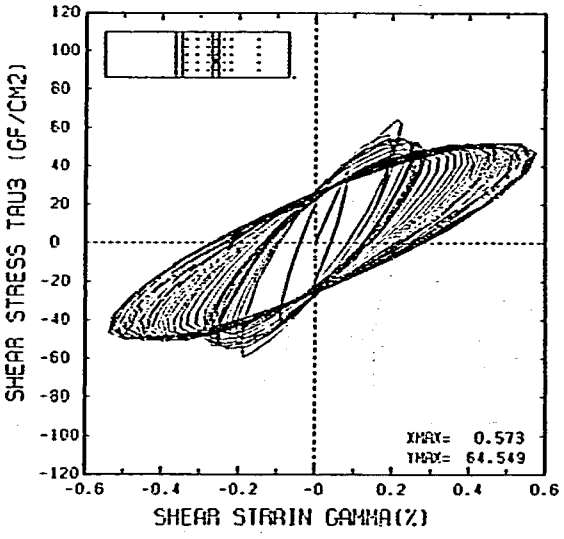


（ａ）過剰間隙水圧の発生が小さい場合（砕石ドレーン内）

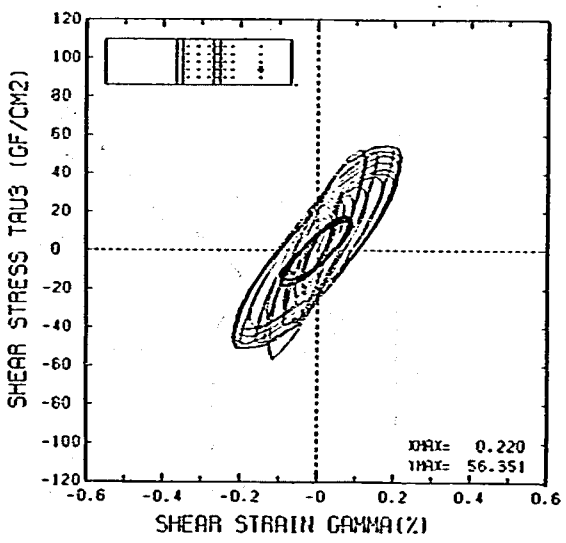


（ｂ）過剰間隙水圧の発生が大きい場合（砂地盤部）

図－４・２・３　せん断ひずみから求めたせん断応力波形（模型－２）



（ａ）過剰間隙水圧の発生が
小さい場合（砕石ドレーン内）



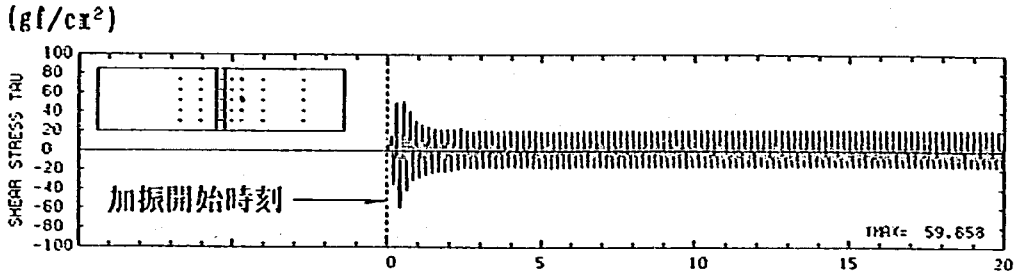
（ｂ）過剰間隙水圧の発生が
大きい場合（砂地盤部）

図－４・２・４　せん断ひずみから求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－３）

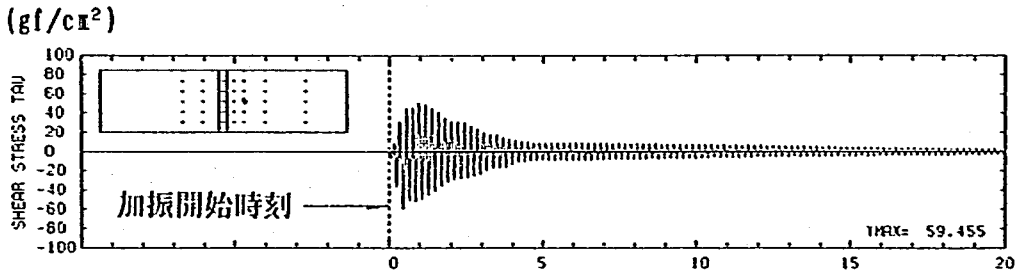
４．３　２つの方法で求めたせん断応力の比較

加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみから求めたせん断応力の比較を図－４・３・１，図－４・３・２に示す。図－４・３・１は時刻歴波形による比較である。０～１秒後に最大値を示すことおよびその最大値はほぼ等しいことから，液状化へ至る過程ではどちらを用いても問題は少ないと考えられる。しかし，その後の振幅は加速度から求めた方が急激な減少となるものの，比較的大きな残留値が残る。これは，液状化後の流体運動的な要素が完全には分離・除去できていないことが原因と考えられる。図－４・３・２は加速度から求めた応力を横軸に，ひずみから求めた応力を縦軸にとって比較したもので両者には少なからず位相のずれがある。同図(ａ)は比較的深い地盤内で初期の平均有効主応力が大きい例で，全体として加速度から求めた応力の方が大きい。これに対して同図(ｂ)は比較的浅い地盤内で初期の平均有効主応力が小さくいくぶん加速度から求めた応力が小さくなっている。これは加速度から求めた応力がおおむね深度に比例するのに対し，せん断ひずみから求めた応力は拘束圧の0.5 乗に比例するとしていることに関係している。

加速度から求める場合には質量×加速度＝力という単純な関係しか用いておらず，液状化後の流体運動的な成分の除去という操作を必要としているが，過剰間隙水圧の上昇過程に注目すれば妥当な処理ができていると考えられる。一方，せん断ひずみから求める場合にはひずみ自体が加速度を積分して得られた変位の分布を仮定して求めていること，応力－ひずみ関係のモデル化，測定された過剰間隙水圧を介してのσ_n'の設定など仮定条件がきわめて多い。以上のことからせん断応力は ４．１に基づく方法で求めることとした。

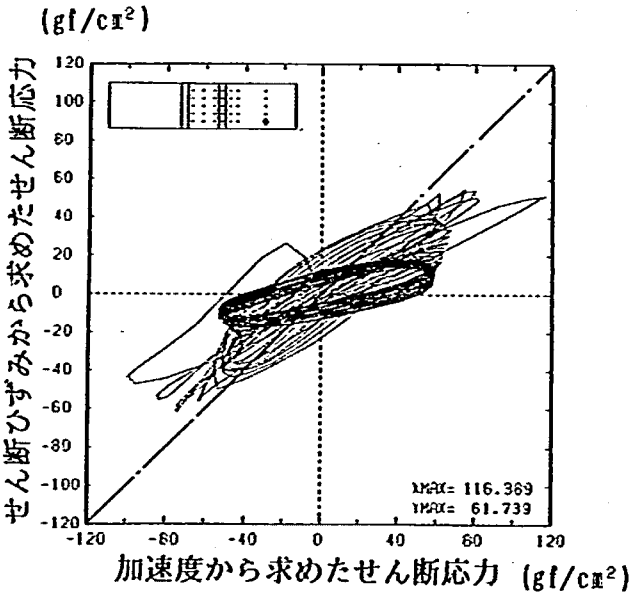


（ａ）加速度から求めたせん断応力波形（振幅調整後）

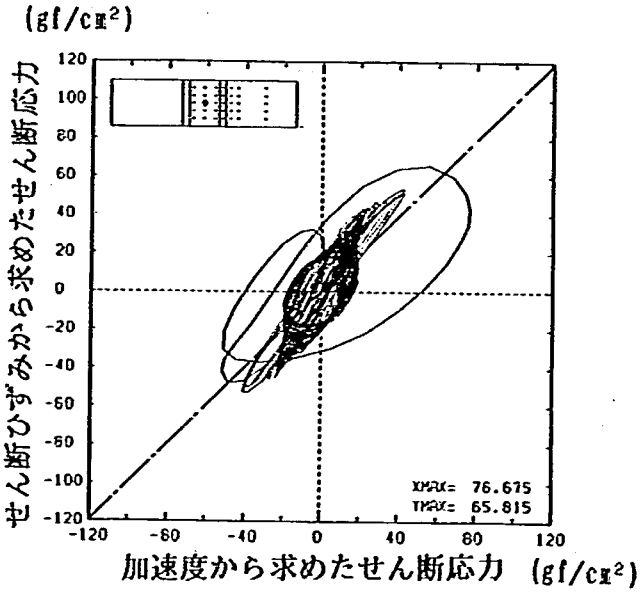


（ｂ）せん断ひずみから求めたせん断応力の時刻歴波形

図－４・３・１　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみから求めたせん断応力の時刻歴波形による比較（模型－２）



（ａ）初期有効上載圧が大きい場合



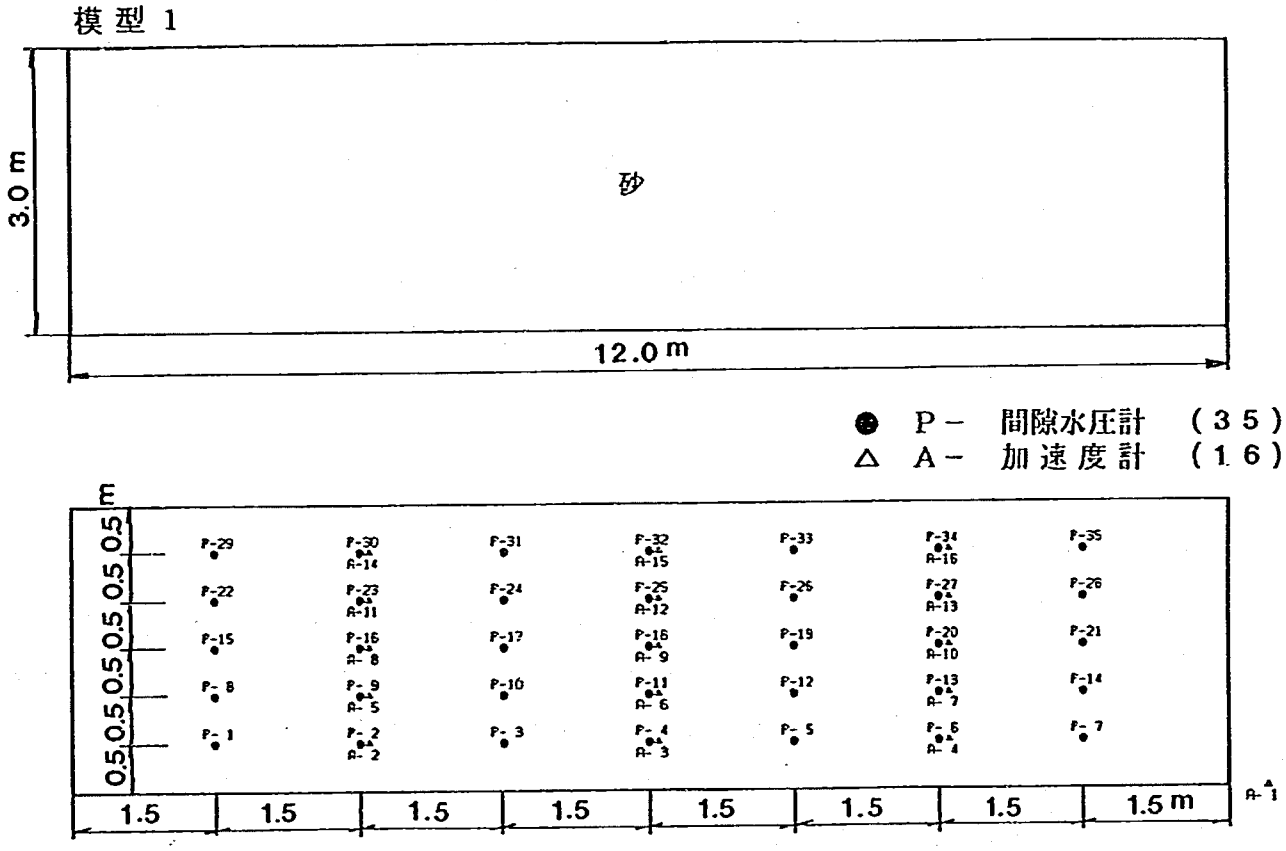
（ｂ）初期有効上載圧が小さい場合

図－４・３・２　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみから求めたせん断応力の比較（模型－３）

5．実験データの整理方法とその結果

全11ケースの実験データについて，直接計測された加速度計，間隙水圧計，変位計，土圧計の時刻歴波形の他，3．4．で述べた方法によって求めたせん断応力，せん断ひずみについても図化処理し，これらの関係をいくつかの観点から整理した。

ここでは模型－1について整理した各図についてその整理方法と整理結果を示し，模型－2～11については付属資料として掲載した。図－5・1・1に模型－1の寸法および計測器の配置を示す。



A－1は振動台加速度

A－4は欠測（飽和）

図－5・1・1 模型の寸法と計測器の配置（模型－1）

5．1　加速度データの整理

5．1．1　記録波形

図－5・1・2に補正前の加速度の時刻歴波形を示す。振動台の最大加速度は286galであるが，全時間領域ではほぼ振幅200galの波形となっている。

地盤の応答加速度は加振後2～3秒後にくびれが現われその後，増幅する傾向を示すものが多い。増幅後の加速度は300～600gal で増幅率は1.5～3.0倍である。

また，地盤の上部に設置された加速度計は振幅の中心が基線から大きくずれてくるものがあり，地盤の変形により加速度計が傾いたものと考えられる。

5．1．2　液状化前後の鉛直方向の位相差

加振開始2～3秒後に地盤内の応答加速度が一度減少しているが，この前後の基線補正後の加速度波形を鉛直方向同列の測定点ごとにまとめて図－5・1・3に示す。同図(a)は加振直後0～3秒間で鉛直下方から上方に向かってせん断力が伝達されていくようすや液状化の進行に伴って加速度振幅が小さくなっていくようすがわかる。同図(b)は液状化が十分進行したと考えられる加振後30～33秒間で上下方向の位相差がほとんどないこと，また，入力加速度に対して著しく増幅されていることがわかる。中央部に設置された鉛直方向同列のの加速度計の位相差を同図(a)の2波目から読み取り，これと距離からせん断波速度を計算すると約 34m/sとなる。この値は振動実験前の実測値（100m/s程度）に比較して遅くなっているが，ひずみ振幅が大きく，剛性の低下が既に生じている結果と考えられる。

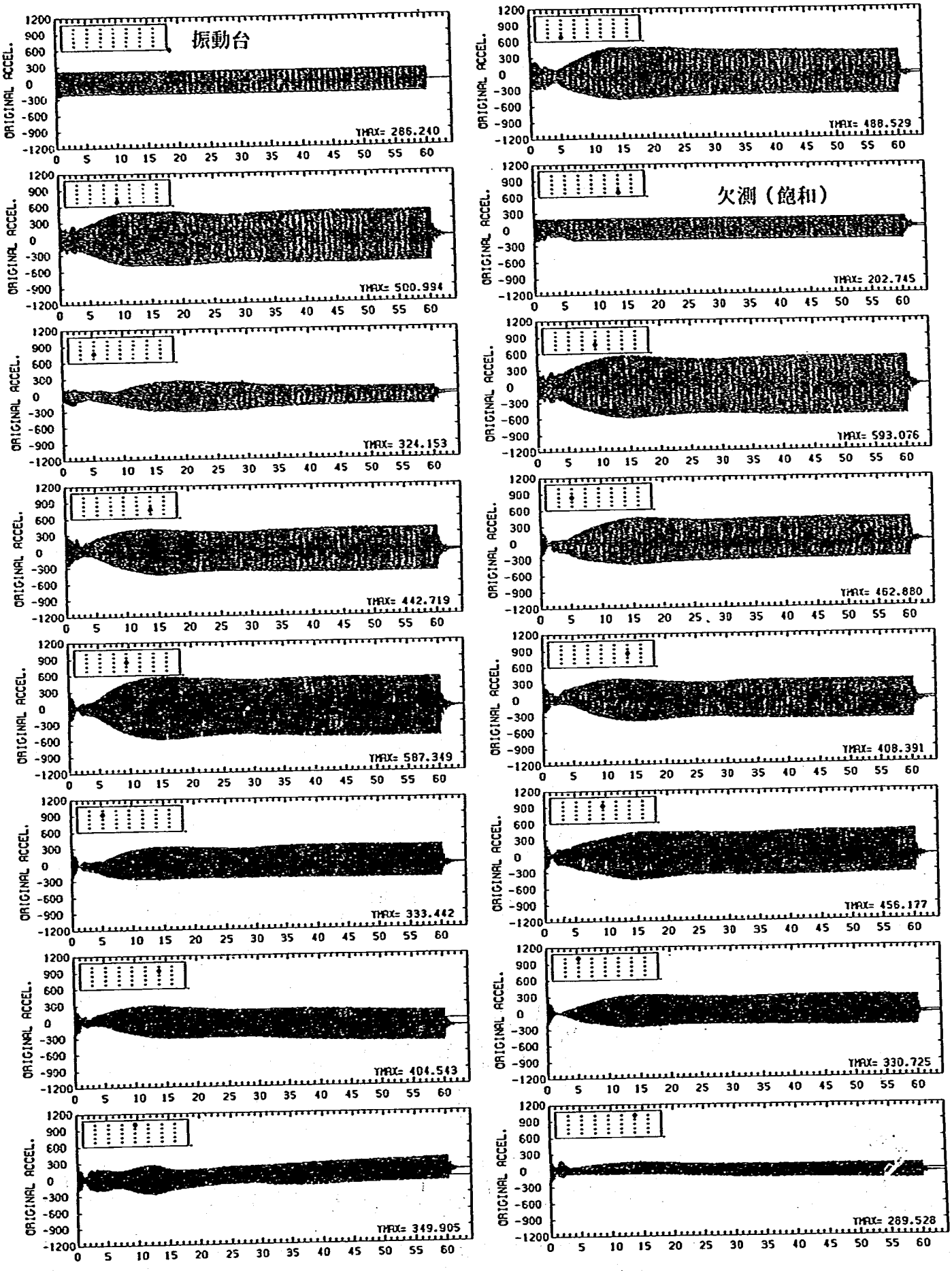
5．1．3　加速度の空間分布

図－5・1・4に加振後1，2，3，4，5，6，10，20，30，60秒の加速度の空間分布を示す。コンターのピッチは20gal である。各図に示した測定値はその時刻における1波分の基線補正後の加速度の最大値または最小値のうち絶対値の大きい方を示している。

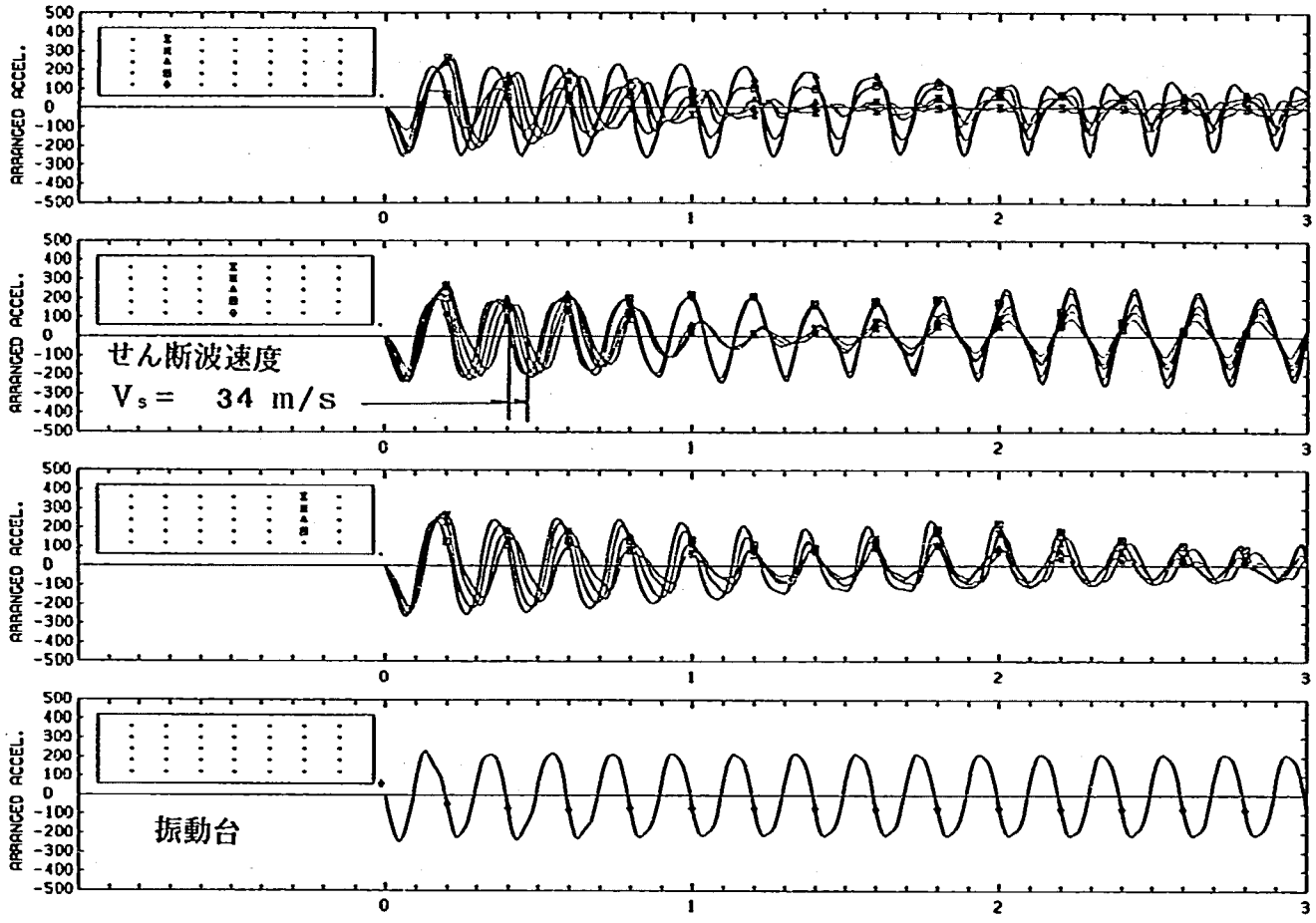
5．1．4　加速度振幅の時刻歴

図－5・1・5に基線補正後の加速度振幅の時刻歴を示す。加速度振幅はコンター図に示したのと同様1波ごとに加速度の最大値または最小値のうち絶対値の大きい方をとっている。同図(a)に加振全時間領域，同図(b)に加振開始後0～6秒間の拡大図を示す。

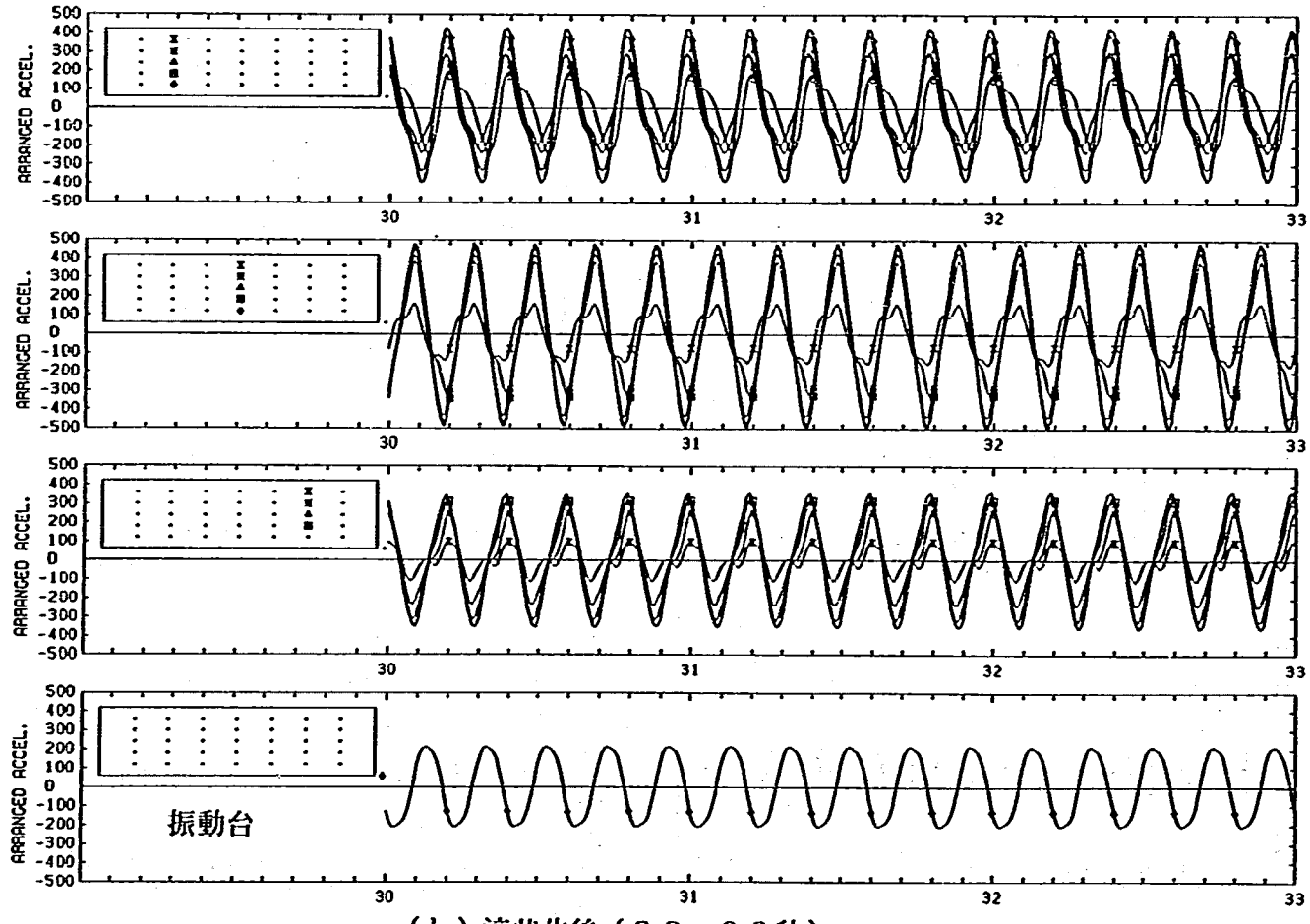
振動台の入力加速度に対して液状化後の地盤内の応答加速度は400～500gal に増幅されており，深度では 150cm（図中△印）付近の増幅率が大きいといえる。



図－5・1・2　加速度の時刻歴波形（補正前，模型－1，単位；gal）

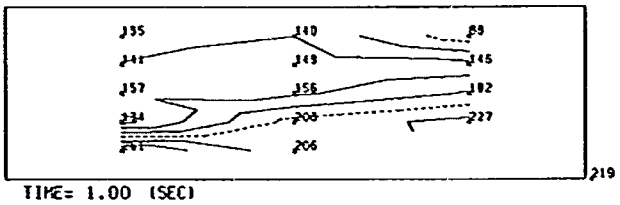


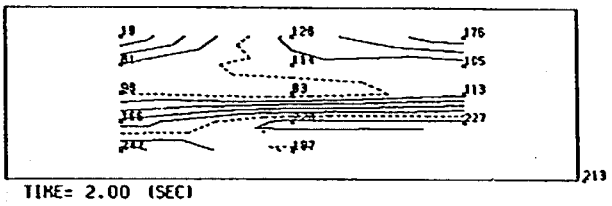
（ａ）加振開始直後（０～３秒）

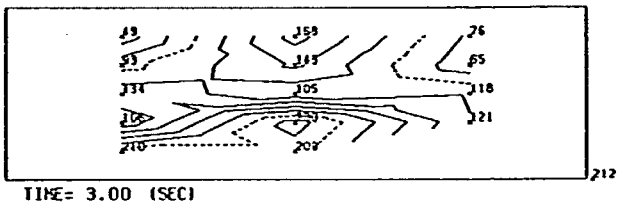


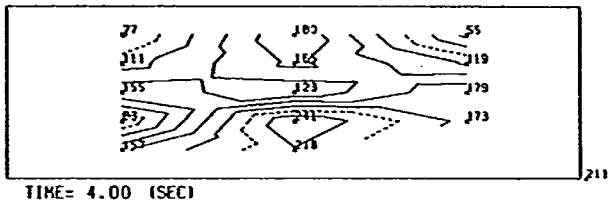
（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

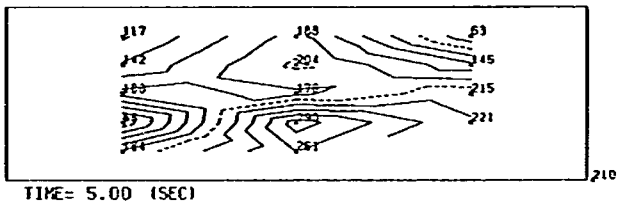
図－５・１・３　加速度の時刻歴波形（補正後，模型－１，単位；gal）

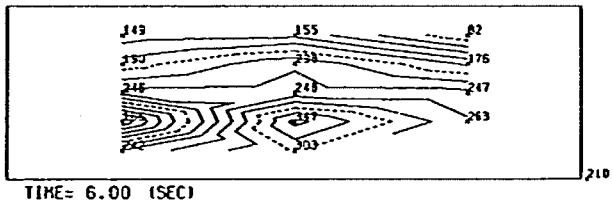


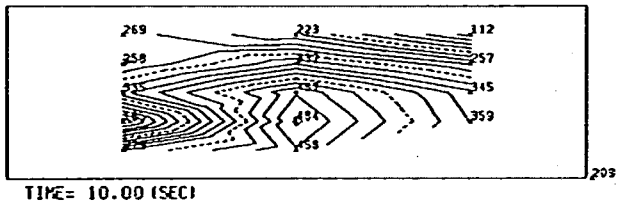


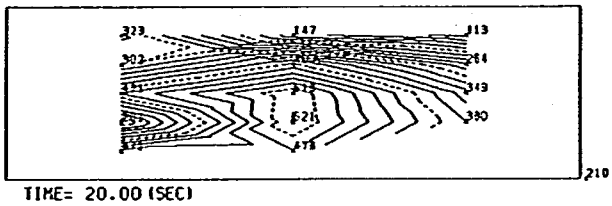


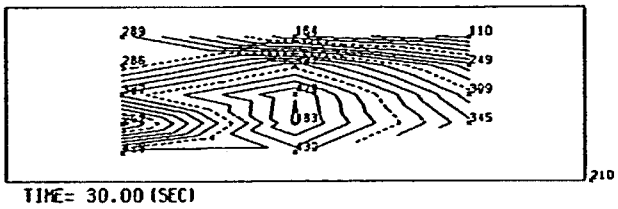


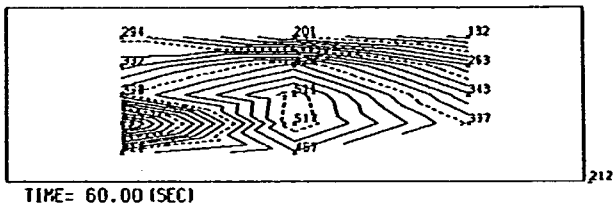




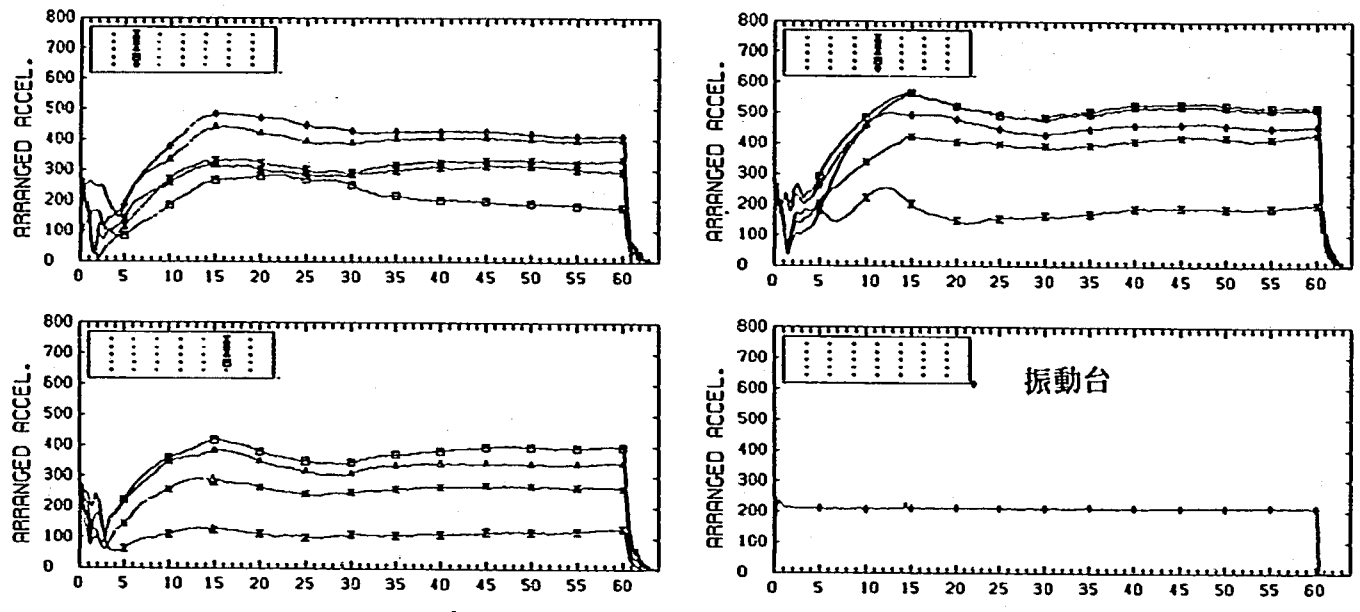




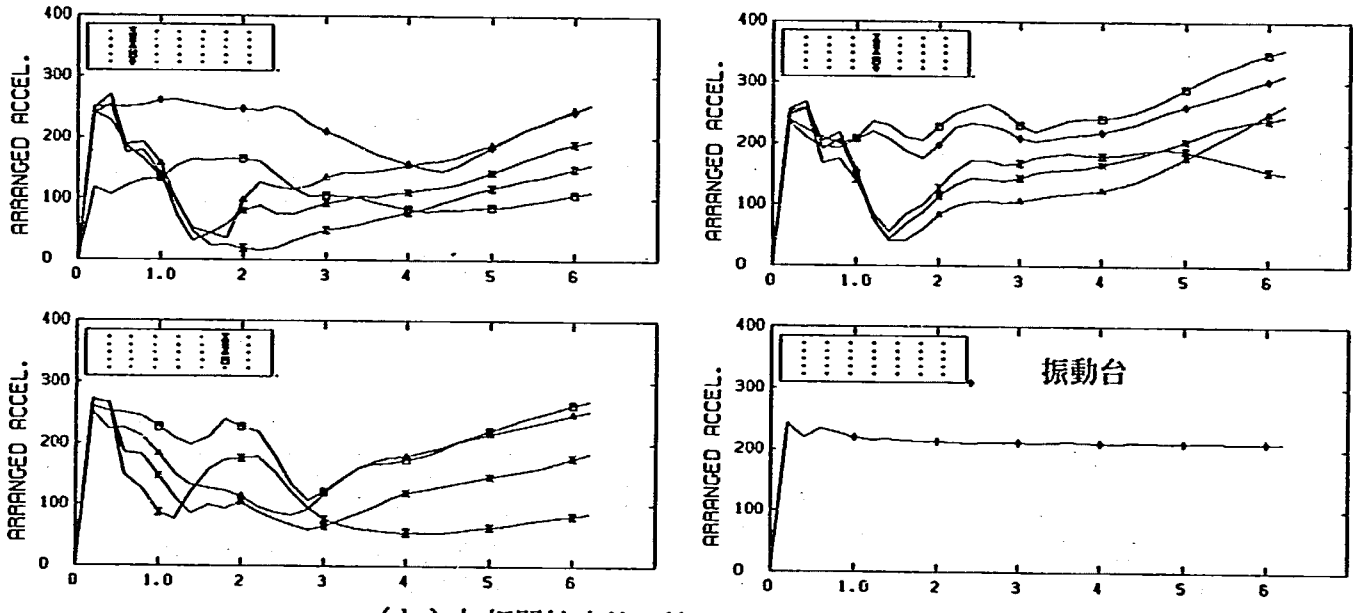




図－５・１・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal，模型－１）



（ａ）全時間領域



（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

図－５・１・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値，模型－１，単位；gal）

5．2　間隙水圧データの整理

5．2．1　記録波形

図－5・2・1に過剰間隙水圧の記録波形を示す。加振開始後0～3秒間で急激に上昇しその後は比較的大きな振幅で振動している。図中に各測定点の初期有効上載圧σ_{v0}'を合わせて示しているが，液状化後の振動の中心はほぼこの有効上載圧に近い値になっている。

5．2．2　過剰間隙水圧の空間分布

図－5・2・2に加振開始後1，2，3，4，5，6，10，20，30，60秒後の過剰間隙水圧の空間分布を示す。コンターのピッチは20gf/cm^{2}である。図中に示した値はその時刻における測定値を中心に1波分（5Hz加振100Hz サンプリングのときは20個，2Hz加振50Hzサンプリングのときは25個）のデータの移動平均をとっている。この方法によれば液状化後の振動成分が取り除かれていると考えられる。模型－1のように掘割道路模型も砕石ドレーンもない模型地盤では加振直後に若干の乱れがあるがほぼ水平方向に一様な過剰間隙水圧の上昇となっている。

5．2．3　過剰間隙水圧の時刻歴

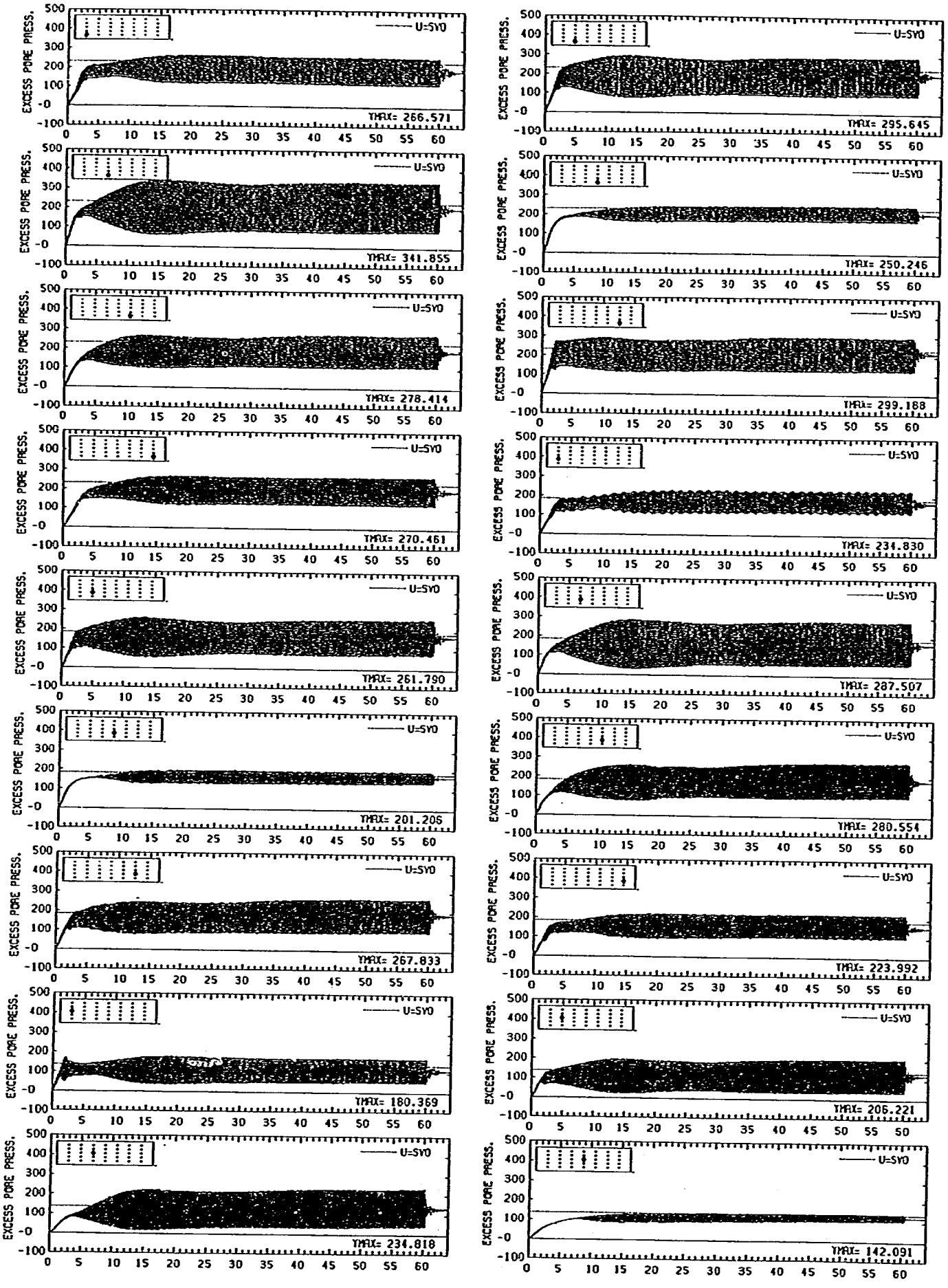
スムージングした過剰間隙水圧の時刻歴を鉛直方向同列の測定点ごとにまとめて図－5・2・3に示す。同図(a)は加振全時間領域，同図(b)は加振開始後0～6秒間の拡大図を示す。

5．2．4　過剰間隙水圧の深度分布

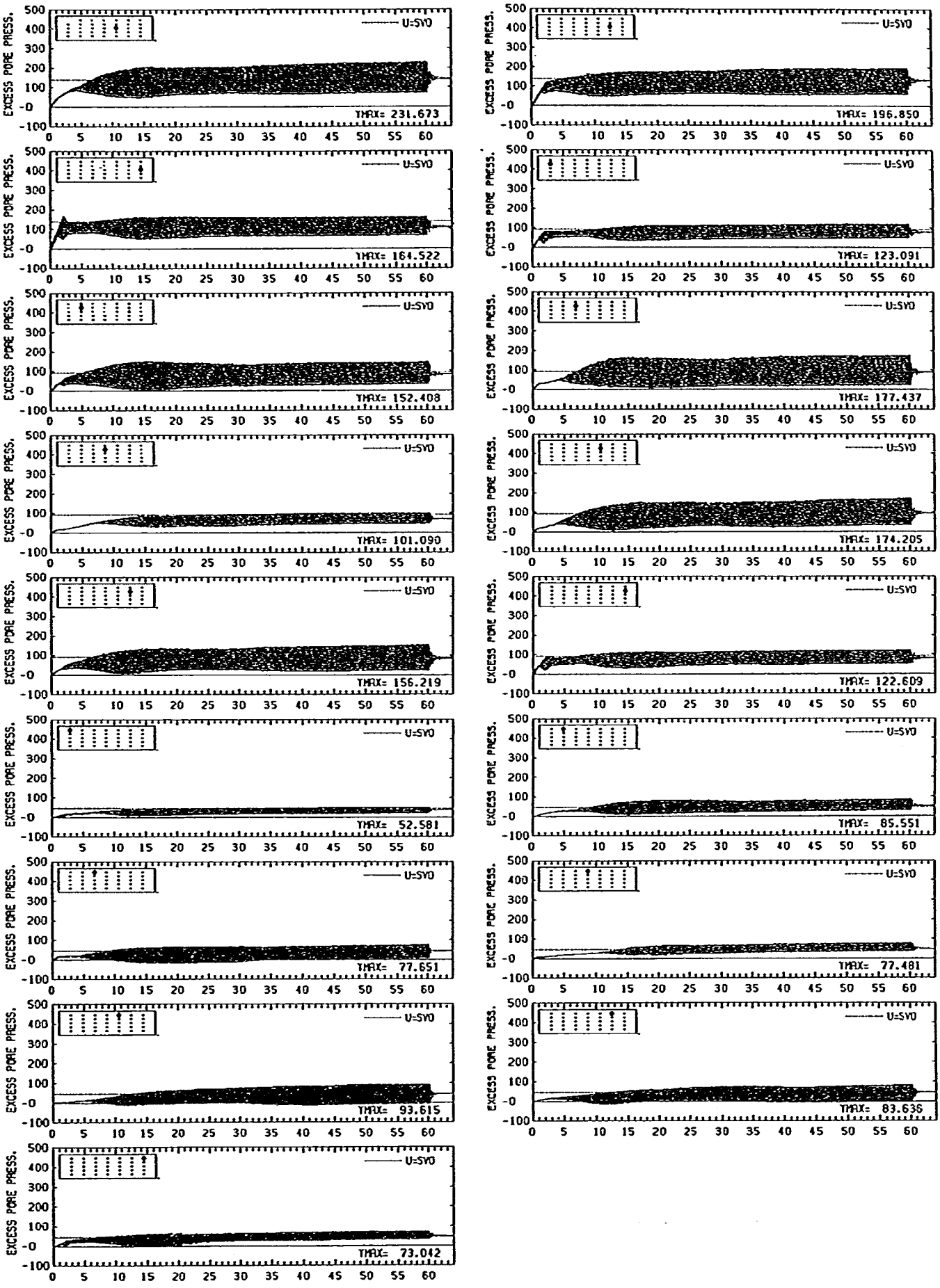
図－5・2・3に示した7つの測線のうち，側壁の影響を強く受けていると思われる両側の測線を除く5測線のデータを深度ごとに単純平均したものを図－5・2・4(a)に示し，同図(b)にそれぞれの深度における初期有効上載圧で正規化した過剰間隙水圧比を示す。

過剰間隙水圧比でみれば模型－1の例では深い深度（GL-200cmおよび-250cm）での発生が速く，浅い位置へいくにしたがって過剰間隙水圧の発生が遅れているといえる。

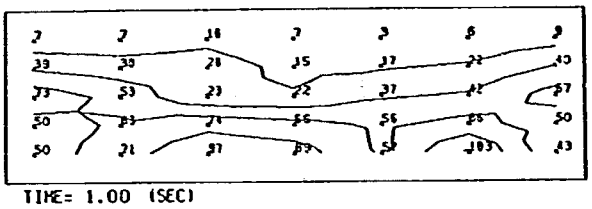
この深度ごとに平均した値を1，2，3，4，5秒後および加振終了時の深度分布として同図(e)に過剰間隙水圧，(f)に過剰間隙水圧比を示す。過剰間隙水圧比でみれば先に述べたように初期には浅い部分で間隙水圧の発生が遅れているが最終的には全体が0.95程度にまで上昇する。各時刻ごとの深度分布をみれば過剰間隙水圧はほぼ直線上に分布していると見なせるので，これを直線近似して書き直すと同図(g)，(h)のようになる。この直線近似した値を時刻歴に戻してやると同図(c)，(d)のようになる。(d)の■印は近似した直線の勾配から求めた過剰間隙水圧比で，☆印は各深度の過剰間隙水圧比を単純平均した値である。初期有効上載圧は上部の方が小さいので☆印の方が浅い部分の影響を大きく受けているといえる。近似直線の値から求めた過剰間隙水圧比は0.5 程度まではほぼ直線的に上昇し，その後ゆるやかな上昇となり2秒後に0.6，3秒後に0.7，6秒後に0.8 となり加振終了時には0.9 を超える値となる。



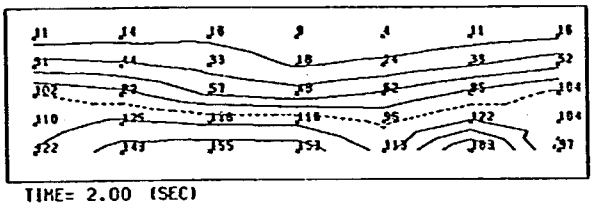
図－５・２・１　過剰間隙水圧の記録波形（その１，模型－１，単位；gf/cm²）



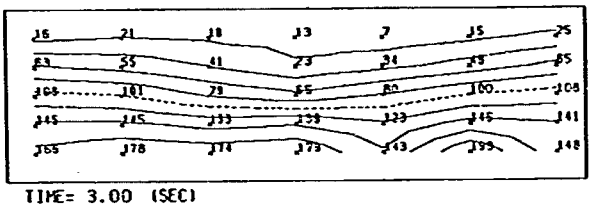
図－５・２・１　過剰間隙水圧の記録波形（その２，模型－１，単位；gf/cm²）



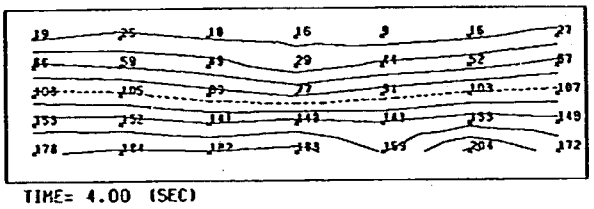
TIME= 1.00 (SEC)



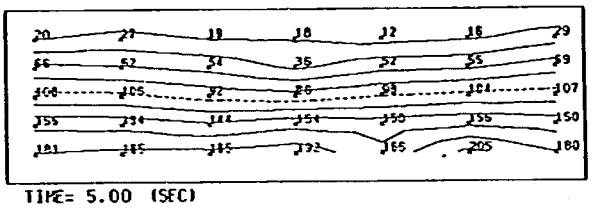
TIME= 2.00 (SEC)



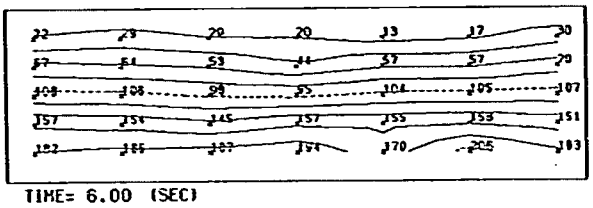
TIME= 3.00 (SEC)



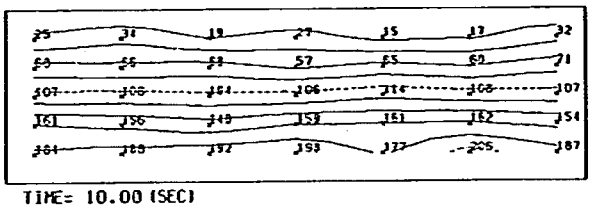
TIME= 4.00 (SEC)



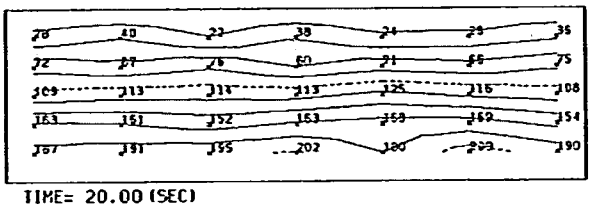
TIME= 5.00 (SEC)



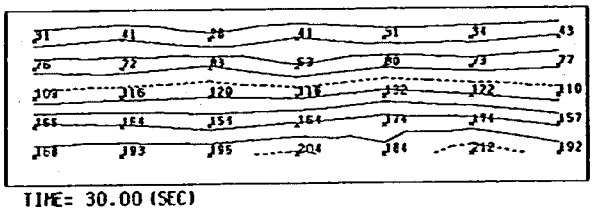
TIME= 6.00 (SEC)



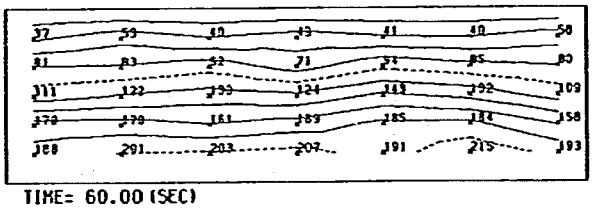
TIME= 10.00 (SEC)



TIME= 20.00 (SEC)

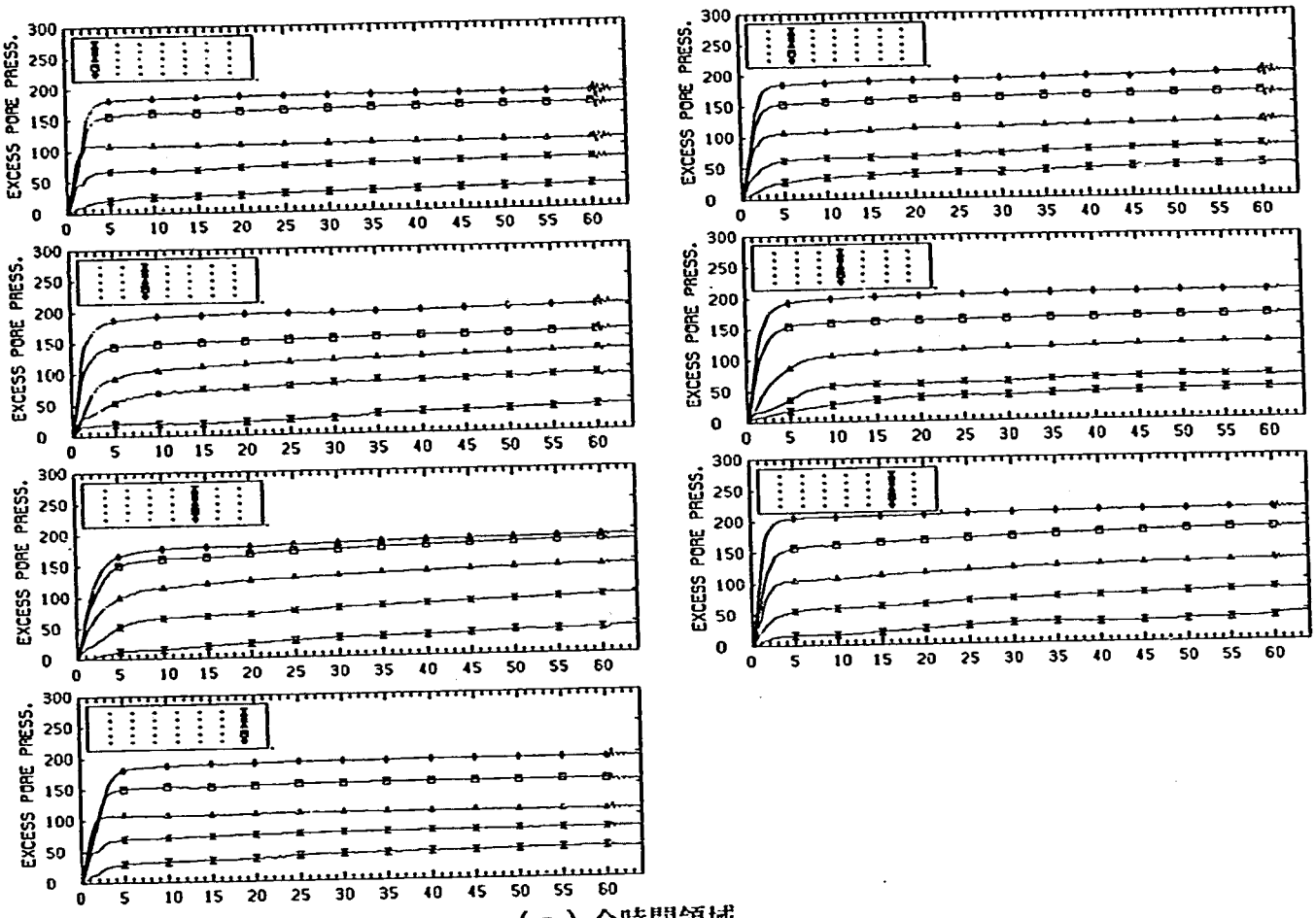


TIME= 30.00 (SEC)

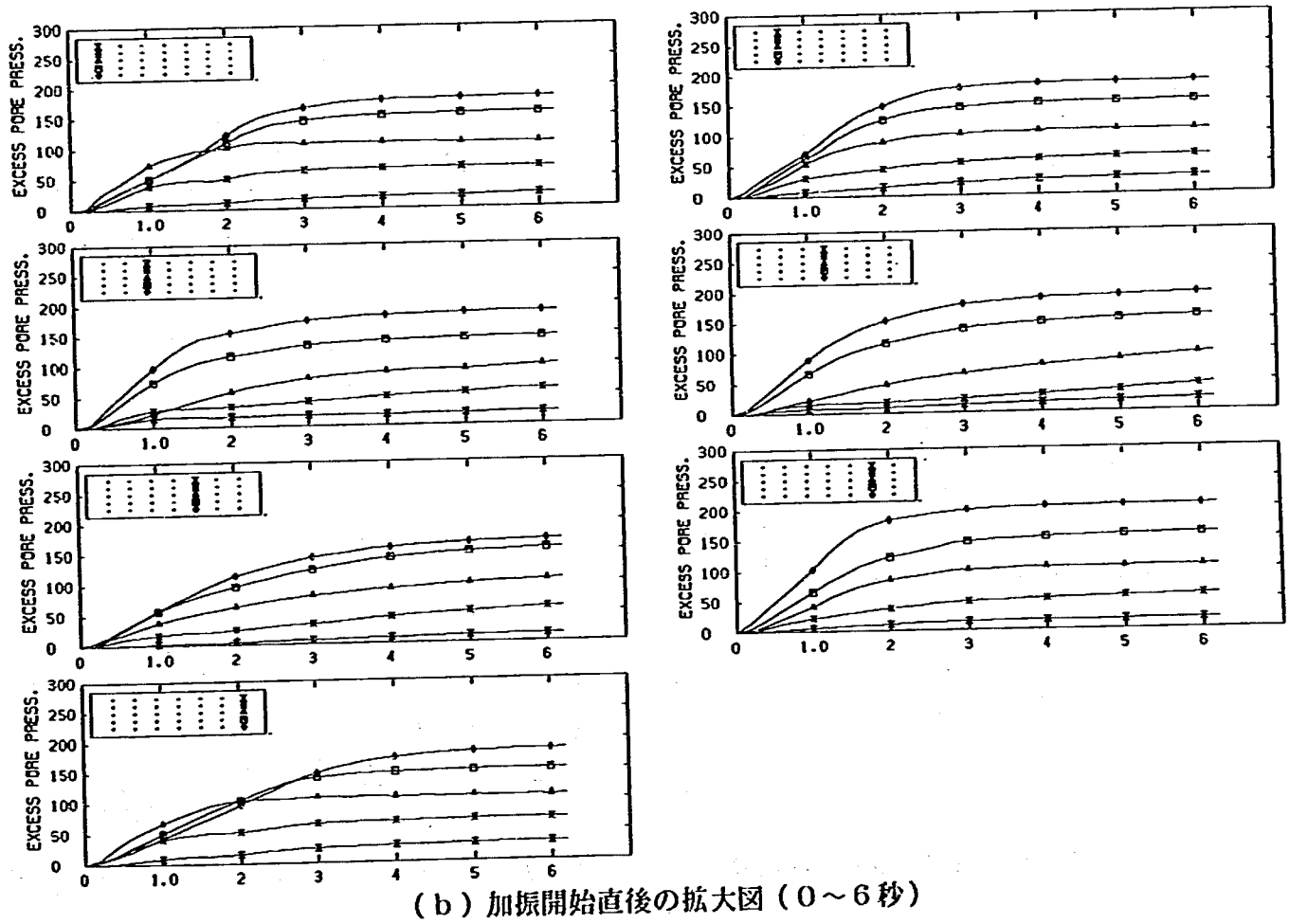


TIME= 60.00 (SEC)

図－５・２・２ 過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2，模型－１）

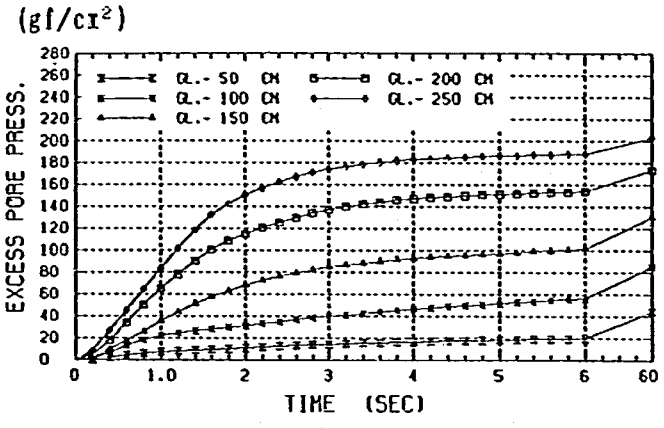


(a) 全時間領域

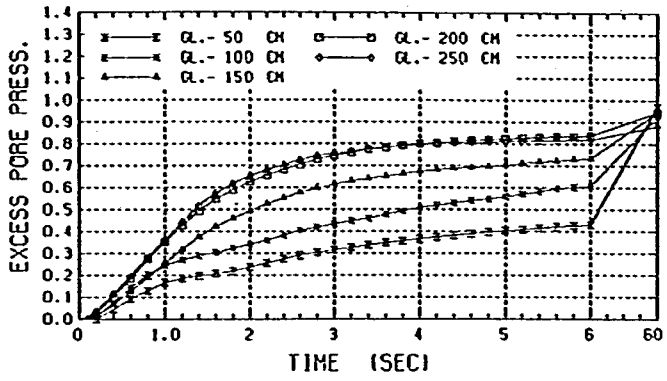


(b) 加振開始直後の拡大図（0～6秒）

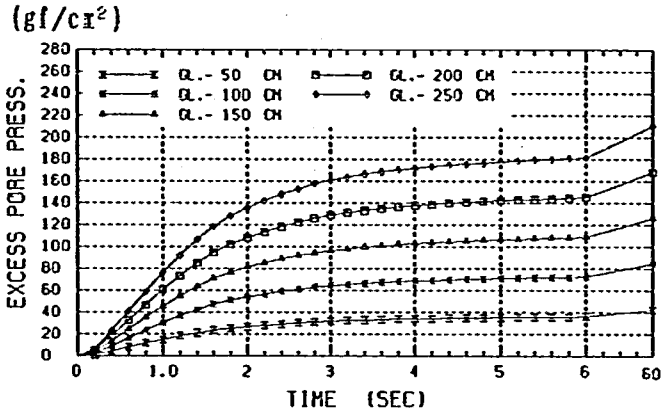
図－5・2・3 過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後，模型－1，単位；gf/cm²）



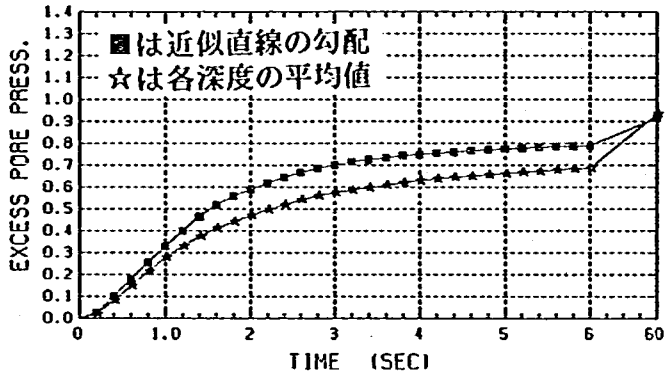
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



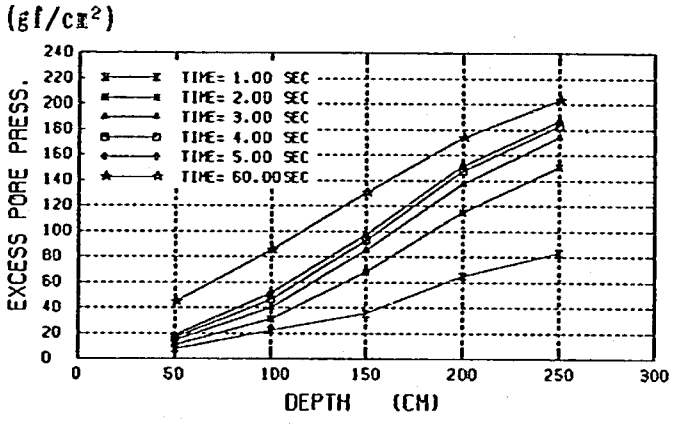
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



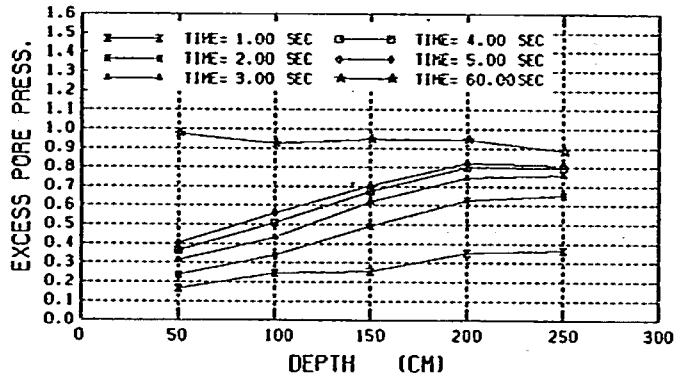
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



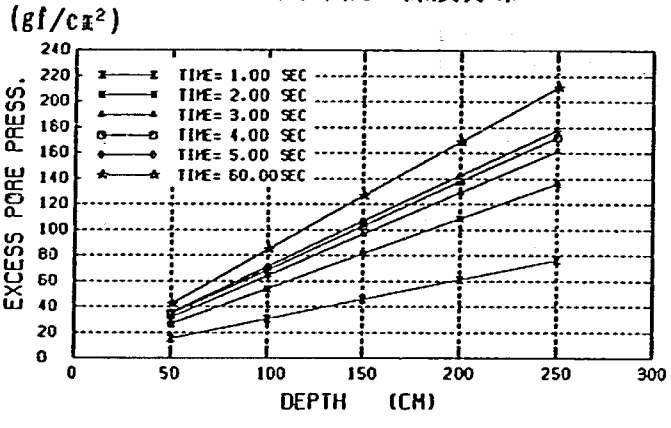
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



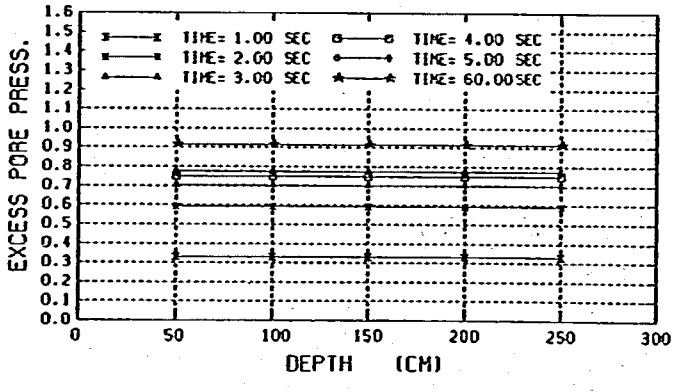
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布



（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布



（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

図－５・２・４　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後，模型－１）

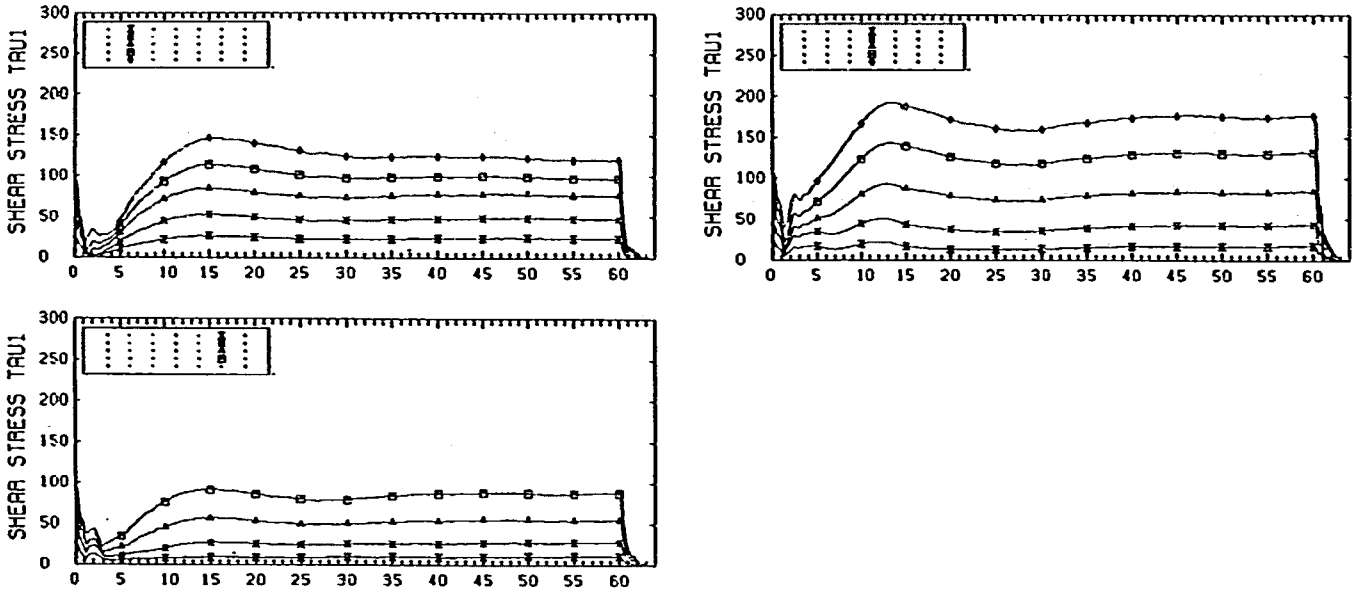
5．3　せん断応力の整理

5．3．1　せん断応力振幅の時刻歴

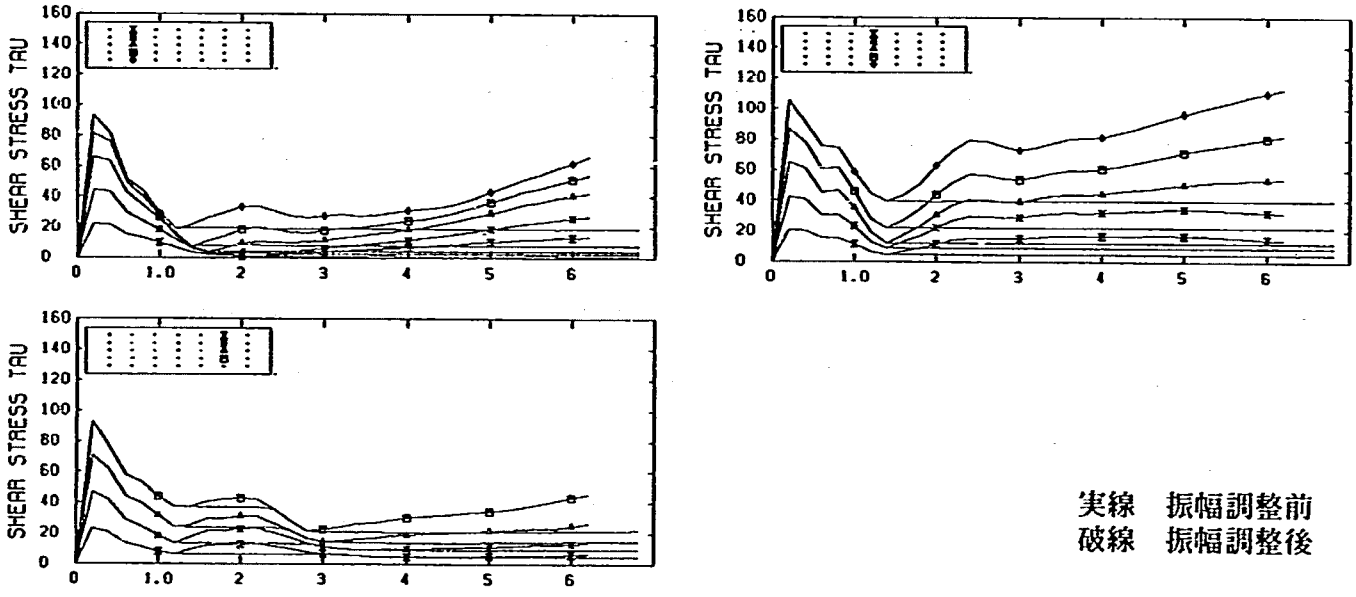
加速度に質量を乗じて地表面から順に重ね合わせていく手法で求めたせん断応力の時刻歴を図－5・3・1に示す。1波ごとの振幅を求めてプロットしている。同図(a)は全時間領域について示しているが1～2秒後に一度せん断応力がゼロに近くなってから10～15秒にかけて増幅し，その後の加振継続中は同じような値で推移している。4．で述べたように一度減少してからの値には地盤全体が液体状に運動している影響が現われていると考えられる。同図(b)は加振後0～6秒間の拡大図で，一度極小値を示してからの増加については無視したものを破線で示している。以後のせん断応力の検討にはこの振幅調整したものを用いている。

5．3．2　せん断応力の深度分布

図－5・3・2(a)に図－5・3・1に示した3測線の平均値を示す。振幅調整した後のせん断応力振幅である。同図(b)にこれを初期有効上載圧で正規化したせん断応力比を示しているが，どの深度においてもほぼ同じ値となっている。同図(e)は加振後0.4，0.8，1.2，1.6，2.0，60秒の値を深度を軸として示しているが，過剰間隙水圧と同様，ほぼ直線的な分布と見なせる。直線近似した場合の深度分布を同図(g)，(h)に示す。またその近似直線から逆に各点のせん断応力を求めた時刻歴を同図(c)，(d)に示している。せん断応力比のうち■印は近似直線の勾配から求めたもので，☆印は各深度ごとのせん断応力比を単純平均したものである。模型－1では第1波目に最大せん断応力比0.47程度を示し，7波目（1.4 秒後）で残留応力比0.1 程度に減少している。

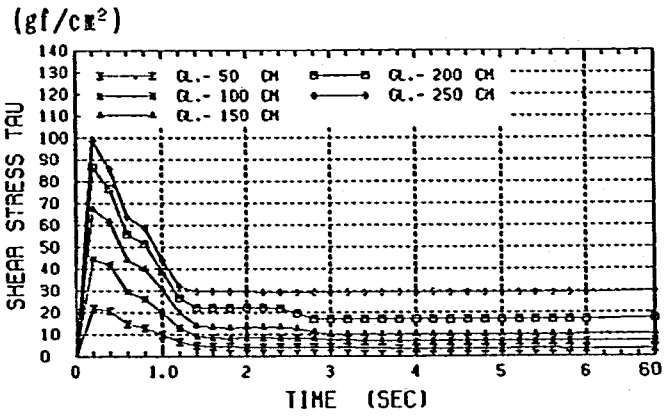


（ａ）全時間領域

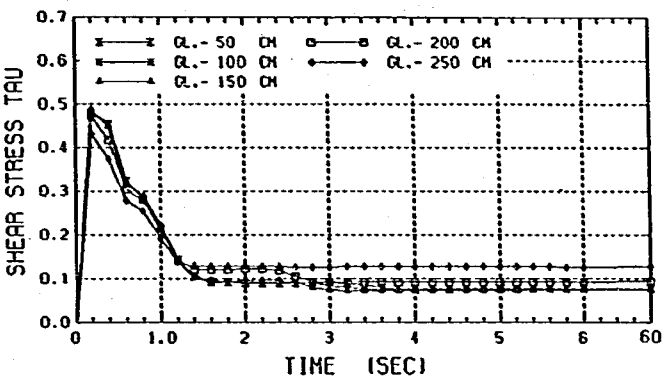


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

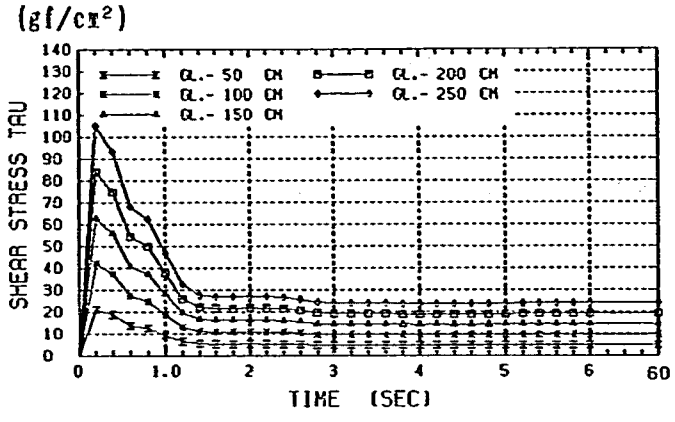
図－５・３・１　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－１，単位；gf/cm²）



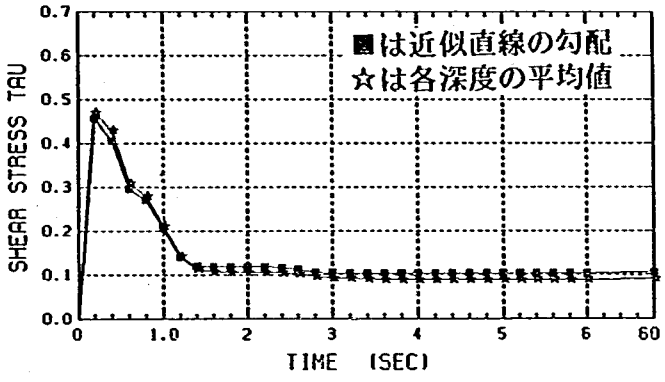
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



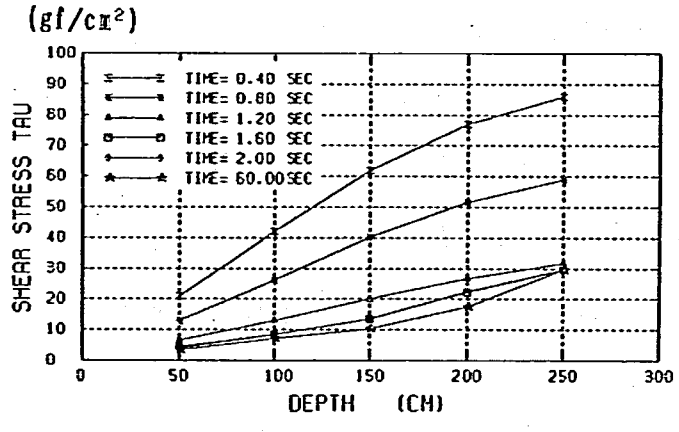
（ｂ）同左のせん断応力比



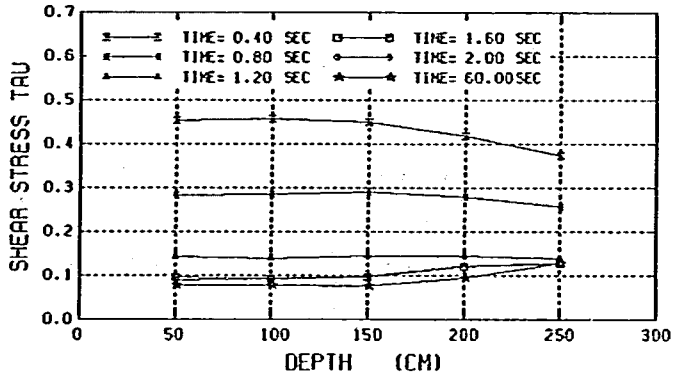
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



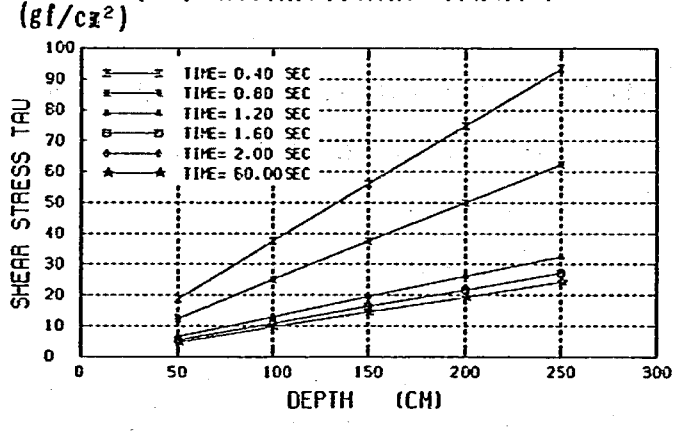
（ｄ）同左のせん断応力比



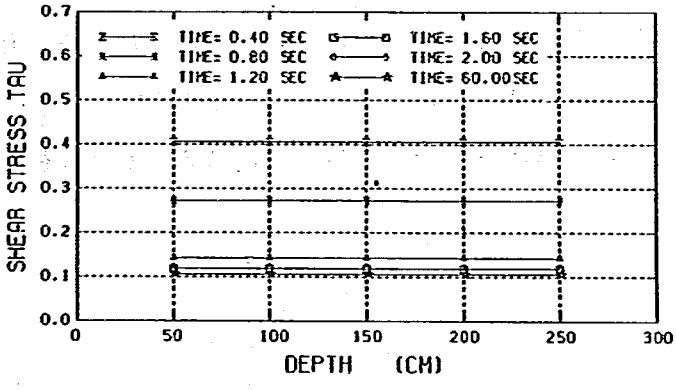
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布



（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布



（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

図－５・３・２ せん断応力の整理結果（振幅調整後，模型－１）

5．4　過剰間隙水圧とせん断応力，せん断ひずみの関係

5．4．1　過剰間隙水圧とせん断ひずみの関係

図－5・4・1に横軸に直接数値積分した変位から計算したせん断ひずみ$\tilde{\gamma}$(%)，縦軸にその計算点に設置してある間隙水圧計によって実測された過剰間隙水圧$\tilde{u}$を，その点における有効上載圧σ_{v0}'で正規化した過剰間隙水圧比$\tilde{u}/\sigma_{v0}'$をとって，加振後0～6秒後までの関係を示す。図中の1～5までの数値は加振後の経過時間(sec)である。

各計測点で実測された$\tilde{u}/\sigma_{v0}'$は液状化後の振動成分を取り除く前の値で，図では長円を描く形で振動の影響が現われているが，その軸の方向や偏平状況などは測点によってまちまちであり，深度との相関関係もあまりないように思われる。

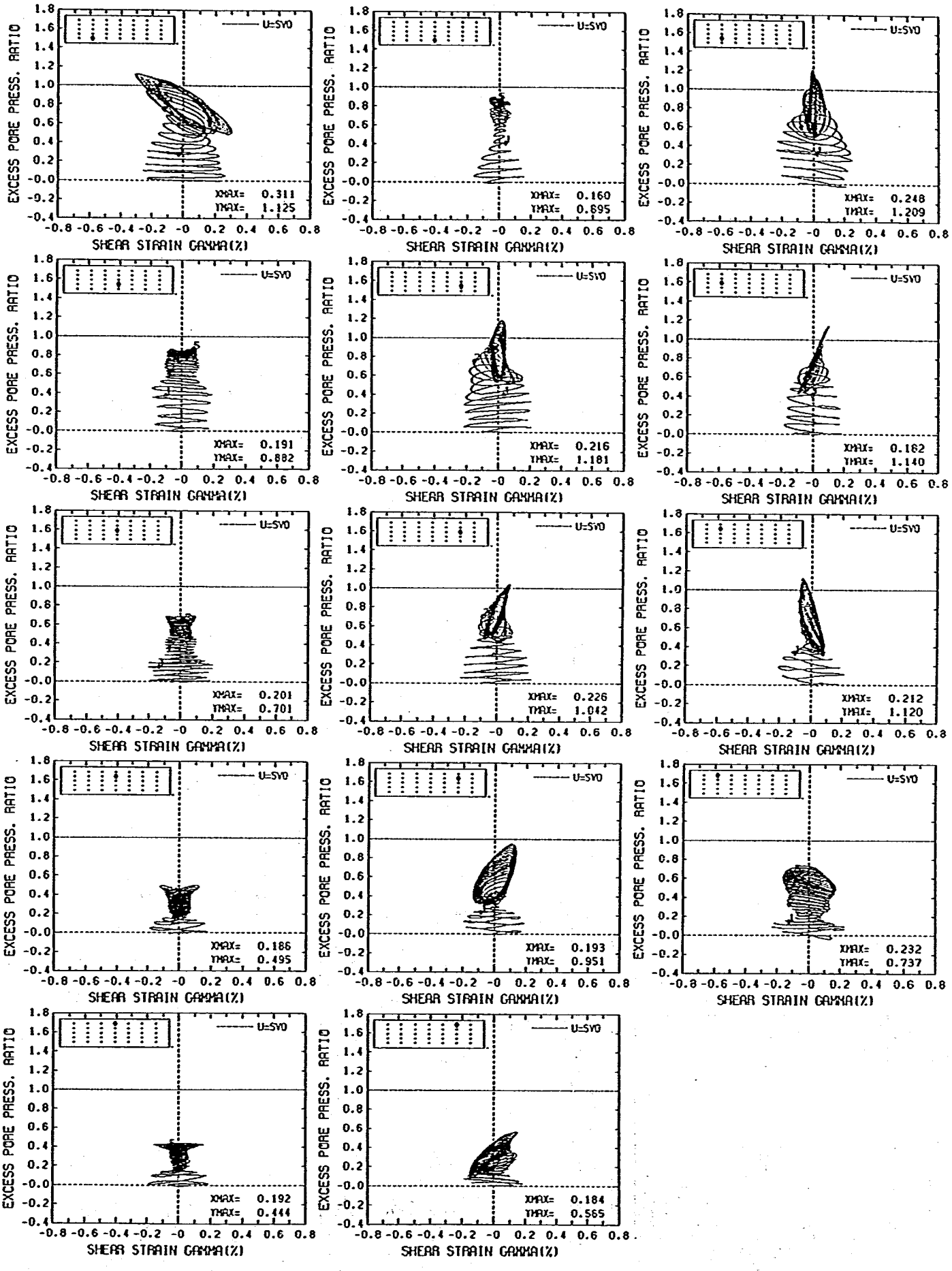
図－5・4・2は$\tilde{u}/\sigma_{v0}'$をスムージングした場合のせん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係を示したものである。0～6秒の範囲では最大せん断ひずみは0.16～0.31%，過剰間隙水圧比は0.37～0.86である。

5．4．2　過剰間隙水圧比とせん断応力の関係

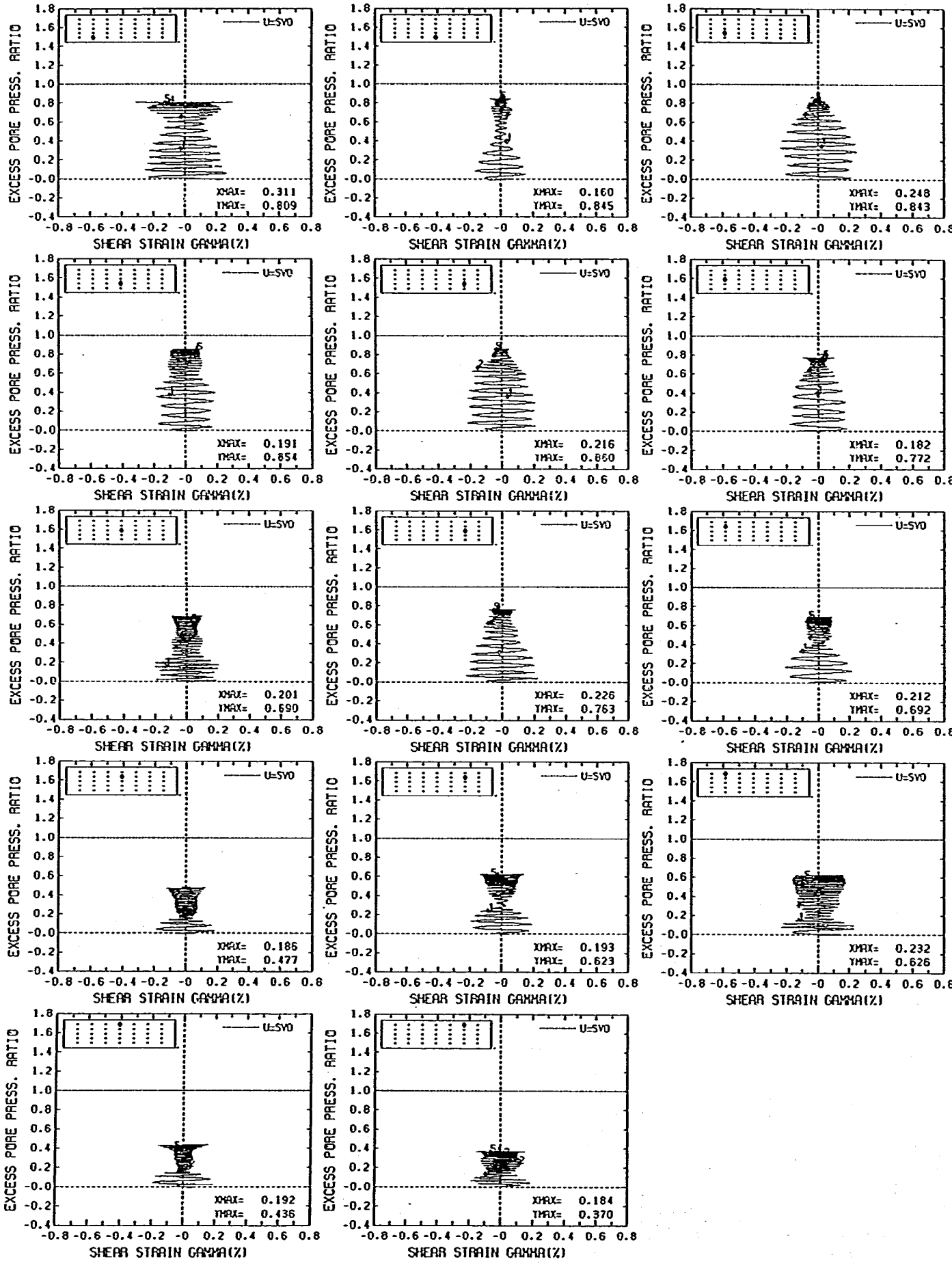
図－5・4・3に横軸に加速度に質量を乗じる方法で計算したせん断応力$\tilde{\tau}$を，その点における有効上載圧σ_{v0}'で正規化したせん断応力比$\tilde{\tau}/\sigma_{v0}'$，縦軸にその計算点に設置してある間隙水圧計によって実測された過剰間隙水圧uを，同じくその点における有効上載圧σ_{v0}'で正規化した過剰間隙水圧比$\tilde{u}/\sigma_{v0}'$をとって，加振後0～6秒後までのデータを示す。図－5・4・4は$\tilde{u}/\sigma_{v0}'$をスムージングした場合のものである。最大せん断応力比は0.41～0.57である。

5．4．3　応力－ひずみ関係

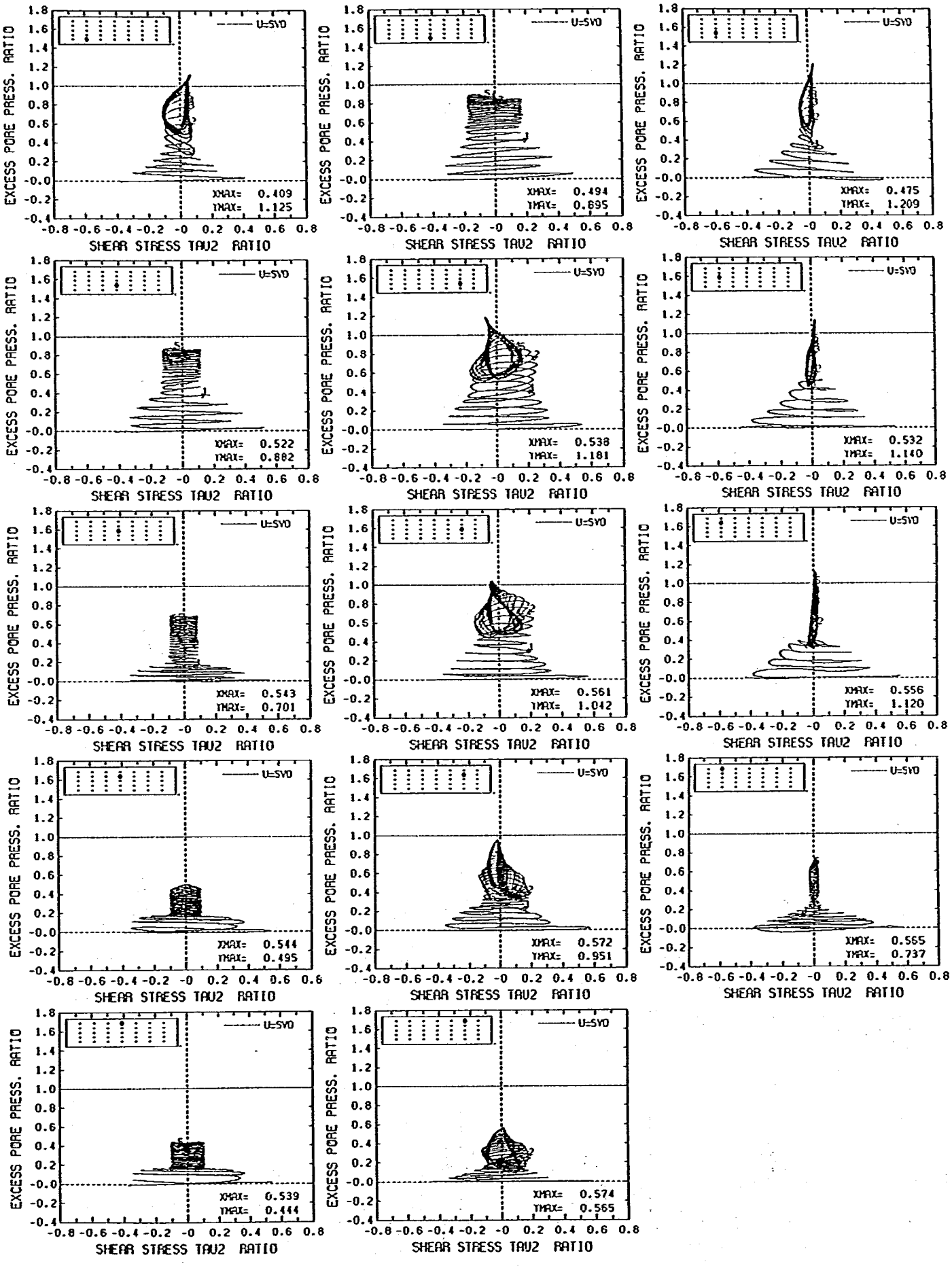
加振後0～6秒の各計算点ごとのせん断応力$\tilde{\tau}$（gf/cm^2）とせん断ひずみ$\tilde{\gamma}$（%）の関係を図－5・4・5に示す。応力－ひずみ関係は全体的にばらつきが大きく，履歴減衰が大きいものが多いほか骨格曲線の傾きが負になっているものも多い。



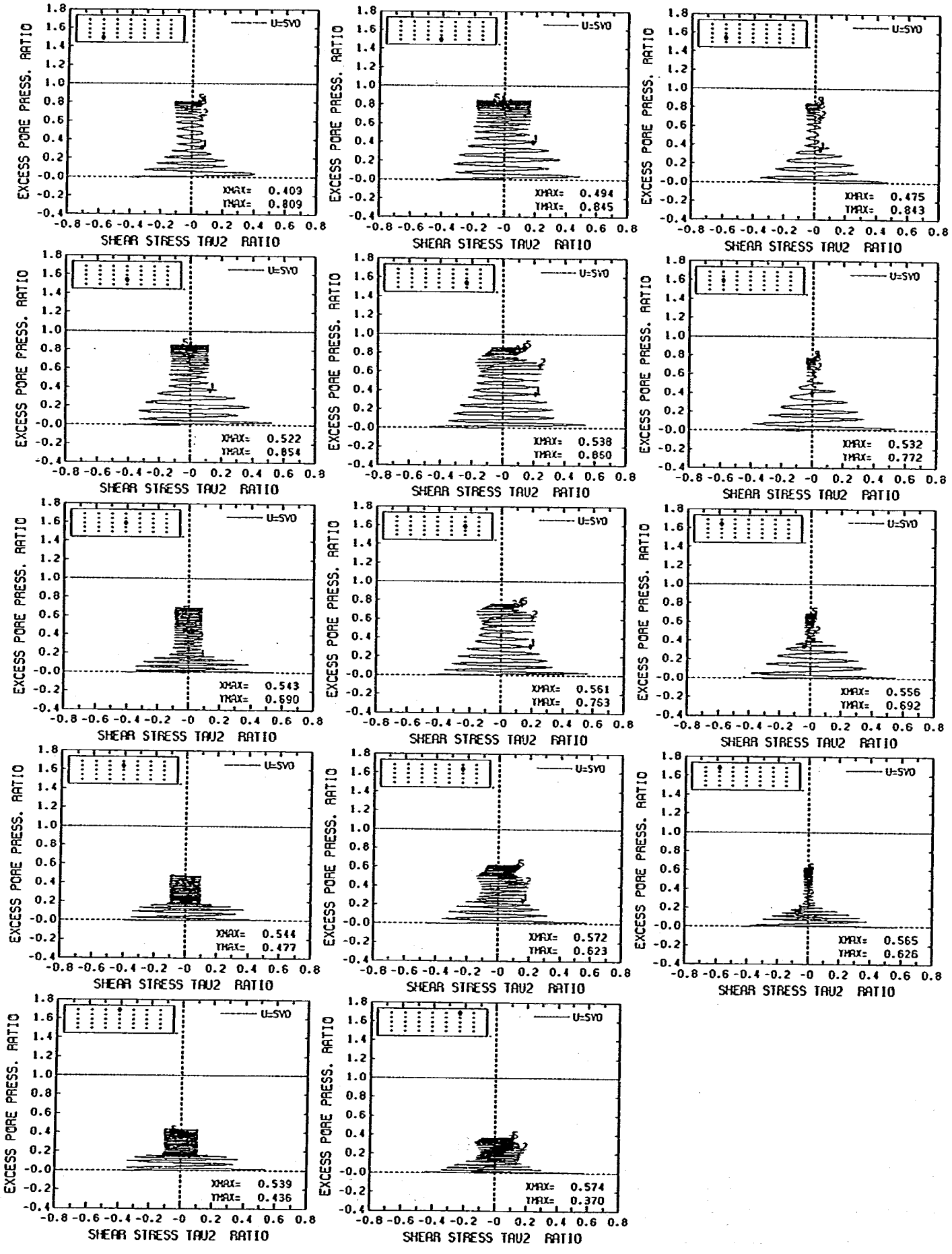
図－５・４・１　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－１）



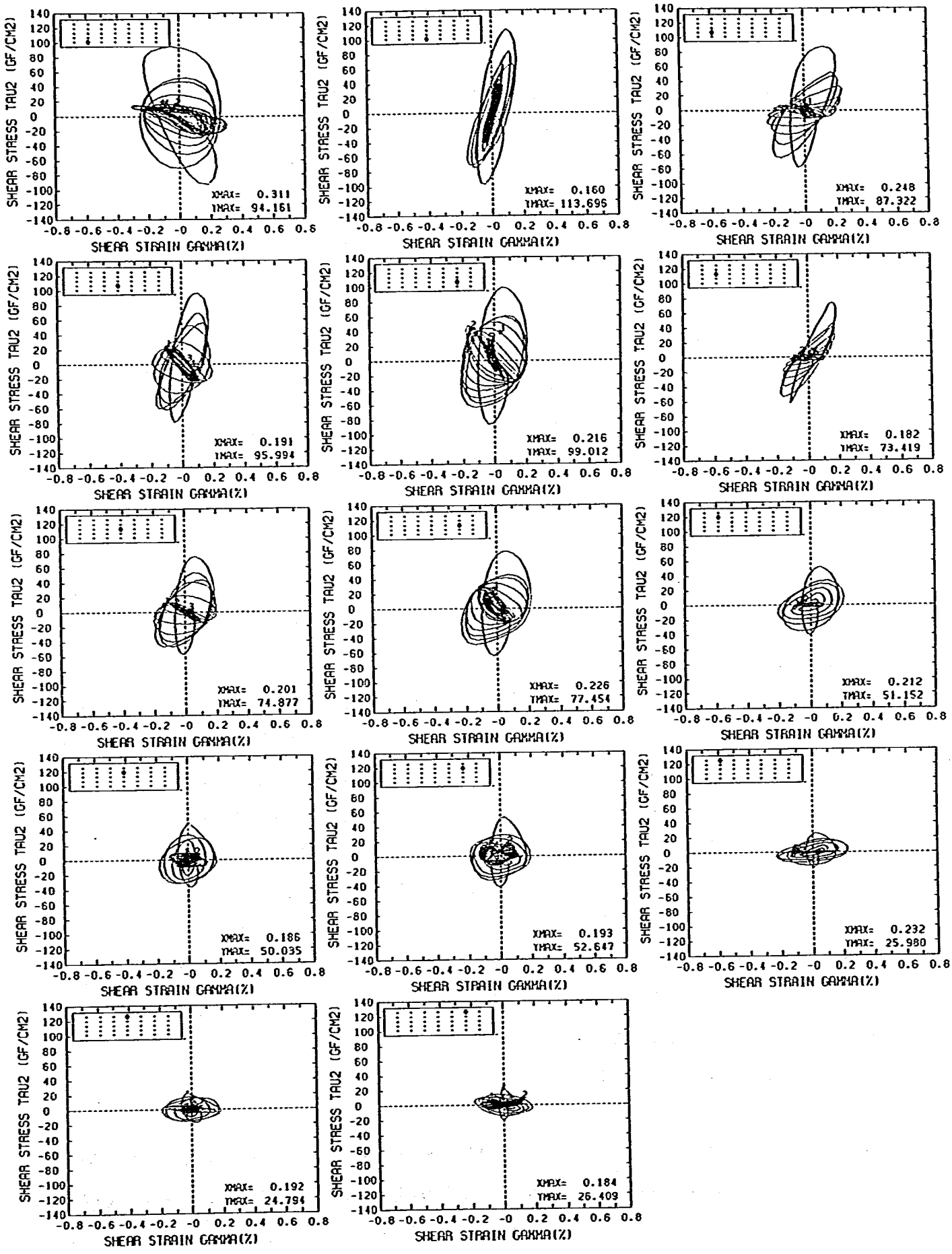
図－５・４・２　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－１）



図－５・４・３　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－１）



図－５・４・４　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－１）



図－５・４・５　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－１）

6．間隙水圧と応力，ひずみの関係

6．1　過剰間隙水圧比，せん断応力比，せん断ひずみの経時変化

6．1．1　過剰間隙水圧比の経時変化

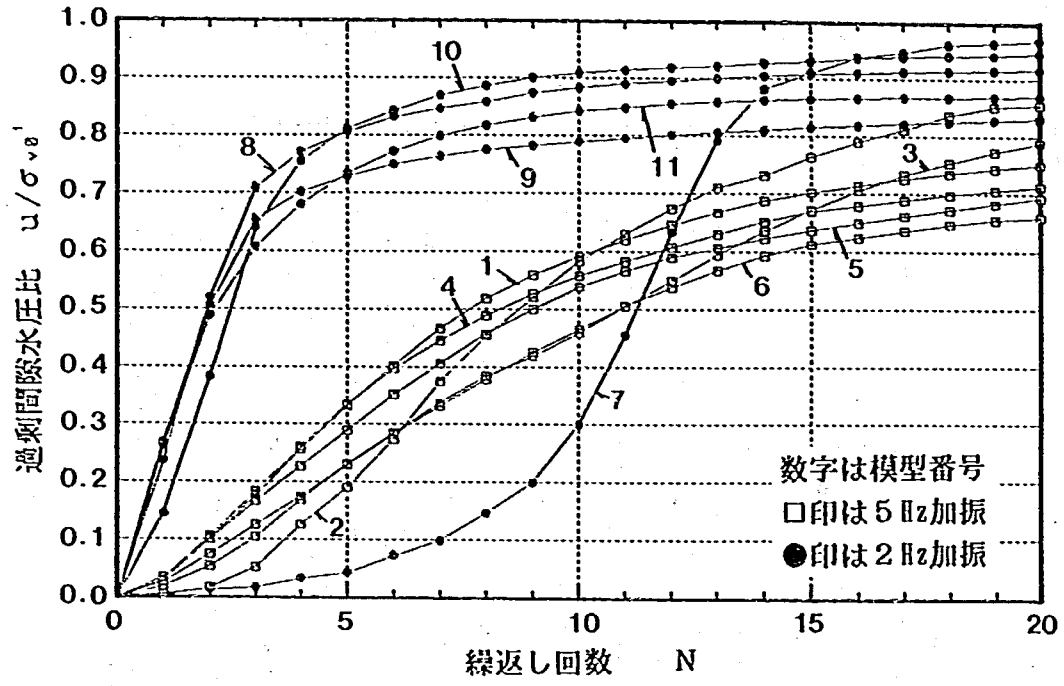
各模型ごとの整理結果から，掘割道路模型や砕石ドレーンの影響が小さいと思われる砂地盤部の過剰間隙水圧は深さ方向にほぼ直線的な分布となって上昇するといえる。これは過剰間隙水圧比が一様に上昇することを意味しており，各時刻ごとの深度分布を直線近似すれば，その勾配 du/dz と初期有効上載圧 $\sigma_{v0}' = \gamma' z$ から過剰間隙水圧比 u/σ_{v0}' は

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'} = \frac{(du/dz)}{\gamma'} \qquad (6.1.1)$$

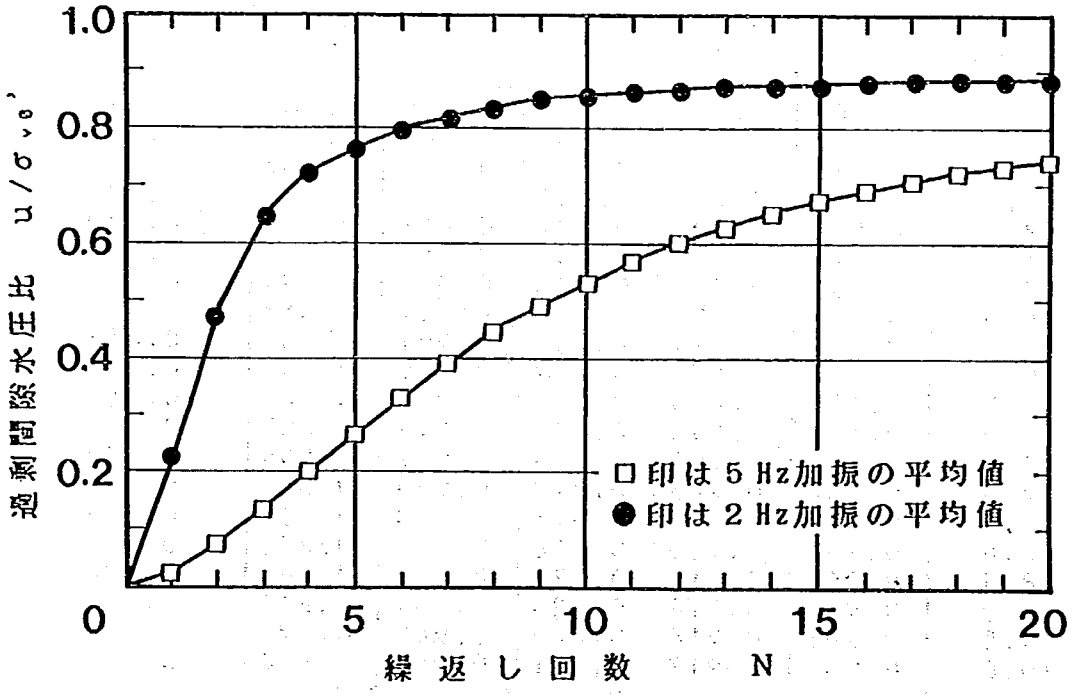
で表わされる。ここに，γ' は土の水中単位体積重量で，地下水面は地表面と一致するものとしている。以降ではこの方法によって整理した過剰間隙水圧比について考察することとする。過剰間隙水圧比の経時変化を図－6・1・1に示す。横軸は繰返し回数Nを表わしているが，間隙水圧の上昇過程を整理する観点からN＝20回までを示している。これは5Hz加振の模型－1～6では加振開始後4秒間，2Hz加振の模型－7～11では加振開始後10秒間に対応し，この範囲であれば砕石ドレーンや地表への間隙水圧の消散の影響を受けていないと考えられる。同図によれば2Hz加振の模型－7がきわだった傾向の違いを見せているほかは加振周波数によって，大きく2つのグループに分けることができると考えられる。したがって，模型－7を除いて加振周波数ごとにまとめて平均値を求めると図－6・1・2，表－6・1・1，表－6・1・2のようになる。5Hz加振の平均値の場合，N＝20で u/σ_{v0}' は0.743 で比較的直線的に増加している。これに対して2Hz加振の平均値の場合，N＝20で u/σ_{v0}' は0.891 とほぼ完全な液状化状態になっているといえる。またその上昇速度も3波目で0.652，6波目で0.799 と急激な立上りとなり，その後はゆるやかな上昇となっている。図－6・1・3は1回の繰返しに対する過剰間隙水圧比の上昇量 $\Delta u/\sigma_{v0}'$ を模型ごとに示したものである。図－6・1・4は $\Delta u/\sigma_{v0}'$ の加振周波数ごとの平均値を示したもので，その最大値 $(\Delta u/\sigma_{v0}')_{max}$ は5Hz加振の場合，4波目の0.067 に対し2Hz加振の場合は2波目の0.248 で5Hz加振に比較して3.7 倍となっている。同図には間隙水圧の上昇に伴う有効上載圧の減少を考慮した1回の繰返しに対する過剰間隙水圧比の上昇量 $\Delta u/\sigma_v'$ を次式で求め合わせて示している。

$$\frac{\Delta u}{\sigma_v'} = \frac{\Delta u}{\sigma_{v0}' - u} = \frac{\Delta u/\sigma_{v0}'}{1 - u/\sigma_{v0}'} \qquad (6.1.2)$$

$\Delta u/\sigma_v'$ は5Hz加振の場合，7波目に最大値0.096 で2～18波目にかけて0.05～0.10の範囲にある。2Hz加振の場合は3波目に最大値0.408 となり間隙水圧の発生が速い影響を大きく受けている。$\Delta u/\sigma_v'$ でみても最大値では4.3 倍となっている。過剰間隙水圧の発生量は加振周波数によって異なり，2Hz加振の方が速いといえる。



図－6・1・1　各模型ごとの過剰間隙水圧比u/σv0'と繰返し回数Nの関係



図－6・1・2　加振周波数ごとの過剰間隙水圧比u/σv0'と繰返し回数Nの関係

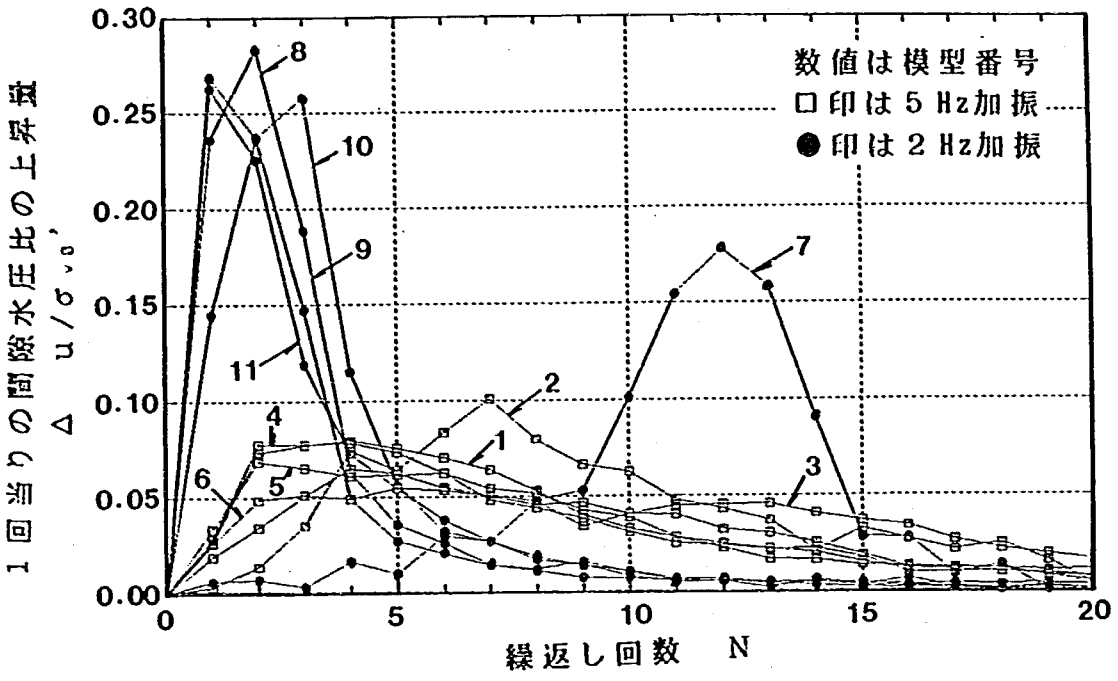
表－６・１・１ 過剰間隙水圧比 u/σ_{v0}' の整理結果（５Ｈｚ加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	MODEL 5	MODEL 6	AVERAGE
1	0.2	0.027	0.003	0.019	0.028	0.033	0.026	0.023
2	0.4	0.100	0.017	0.053	0.106	0.102	0.074	0.075
3	0.6	0.177	0.052	0.104	0.183	0.167	0.125	0.135
4	0.8	0.256	0.126	0.169	0.261	0.228	0.174	0.202
5	1.0	0.331	0.190	0.231	0.334	0.289	0.229	0.267
6	1.2	0.402	0.273	0.286	0.396	0.351	0.282	0.332
7	1.4	0.465	0.374	0.337	0.444	0.405	0.332	0.393
8	1.6	0.518	0.454	0.384	0.488	0.457	0.378	0.446
9	1.8	0.558	0.520	0.418	0.527	0.499	0.424	0.491
10	2.0	0.591	0.582	0.459	0.558	0.538	0.465	0.532
11	2.2	0.620	0.630	0.503	0.583	0.566	0.505	0.568
12	2.4	0.644	0.673	0.549	0.607	0.589	0.537	0.600
13	2.6	0.667	0.710	0.594	0.629	0.606	0.568	0.629
14	2.8	0.687	0.731	0.635	0.651	0.622	0.593	0.653
15	3.0	0.702	0.764	0.672	0.669	0.636	0.612	0.676
16	3.2	0.714	0.790	0.706	0.678	0.649	0.624	0.694
17	3.4	0.725	0.812	0.732	0.688	0.661	0.636	0.709
18	3.6	0.734	0.836	0.754	0.698	0.672	0.647	0.724
19	3.8	0.744	0.852	0.773	0.706	0.683	0.654	0.735
20	4.0	0.750	0.855	0.789	0.713	0.693	0.659	0.743

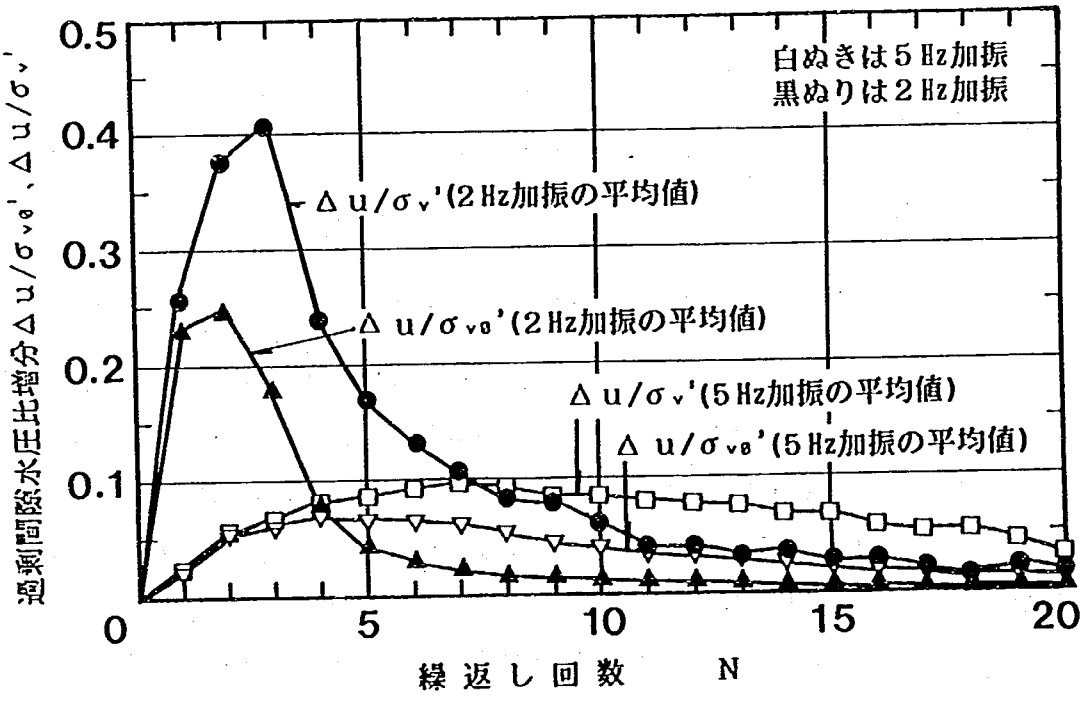
表－６・１・２ 過剰間隙水圧比 u/σ_{v0}' の整理結果（２Ｈｚ加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 7	MODEL 8	MODEL 9	MODEL 10	MODEL 11	AVERAGE *
1	0.5	0.006	0.236	0.269	0.145	0.263	0.228
2	1.0	0.013	0.519	0.506	0.382	0.488	0.474
3	1.5	0.016	0.708	0.653	0.640	0.607	0.652
4	2.0	0.033	0.771	0.702	0.755	0.680	0.727
5	2.5	0.043	0.806	0.729	0.811	0.734	0.770
6	3.0	0.072	0.832	0.749	0.843	0.772	0.799
7	3.5	0.099	0.846	0.763	0.869	0.799	0.819
8	4.0	0.147	0.858	0.775	0.887	0.817	0.834
9	4.5	0.200	0.874	0.782	0.901	0.831	0.847
10	5.0	0.301	0.884	0.789	0.909	0.842	0.856
11	5.5	0.455	0.890	0.795	0.914	0.849	0.862
12	6.0	0.633	0.895	0.801	0.919	0.855	0.868
13	6.5	0.792	0.900	0.806	0.921	0.859	0.872
14	7.0	0.882	0.905	0.810	0.928	0.862	0.876
15	7.5	0.911	0.908	0.815	0.930	0.864	0.879
16	8.0	0.938	0.910	0.818	0.937	0.866	0.883
17	8.5	0.947	0.913	0.822	0.938	0.868	0.885
18	9.0	0.961	0.914	0.825	0.939	0.868	0.887
19	9.5	0.961	0.916	0.829	0.942	0.870	0.889
20	10.0	0.969	0.917	0.831	0.946	0.870	0.891

＊ 模型－７を除く平均値



図－6・1・3　各模型ごとの過剰間隙水圧比増分Δu/σv0'と繰返し回数Nの関係



図－6・1・4　加振周波数ごとの過剰間隙水圧比増分Δu/σv0'、Δu/σv'と繰返し回数Nの関係

6．1．2　せん断応力振幅の経時変化

各模型ごとの整理結果からせん断応力振幅についても過剰間隙水圧と同様に深さ方向に直線的な分布となって変化しているといえる。したがって，せん断応力比τ/σ_{v0}'は直線近似した勾配$d\tau/dz$から

$$\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}=\frac{(d\tau/dz)}{\gamma'} \qquad (6.1.3)$$

で計算できる。以降では過剰間隙水圧比の場合と同じく，この方法によって整理したせん断応力比について考察することとする。繰返し回数20回までのせん断応力振幅の経時変化を図－6・1・5に示す。2Hz加振の模型－7が過剰間隙水圧の場合と同様きわだって異なった経時変化を示している。また，5Hz加振の模型－6も他に比較してピーク値が大きく，ピークからの減少速度が遅いといえる。そのほかは5Hz加振と2Hz加振で顕著な差はないが，間隙水圧の整理に合わせて加振周波数ごとに平均値を求めた。その結果を図－6・1・6，表－6・1・3，表－6・1・4に示す。2Hz加振の平均には模型－7は除いている。

τ/σ_{v0}'は5Hz加振の場合1～3波目に最大値を示し，その値は0.33～0.52であるが，平均値では2波目が最大で0.409となっている。入力加速度200galから次式により土の単位体積重量$\gamma_t=1.91\sim1.94gf/cm^3$（$\gamma'=0.91\sim0.94gf/cm^3$）として算定すると

$$\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}=\frac{(\alpha/g)\gamma_t z}{\gamma' z}=0.421\sim0.428 \qquad (6.1.4)$$

となり，ほぼ一致している。ピーク後は2Hz加振に比較してゆるやかに減少し，10波目で0.15程度，20波目で0.13程度となる。2Hz加振の場合は模型－7を除いていずれも1波目に最大値0.38～0.45を示し，平均値では0.423となっている。同様に入力加速度150galから算定すると

$$\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}=\frac{(\alpha/g)\gamma_t z}{\gamma' z}=0.316\sim0.321 \qquad (6.1.5)$$

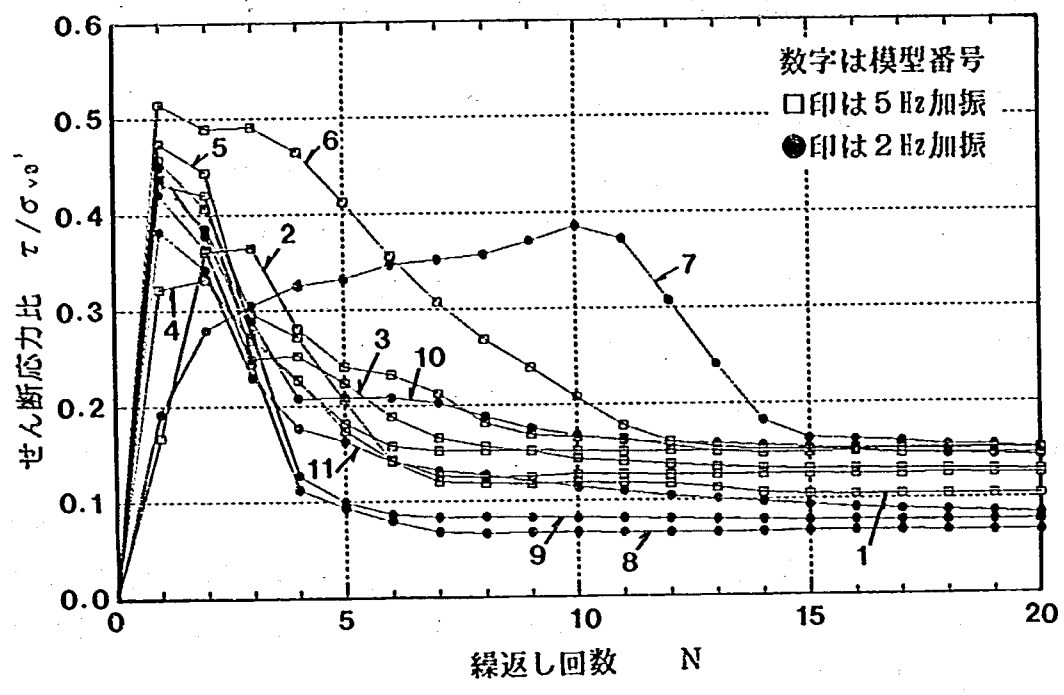
となり，実測値の方が大きくなっている。これは加振レベルは150galの設定であるが，実測加速度波形をみると加振直後に200gal程度となっているものが多く，第1波目の加振レベルは5Hz加振の場合とあまり変わっていないことが原因と思われる。ピーク後は5Hz加振に比較して急激に減少し，5波目で0.14程度，15波目で0.10程度となる。ピーク後の減少速度が速いのは間隙水圧の発生が速いことに対応していると考えられる。

20波目の残留値は5Hz加振の0.134に対して2Hz加振は0.092と小さい。これは継続する加振加速度レベルの違いと考えられるものの，各模型ごとのばらつきも大きく，液状化後の振幅調整に大きく影響されてくると考えられるので残留せん断応力比自体は信頼性は低いと思われる。τ/σ_{v0}'でみた場合，5Hz加振と2Hz加振では加振加速度レベルが前者は200gal，後者は150galと異なり，全体としては200gal加振の方がせん断応力比が大きいといえるが，ピーク値は0.41～0.42でほとんど変わらないといえる。

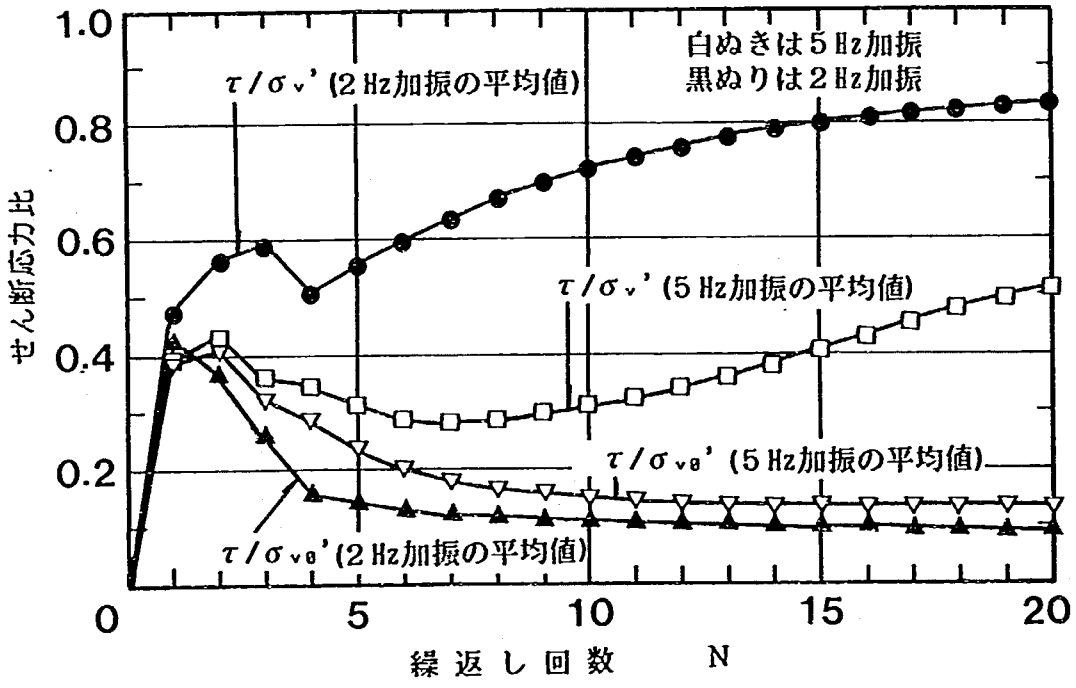
せん断応力比についても間隙水圧の発生に伴う有効上載圧の減少を考慮したτ/σ_v'

$$\frac{\tau}{\sigma_v'} = \frac{\tau}{\sigma_{v0}' - u} = \frac{\tau/\sigma_{v0}'}{1 - u/\sigma_{v0}'} \qquad (6.1.6)$$

について加振周波数ごとに平均した値を図－６・１・６に合わせて示している。τ/σ_v' は５Hz加振の場合，２波目に極大値0.430 となるがこの値は間隙水圧の発生が遅いため τ/σ_{v0}' の最大値とあまり差がない。その後７波目まで徐々に減少して0.283 となって極小値となった後，徐々に増加に転じ20波目では0.516 にまで増加する。一方，２Hz加振の場合は３波目に極大値0.594 に達するが３波目では既にu/σ_{v0}'が0.672 にまで上昇しておりτ/σ_{v0}'の最大値0.423 に比べてかなり大きくなっている。４波目に少し小さくなった後は徐々に増加し20波目には0.840 となっている。ちなみに破壊線の角度ϕを35～40° とすれば$\tau/\sigma_v' = \tan\phi$の取り得る最大値は0.70～0.84であり，上記の値はほぼ上限値となっている。τ/σ_v' でみた場合，極小値を取ってから増加に転じるのはτ/σ_{v0}'が極小値を取った後は増加しないとしてせん断応力振幅を調整した結果の現われであり，誤差を含んだものと考えられる。



図－6・1・5　各模型ごとのせん断応力比τ/σv0'と繰返し回数Nの関係



図－6・1・6　加振周波数ごとのせん断応力比τ/σv0'、τ/σv'と繰返し回数Nの関係

表－６・１・３　せん断応力比τ/σ$_{v0}$'の整理結果（５Ｈｚ加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	MODEL 5	MODEL 6	AVERAGE
1	0.2	0.457	0.167	0.432	0.322	0.475	0.515	0.395
2	0.4	0.406	0.360	0.420	0.332	0.444	0.489	0.409
3	0.6	0.296	0.364	0.249	0.268	0.271	0.491	0.323
4	0.8	0.271	0.281	0.252	0.226	0.228	0.465	0.287
5	1.0	0.205	0.241	0.224	0.181	0.174	0.413	0.239
6	1.2	0.141	0.232	0.188	0.157	0.143	0.355	0.203
7	1.4	0.120	0.212	0.166	0.152	0.126	0.308	0.181
8	1.6	0.118	0.182	0.157	0.152	0.125	0.268	0.167
9	1.8	0.118	0.169	0.152	0.153	0.125	0.239	0.159
10	2.0	0.118	0.166	0.143	0.151	0.127	0.208	0.152
11	2.2	0.118	0.163	0.141	0.151	0.127	0.178	0.146
12	2.4	0.117	0.156	0.137	0.151	0.126	0.161	0.141
13	2.6	0.112	0.150	0.134	0.151	0.126	0.155	0.138
14	2.8	0.106	0.148	0.132	0.151	0.126	0.152	0.136
15	3.0	0.105	0.148	0.132	0.151	0.126	0.152	0.136
16	3.2	0.104	0.149	0.131	0.151	0.126	0.152	0.136
17	3.4	0.104	0.146	0.131	0.151	0.126	0.152	0.135
18	3.6	0.104	0.147	0.131	0.151	0.126	0.153	0.135
19	3.8	0.104	0.146	0.129	0.151	0.126	0.152	0.135
20	4.0	0.104	0.145	0.129	0.151	0.126	0.152	0.134

表－６・１・４　せん断応力比τ/σ$_{v0}$'の整理結果（２Ｈｚ加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 7	MODEL 8	MODEL 9	MODEL 10	MODEL 11	AVERAGE *
1	0.5	0.192	0.421	0.450	0.437	0.382	0.423
2	1.0	0.279	0.364	0.378	0.386	0.342	0.367
3	1.5	0.305	0.244	0.276	0.289	0.229	0.260
4	2.0	0.325	0.112	0.127	0.208	0.177	0.156
5	2.5	0.332	0.093	0.099	0.209	0.163	0.141
6	3.0	0.346	0.079	0.086	0.208	0.141	0.129
7	3.5	0.351	0.068	0.083	0.202	0.132	0.121
8	4.0	0.357	0.066	0.083	0.188	0.127	0.116
9	4.5	0.370	0.067	0.083	0.175	0.120	0.111
10	5.0	0.385	0.067	0.082	0.168	0.114	0.108
11	5.5	0.372	0.066	0.081	0.161	0.110	0.105
12	6.0	0.307	0.066	0.081	0.160	0.104	0.103
13	6.5	0.241	0.066	0.080	0.159	0.101	0.101
14	7.0	0.182	0.066	0.079	0.156	0.098	0.100
15	7.5	0.163	0.067	0.078	0.154	0.094	0.098
16	8.0	0.161	0.067	0.078	0.150	0.091	0.096
17	8.5	0.159	0.067	0.077	0.147	0.089	0.095
18	9.0	0.155	0.066	0.077	0.146	0.087	0.094
19	9.5	0.155	0.066	0.077	0.145	0.086	0.093
20	10.0	0.150	0.066	0.077	0.143	0.084	0.092

＊　模型－７を除く平均値

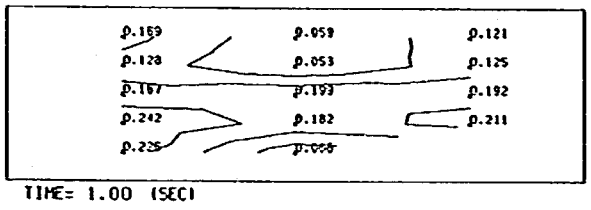
6．1．3　せん断ひずみの経時変化

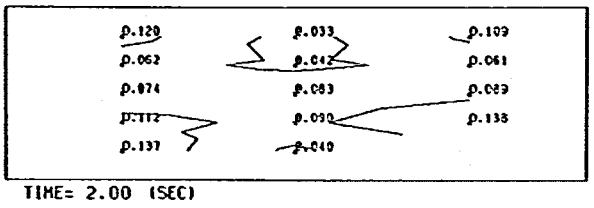
加速度を直接数値積分して求めた変位の深度分布から計算した各測定点ごとのせん断ひずみは，空間分布では深度方向にも水平方向にもばらつきが大きく，またその時間変化のパターンも異なるものが多い。

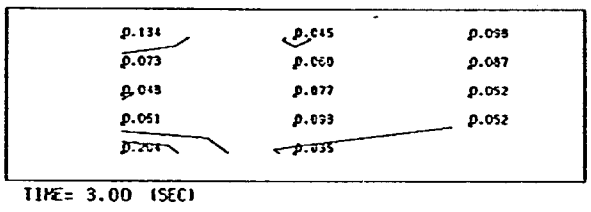
図－6・1・7に模型－1のせん断ひずみ振幅のコンターを示す。図－6・1・8に同じく模型－1の加振開始後0～7秒間のせん断ひずみ振幅の時刻歴を示す。同図によれば1～3波目までは全体が同じような経時変化を示し，その間に最大値0.20～0.25%程度を示すものが多い。そして1～2秒にかけて減少し，その後は地盤下部（□，△印）は横ばいもしくは減少する傾向を示すのに対し，地盤上部（X，※印）は増大する傾向を示すものが多い。すなわち，加振直後は下部のひずみが大きく，液状化後は逆に上部のひずみが大きくなる傾向といえる。しかし，その傾向も全体のばらつきが大きく，また液状化後の加速度波形は著しく増幅するものの深度方向に位相差がほとんどなくなり，計算変位自体は大きくなっても，相対変位は逆に小さくなり，計算されるひずみの精度は低くなっていると考えられること，さらには各模型ごとのばらつきも大きいことから，せん断ひずみの深度分布形状や経時変化をパターン化して整理することは困難であると考えられる。

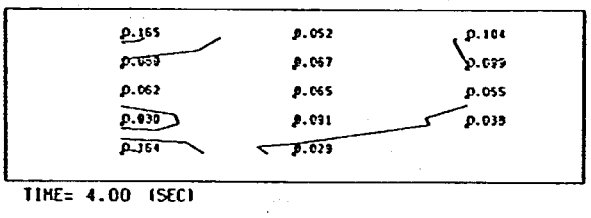
ここでは，各測定点の計算ひずみを単純平均して各模型の平均的なせん断ひずみ振幅を整理した。繰返し回数20回までのせん断ひずみ振幅の経時変化を図－6・1・9に示す。せん断ひずみの場合も模型－7がきわだって異なっているほか模型－8のピーク後の減少量が大きいといえる。5Hz加振に比較して2Hz加振の方が明らかに大きなせん断ひずみ振幅であり，加振周波数による差があるといえる。したがって，せん断ひずみについても模型－7を除いて加振周波数ごとに平均値を整理した。その結果を図－6・1・10，表－6・1・5，表－6・1・6に示す。

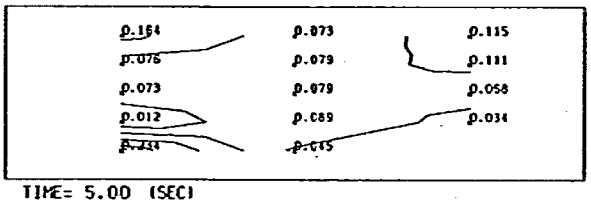
5Hz加振の平均値は4波目でピーク値0.202% を示し，その後，ゆるやかに減少して20波目の残留値は0.145% である。2Hz加振の平均値は3波目でピーク値0.672% を示し，その後の減少は同じくゆるやかで20波目の残留値は0.533% である。ピーク値は5Hz加振の3.3 倍で1回の繰返しによる間隙水圧発生量の最大値 $(\Delta u/\sigma_{v0}')_{max}$ が3.7 倍であることに対応していると思われる。

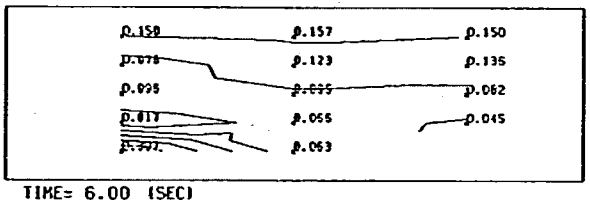


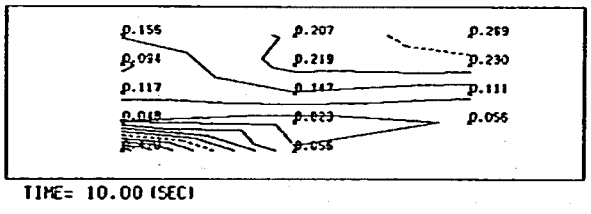


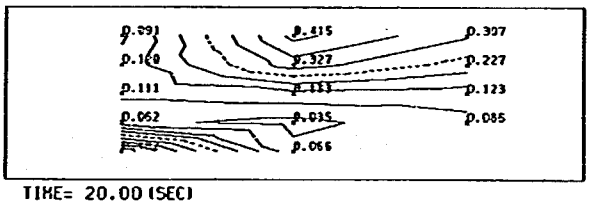


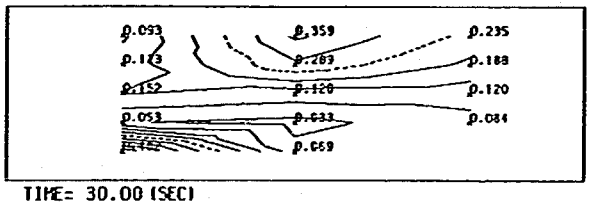


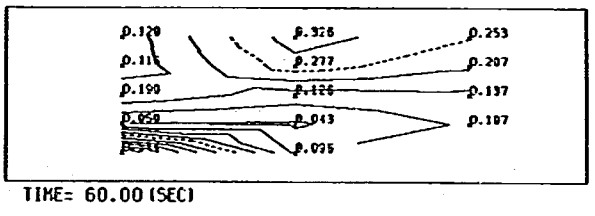




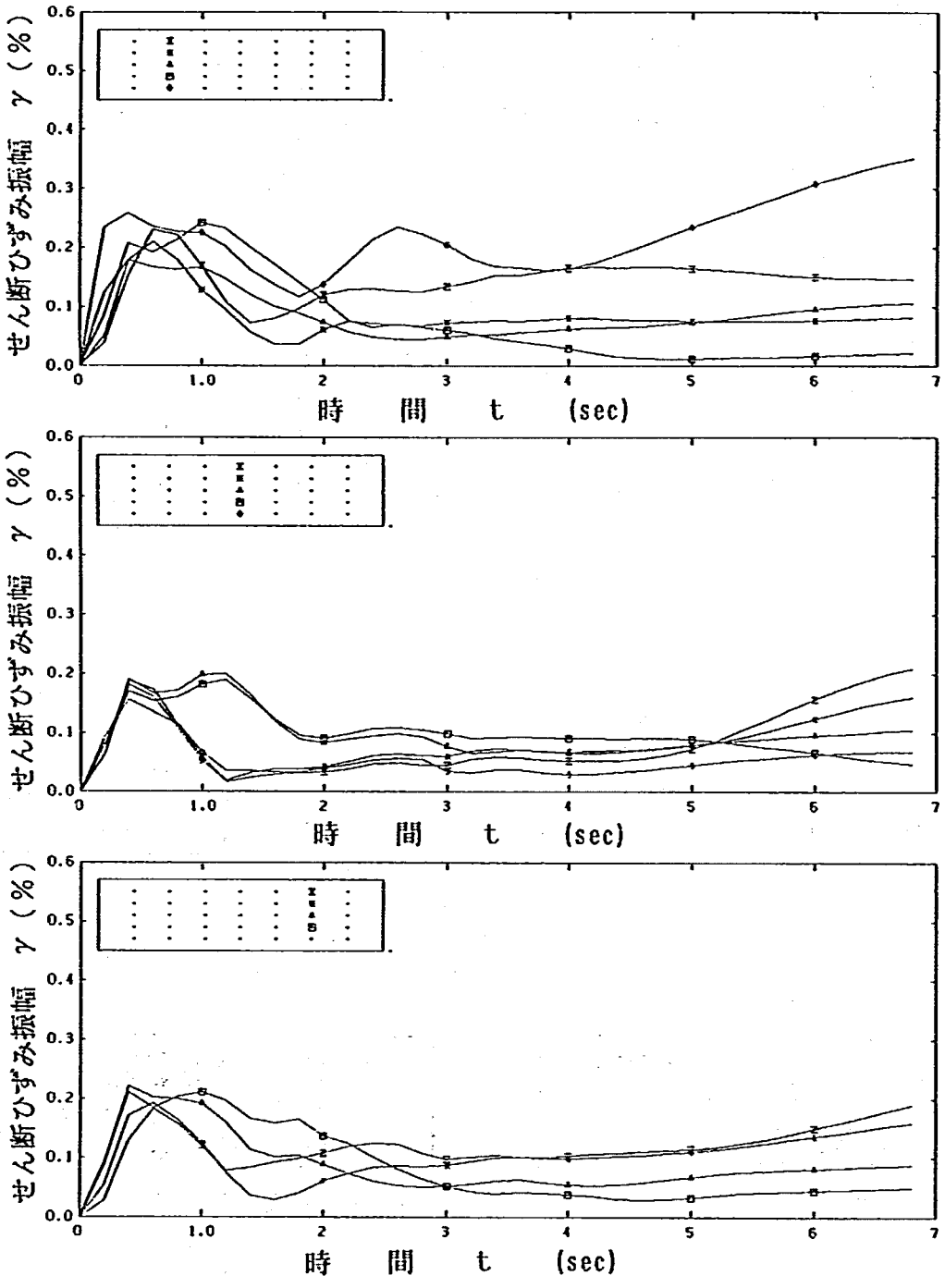




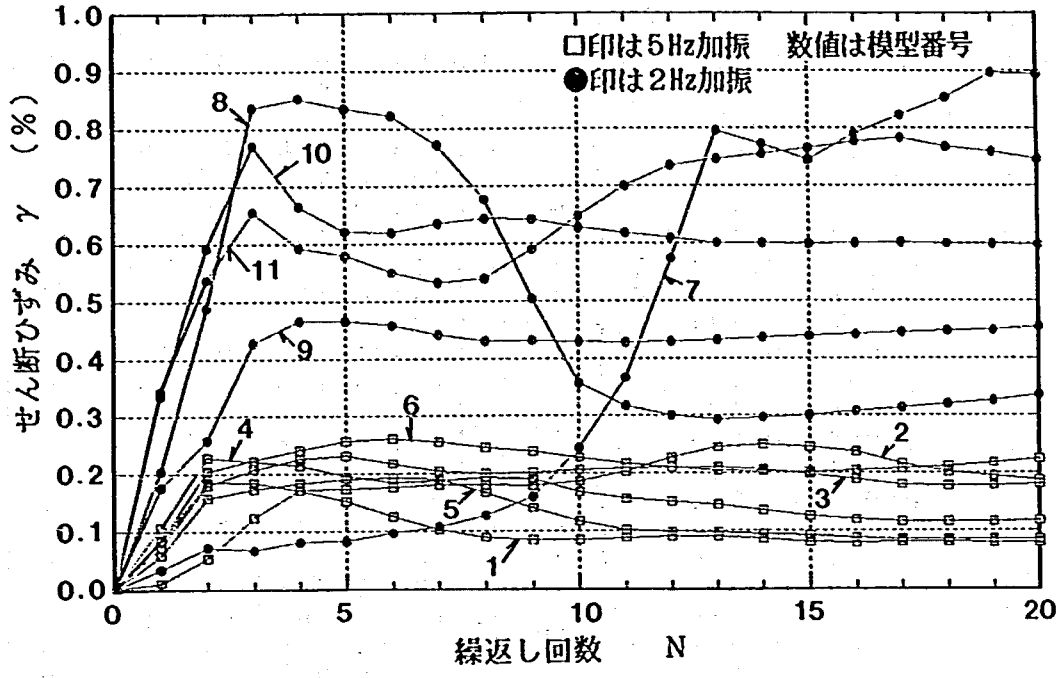




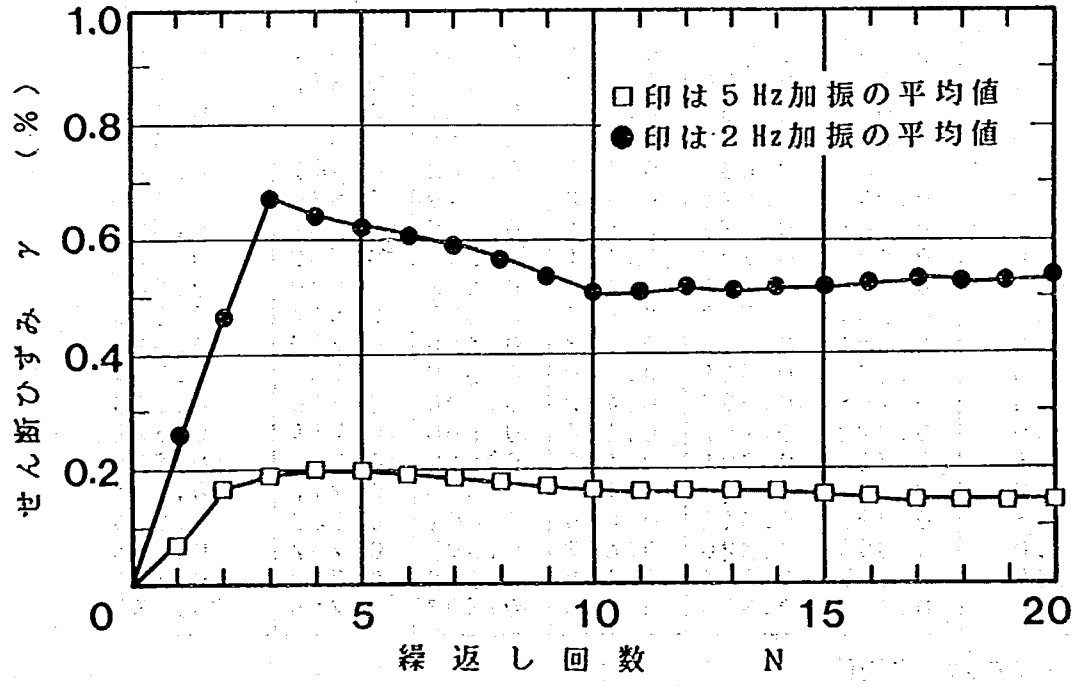
図－６・１・７　せん断ひずみ振幅γ（％）のコンター図（ピッチ０．０５％、模型－１）



図－６・１・８　各計算点のせん断ひずみ振幅の経時変化（加振開始後０～７秒、模型－１）



図－6・1・9　各模型ごとのせん断ひずみγ（%）と繰返し回数Nの関係



図－6・1・10　加振周波数ごとのせん断ひずみγ（%）と繰返し回数Nの関係

表－6・1・5　せん断ひずみγ（%）の整理結果（5Hz加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 1	MODEL 2	MODEL 3	MODEL 4	MODEL 5	MODEL 6	AVERAGE
1	0.2	0.084	0.010	0.073	0.107	0.058	0.086	0.070
2	0.4	0.186	0.054	0.181	0.229	0.158	0.204	0.169
3	0.6	0.185	0.124	0.208	0.222	0.173	0.224	0.189
4	0.8	0.171	0.173	0.226	0.215	0.184	0.241	0.202
5	1.0	0.153	0.173	0.232	0.196	0.191	0.257	0.200
6	1.2	0.126	0.176	0.218	0.185	0.194	0.261	0.193
7	1.4	0.103	0.181	0.204	0.188	0.191	0.255	0.187
8	1.6	0.090	0.181	0.200	0.193	0.167	0.246	0.179
9	1.8	0.084	0.179	0.201	0.191	0.140	0.238	0.172
10	2.0	0.085	0.186	0.206	0.167	0.117	0.228	0.165
11	2.2	0.088	0.203	0.209	0.156	0.102	0.217	0.162
12	2.4	0.090	0.227	0.210	0.151	0.098	0.211	0.164
13	2.6	0.091	0.245	0.210	0.145	0.097	0.205	0.165
14	2.8	0.086	0.249	0.206	0.136	0.095	0.202	0.162
15	3.0	0.081	0.246	0.198	0.126	0.091	0.202	0.157
16	3.2	0.079	0.237	0.189	0.119	0.087	0.205	0.153
17	3.4	0.081	0.216	0.180	0.116	0.085	0.208	0.148
18	3.6	0.081	0.202	0.178	0.116	0.085	0.211	0.145
19	3.8	0.079	0.194	0.178	0.116	0.085	0.218	0.145
20	4.0	0.079	0.188	0.180	0.117	0.085	0.224	0.145

表－6・1・6　せん断ひずみγ（%）の整理結果（2Hz加振）

N	TIME (SEC)	MODEL 7	MODEL 8	MODEL 9	MODEL 10	MODEL 11	AVERAGE *
1	0.5	0.034	0.205	0.176	0.336	0.344	0.265
2	1.0	0.072	0.488	0.258	0.593	0.537	0.469
3	1.5	0.067	0.836	0.428	0.771	0.655	0.672
4	2.0	0.081	0.853	0.465	0.664	0.592	0.644
5	2.5	0.083	0.835	0.465	0.622	0.579	0.625
6	3.0	0.097	0.823	0.458	0.619	0.550	0.613
7	3.5	0.108	0.772	0.441	0.635	0.532	0.595
8	4.0	0.128	0.677	0.431	0.643	0.539	0.572
9	4.5	0.159	0.504	0.431	0.642	0.589	0.542
10	5.0	0.244	0.357	0.429	0.627	0.647	0.515
11	5.5	0.366	0.317	0.428	0.618	0.700	0.516
12	6.0	0.573	0.301	0.429	0.609	0.735	0.519
13	6.5	0.796	0.293	0.432	0.600	0.746	0.518
14	7.0	0.772	0.297	0.436	0.600	0.754	0.522
15	7.5	0.745	0.301	0.438	0.599	0.765	0.526
16	8.0	0.791	0.308	0.441	0.600	0.777	0.531
17	8.5	0.823	0.314	0.444	0.601	0.783	0.536
18	9.0	0.854	0.320	0.447	0.599	0.767	0.533
19	9.5	0.897	0.326	0.448	0.598	0.760	0.533
20	10.0	0.894	0.336	0.454	0.597	0.746	0.533

＊　模型－7を除く平均値

6．2　間隙水圧の発生特性の考察

前節では繰返し回数に対する過剰間隙水圧の発生量が加振周波数によって異なることを示し加振周波数ごとに平均した過剰間隙水圧比，せん断応力比，せん断ひずみについて整理した。後の考察のためにもう一度その整理結果を表－6・2・1に示す。ここではこれらの関係について考察する。

6．2．1　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係

1回の繰返しに対する間隙水圧の上昇量$\Delta u/\sigma_{v0}'$とせん断応力比τ/σ_{v0}'の関係を図－6・2・1に示す。5Hz加振の場合，2～7波にかけて$\Delta u/\sigma_{v0}'$が一定のもとでτ/σ_{v0}'が減少し水平に左へ移動し，その後は左下へ向かって両者とも減少している。2Hz加振の場合は2～20波にかけてほぼ直線的に両者とも減少している。この直線的な部分を次式によって表わす。

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{v0}'} = a\left(\frac{\tau}{\sigma_{v0}'} - b\right) \qquad (6.2.1)$$

勾配aは5Hz加振の8～13波に対して0.815、2Hz加振の2～20波に対して0.950 で大きな差はない。また係数bは同じく5Hz加振に対して0.102、2Hz加振に対して0.094 となる。係数bはこれ以上のせん断応力比が作用しないと間隙水圧が発生しない値を表わしている。直線的な近似ができる5Hz加振の8波目，2Hz加振の2波目のu/σ_{v0}'はそれぞれ0.446，0.474で，この値は間隙水圧の発生に伴い，モールの応力円が破壊線に接しはじめる値に近いものになっている。破壊線の角度ϕを35～40° とすれば

$$\frac{1+K_0}{2} - \frac{1-K_0}{2}\cdot\frac{1}{\sin\phi} = 0.314\sim0.361 \qquad (6.2.2)$$

が破壊線に接しはじめる限界の過剰間隙水圧比である。

5Hz加振と2Hz加振で直線的な部分のみをとれば係数に大きな差はないが，5Hz加振の1～7波目の傾向を説明することは困難である。

同じくせん断応力比と過剰間隙水圧比の関係，を分母に間隙水圧の上昇に伴う有効上載圧の減少を考慮したσ_v'をとって整理すると図－6・2・2のようになる。5Hz加振の場合，2～7波にかけて左上りに推移し8波目以降は逆に右下りにほぼ同じ直線上を戻るような挙動をとる。このことはやはり7波目（$u/\sigma_{v0}'=0.393$）で応力空間上の挙動が変化していることが考えられる。一方，2Hz加振の場合は1～3波目にかけて右上り推移し，4波目に急激に1波目とほぼ同じ位置に戻り，その後は右下りに推移している。τ/σ_v'とu/σ_v'が右下り（左上り）の関係にあることはせん断応力比が大きくなれば発生間隙水圧量が小さくなることを示しており，このことは，応力比の重ね合せではうまく説明できない現象である。τ/σ_v'～u/σ_v'空間上で左側の包絡線とみなせる2Hz加振の2波目と5Hz加振の7波目を直線で表わすと勾配a＝1.00，係数b＝0.187 となる。勾配はτ/σ_{v0}'～$\Delta u/\sigma_{v0}'$に対して求めたものと大きな差はないが係数bについて

は約2倍の値となっている。

各模型ごとの累積せん断応力比$\Sigma(\tau/\sigma_{v0}')$と過剰間隙水圧比$u/\sigma_{v0}'$の関係を図－6・2・3に示す。累積せん断応力比は各繰返しにおけるせん断応力比を単純に重ね合わせたもので，単調増加関数である。同図からも模型－6および模型－7の傾向が違うようであるが，その他はやはり加振周波数によってグループ分けができると考えられる。図－6・2・4に加振周波数ごとに平均したものを示す。5 Hz加振の5～10波目および2 Hz加振の1～5波目は直線的な関係にあるといえるが，その勾配は異なったものとなっている。

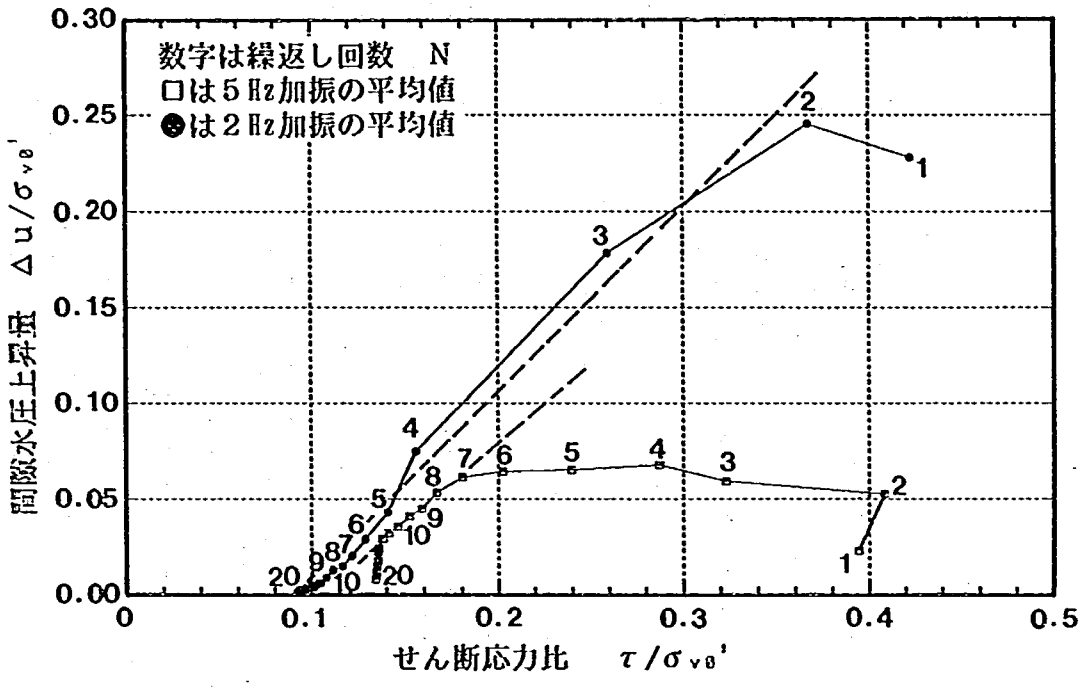
以上の考察から，ある値以上のせん断応力比が作用しないと間隙水圧が発生しない限界値が存在しそうであること，また，1回の繰返しに対する間隙水圧の発生量についてもせん断応力比との関係で最大値が規定されていることなどが推測される。しかし，全加振領域を通じて統一的に間隙水圧上昇量をせん断応力比とその繰返し回数からのみでは説明することは困難であると考えられる。

表－６・２・１　データ整理結果（５Ｈｚ加振の平均値）

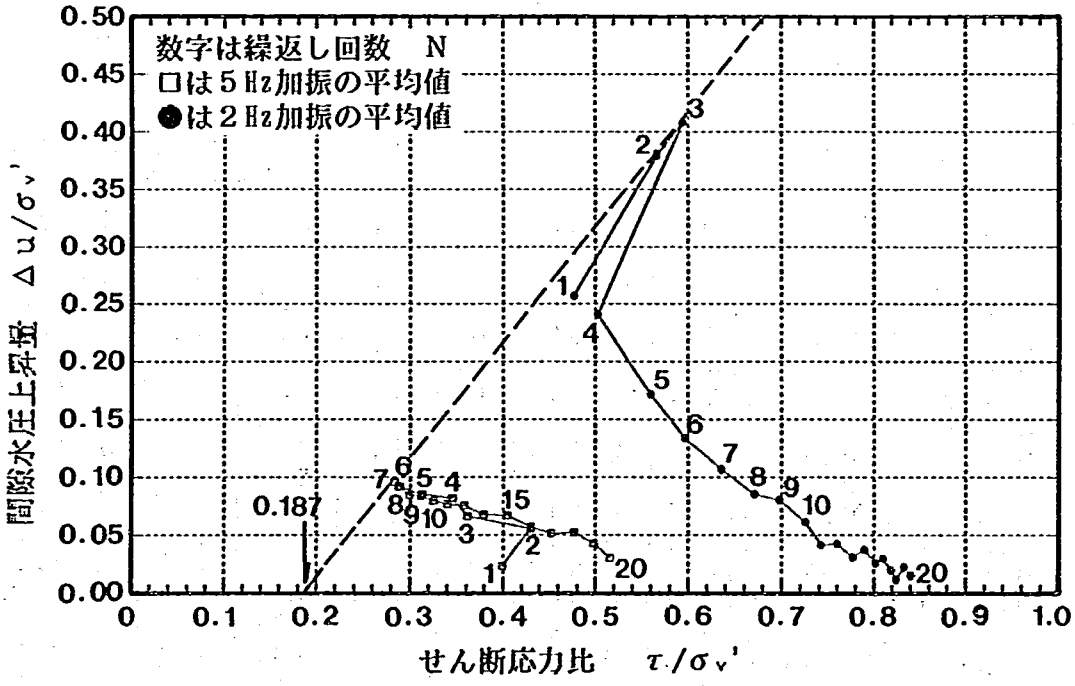
繰返し回数 N	過剰間隙水圧比			せん断応力比			せん断ひずみ（%）	
	$\frac{u}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\Delta u}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\Delta u}{\sigma_v'}$	$\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\tau}{\sigma_v'}$	$\Sigma\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}$	γ	$\Sigma\gamma$
1	0.023	0.023	0.023	0.395	0.399	0.395	0.070	0.070
2	0.075	0.053	0.055	0.409	0.430	0.803	0.169	0.238
3	0.135	0.059	0.066	0.323	0.361	1.126	0.189	0.428
4	0.202	0.068	0.081	0.287	0.345	1.414	0.202	0.629
5	0.267	0.065	0.085	0.239	0.313	1.653	0.200	0.829
6	0.332	0.064	0.092	0.203	0.290	1.856	0.193	1.023
7	0.393	0.061	0.096	0.181	0.283	2.037	0.187	1.210
8	0.446	0.054	0.092	0.167	0.288	2.204	0.179	1.389
9	0.491	0.045	0.084	0.159	0.299	2.363	0.172	1.561
10	0.532	0.041	0.084	0.152	0.312	2.515	0.165	1.726
11	0.568	0.036	0.079	0.146	0.325	2.661	0.162	1.889
12	0.600	0.032	0.077	0.141	0.340	2.803	0.164	2.053
13	0.629	0.029	0.075	0.138	0.358	2.941	0.165	2.218
14	0.653	0.024	0.068	0.136	0.379	3.077	0.162	2.381
15	0.676	0.022	0.067	0.136	0.404	3.212	0.157	2.538
16	0.694	0.018	0.057	0.136	0.430	3.348	0.153	2.691
17	0.709	0.015	0.051	0.135	0.452	3.483	0.148	2.838
18	0.724	0.015	0.052	0.135	0.477	3.618	0.145	2.984
19	0.735	0.012	0.043	0.135	0.498	3.753	0.145	3.129
20	0.743	0.008	0.030	0.134	0.516	3.888	0.145	3.274

表－６・２・２　データ整理結果（模型－７を除く２Ｈｚ加振の平均値）

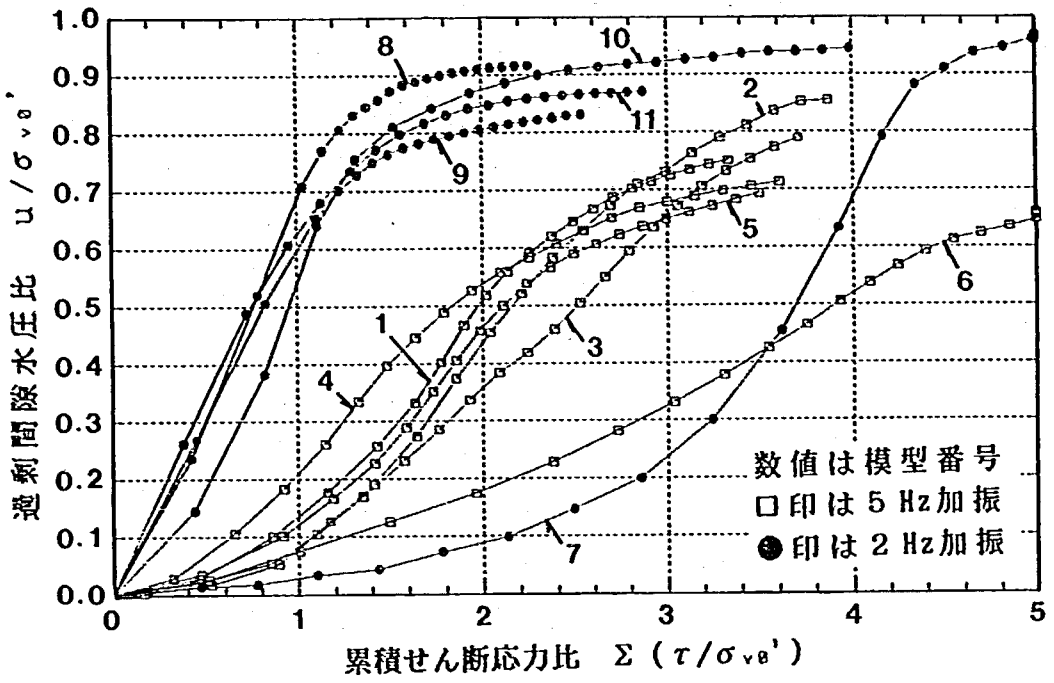
繰返し回数 N	過剰間隙水圧比			せん断応力比			せん断ひずみ（%）	
	$\frac{u}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\Delta u}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\Delta u}{\sigma_v'}$	$\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}$	$\frac{\tau}{\sigma_v'}$	$\Sigma\frac{\tau}{\sigma_{v0}'}$	γ	$\Sigma\gamma$
1	0.228	0.228	0.258	0.423	0.477	0.423	0.265	0.265
2	0.474	0.246	0.379	0.367	0.566	0.790	0.469	0.734
3	0.652	0.178	0.408	0.260	0.594	1.049	0.672	1.407
4	0.727	0.075	0.241	0.156	0.503	1.206	0.644	2.050
5	0.770	0.043	0.172	0.141	0.560	1.346	0.625	2.675
6	0.799	0.029	0.134	0.129	0.597	1.475	0.613	3.288
7	0.819	0.020	0.107	0.121	0.636	1.596	0.595	3.883
8	0.834	0.015	0.085	0.116	0.671	1.712	0.572	4.456
9	0.847	0.013	0.081	0.111	0.698	1.824	0.542	4.997
10	0.856	0.009	0.061	0.108	0.726	1.931	0.515	5.513
11	0.862	0.006	0.041	0.105	0.742	2.036	0.516	6.028
12	0.868	0.006	0.042	0.103	0.760	2.139	0.519	6.547
13	0.872	0.004	0.031	0.101	0.777	2.240	0.518	7.065
14	0.876	0.005	0.037	0.100	0.790	2.340	0.522	7.587
15	0.879	0.003	0.026	0.098	0.802	2.438	0.526	8.112
16	0.883	0.004	0.030	0.096	0.810	2.534	0.531	8.644
17	0.885	0.002	0.020	0.095	0.819	2.629	0.536	9.179
18	0.887	0.001	0.012	0.094	0.824	2.723	0.533	9.712
19	0.889	0.003	0.023	0.093	0.833	2.817	0.533	10.245
20	0.891	0.002	0.015	0.092	0.840	2.909	0.533	10.779



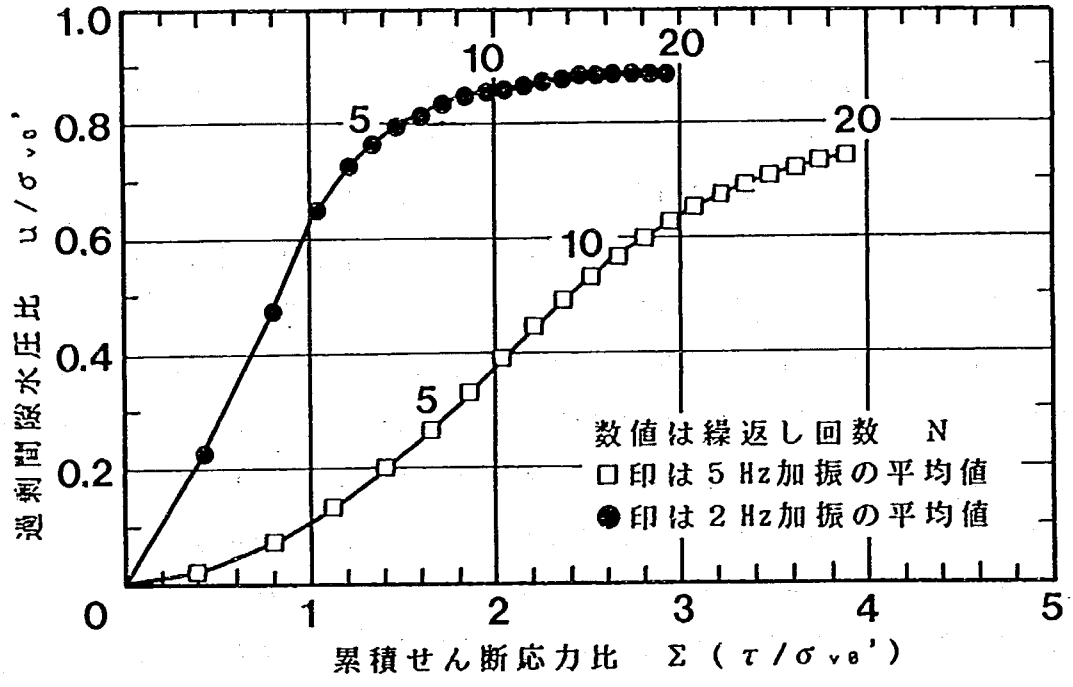
図－６・２・１　加振周波数ごとのτ/σv0'とΔu/σv0'の関係



図－６・２・２　加振周波数ごとのτ/σv'とΔu/σv'の関係



図－6・2・3　各模型ごとのΣ（τ/σv0'）とu/σv0'の関係



図－6・2・4　加振周波数ごとのΣ（τ/σv0'）とu/σv0'の関係

6．2．2　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係

1回の繰返しに対する過剰間隙水圧比の上昇量$\Delta u/\sigma_{v0}'$とせん断ひずみ振幅γの関係を図－6・2・5に示す。5Hz加振の場合，1～4波にかけて右上りに推移し，その後は左下りに戻るような動きであるが，勾配は大きく異なっている。2Hz加振の場合は1～3波にかけてせん断ひずみのみが増大する水平方向の動きとなり，その後はひずみの減少は小さいものの$\Delta u/\sigma_{v0}'$は急激に減少している。間隙水圧の上昇量を分母にσ_v'をとって整理しなおすと図－6・2・6のようになる。図－6・2・5と顕著な差はみられない。全体として2Hz加振の方がせん断ひずみ，間隙水圧上昇量とも大きく，両者の接点は見い出せない形となっている。いずれにしろγ～$\Delta u/\sigma_{v0}'$の関係で直線的な部分がないことは，せん断応力比との関係と同様，せん断ひずみとの関係においても線形的な重ね合わせ，繰返し回数との関係だけではうまく説明できないことを示している。それぞれの加振周波数の第1波目どうしを結ぶ直線は，間隙水圧の上昇の履歴を受けていない時点での間隙水圧の立上り時のひずみに対する関係であるが，その直線の式は

$$\left(\frac{\Delta u/\sigma_{v0}'}{\gamma}\right)_{u=0}=1.05(\gamma-0.048)\qquad(\gamma：\%)\qquad(6.2.3)$$

$$\left(\frac{\Delta u/\sigma_{v}'}{\gamma}\right)_{u=0}=1.21(\gamma-0.051)\qquad(\gamma：\%)\qquad(6.2.4)$$

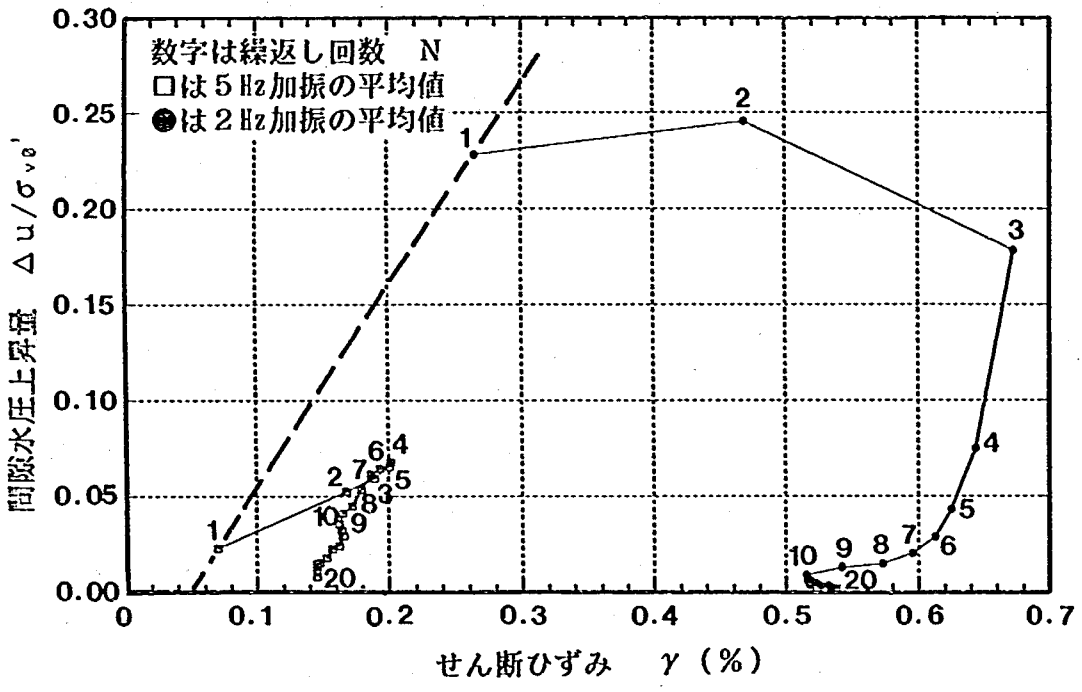
と書ける。係数0.048%，0.051%はいずれもこれ以上のせん断ひずみが作用しないと間隙水圧が発生しない限界のせん断ひずみ振幅を表わしていると考えられる。σ_{v0}'で正規化した場合もσ_v'で正規化した場合もこの直線より左側にプロット点は存在しない。またσ_{v0}'で正規化した場合では繰返し回数を追うごとに横軸上の切片（0.048%）とプロット点を結ぶ直線の勾配は一様に小さくなる傾向になっている。このことは間隙水圧が上昇すればするほど同じ大きさの1回のせん断ひずみに対する間隙水圧の上昇量が小さくなることを表わしている。

各模型ごとの累積せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係を図－6・2・7に示す。累積せん断ひずみ$\Sigma\gamma$は各繰返し時のせん断ひずみ振幅を単純に重ね合わせたものである。過剰間隙水圧比やせん断応力比，あるいはそれらの関係を整理したグラフではすべてで著しく傾向が異なった模型－7，せん断応力比が大きかった模型－6，せん断ひずみの減少が大きかった模型－8についても図－6・2・7の中では顕著な差とはなっていない。各模型ごとのばらつきは大きいものの，これまで区分できたような加振周波数によるグループ分けが明確にはできないような形になっている。このことは間隙水圧の上昇量を累積せん断ひずみあるいはこれに類するパラメータで統一的に整理できる可能性があることを示していると思われる。図－6・2・8は加振周波数ごとに平均した累積せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係を示したものである。全体として2Hz加振の方が間隙水圧比が大きく，初期の立上りも大きいなど差が残っている。図－6・2・5で第1波目のγと$\Delta u/\sigma_{v0}'$の関係から，間隙水圧の上昇に寄与しない成分が存在しそうなことを示した

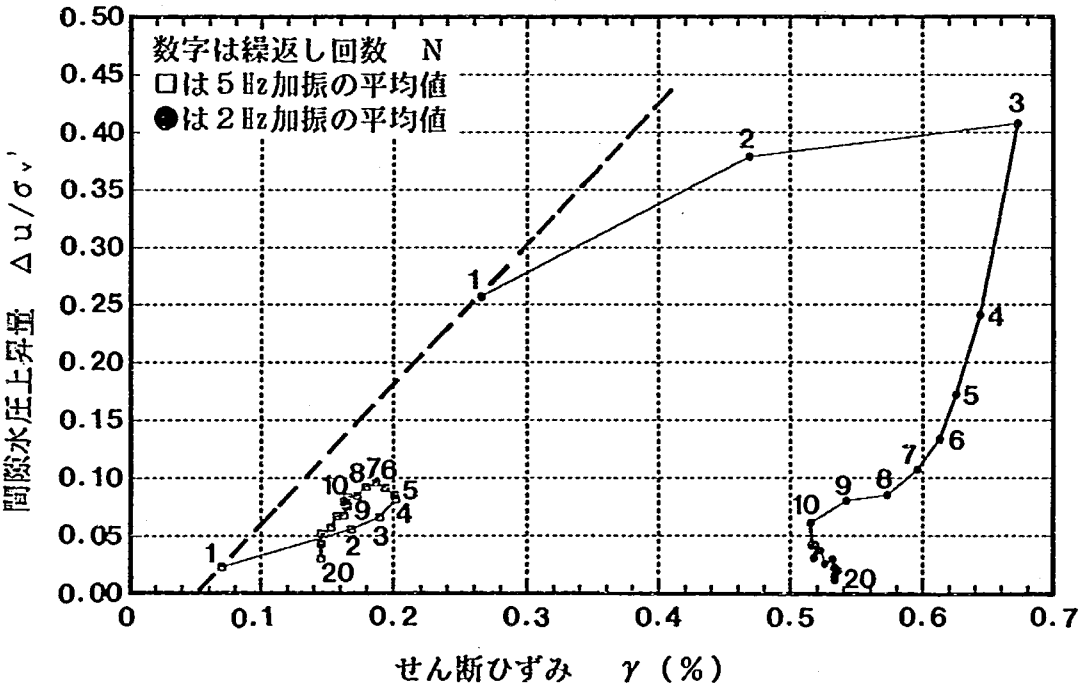
が，各繰返し時のγからその値γ_eを差引いて実効累積せん断ひずみ$\Sigma(\gamma-\gamma_e)$と呼ぶものを考える。いま，このγ_eの値を0.05%として実効累積せん断ひずみと過剰間隙水圧の関係に整理しなおすと図－６・２・９のようになる。$\Sigma(\gamma-\gamma_e)$の小さい範囲ではいくぶん差があるものの５Hz加振の20波目以降と２Hz加振の５波目以降はよく一致している。これらの関係を次の双曲線式

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'}=\frac{\Sigma(\gamma-\gamma_e)}{a\Sigma(\gamma-\gamma_e)+b} \qquad (6.2.5)$$

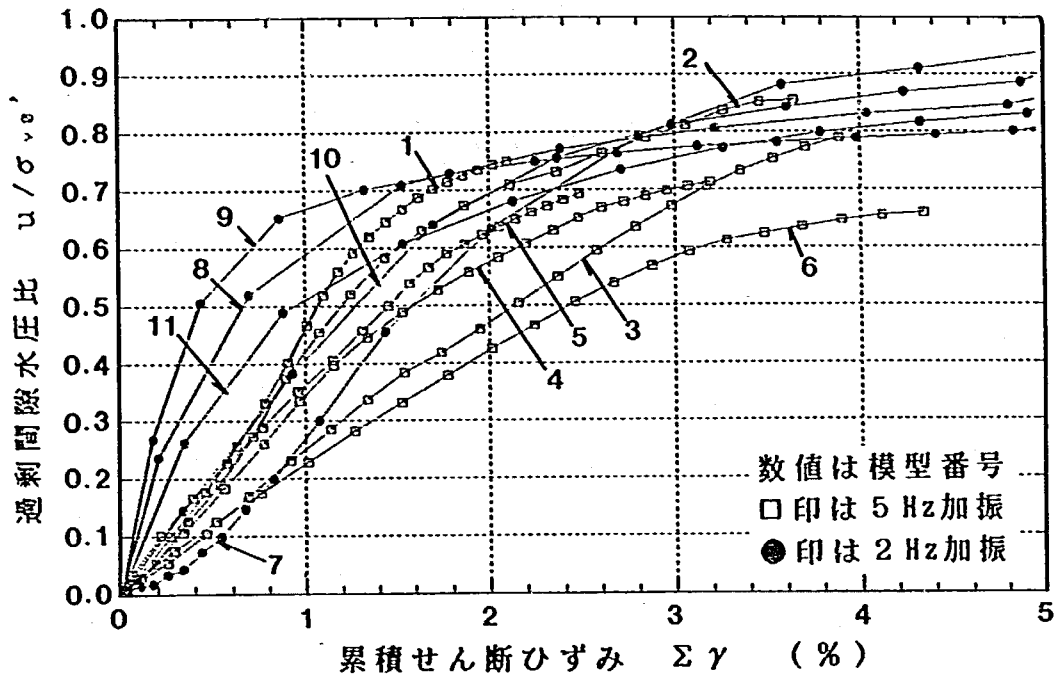
で近似するため横軸に$\Sigma(\gamma-\gamma_e)$，縦軸に$\Sigma(\gamma-\gamma_e)/(u/\sigma_{v0}')$をとって図示すると図－６・２・10のようになる。５Hz加振の16波目以降および２Hz加振の全領域で直線上にのっており，ほぼ完全な形で双曲線近似ができると考えられる。係数ａ，ｂを加振周波数ごとに求めると，５Hz加振の16～60波目に対してａ＝1.116，ｂ＝0.510，２Hz加振の１～20波目に対してａ＝1.055，ｂ＝0.611となり，いずれも相関係数ｒは0.9999である。両者をまとめて直線近似すると，ａ＝1.076，ｂ＝0.633，ｒ＝0.9988である。双曲線の漸近線の値は1/ａで表わされ$(u/\sigma_{v0}')_{ult}=0.93$で有効上載圧より少し小さい値となっている。



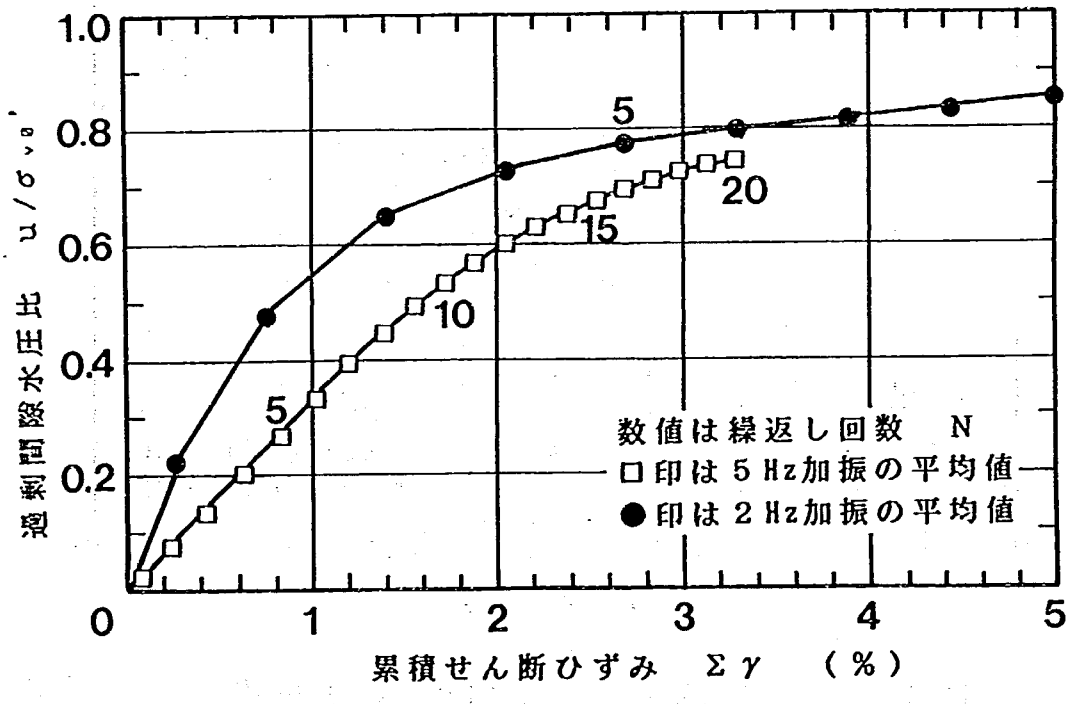
図－６・２・５　加振周波数ごとのγとΔu/σv0'の関係



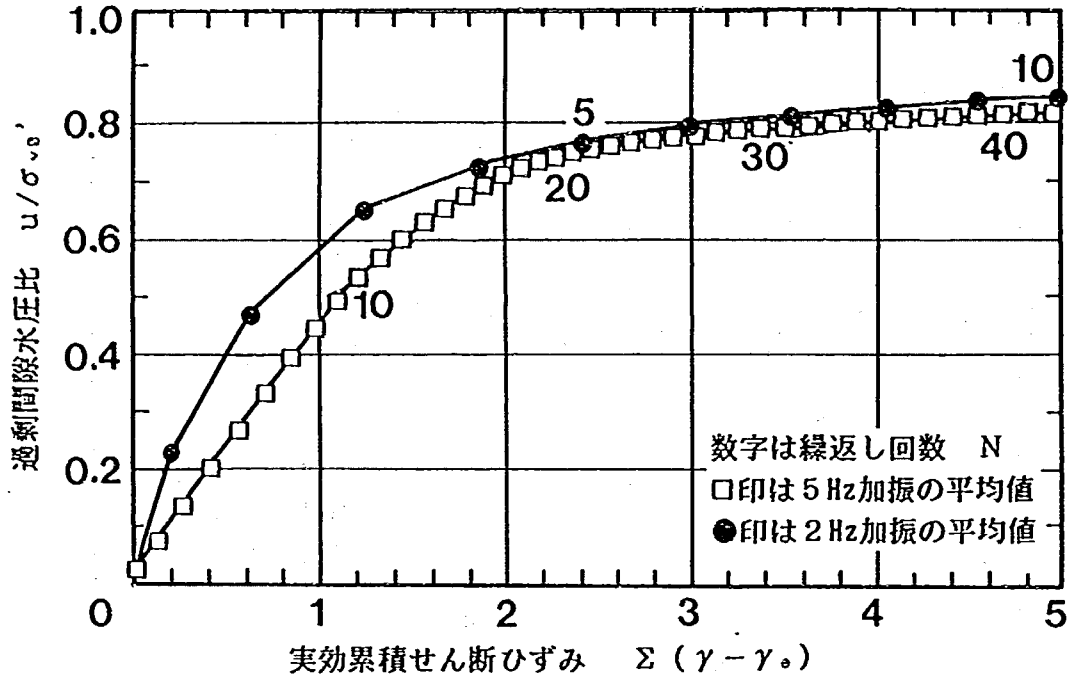
図－６・２・６　加振周波数ごとのγとΔu/σv'の関係



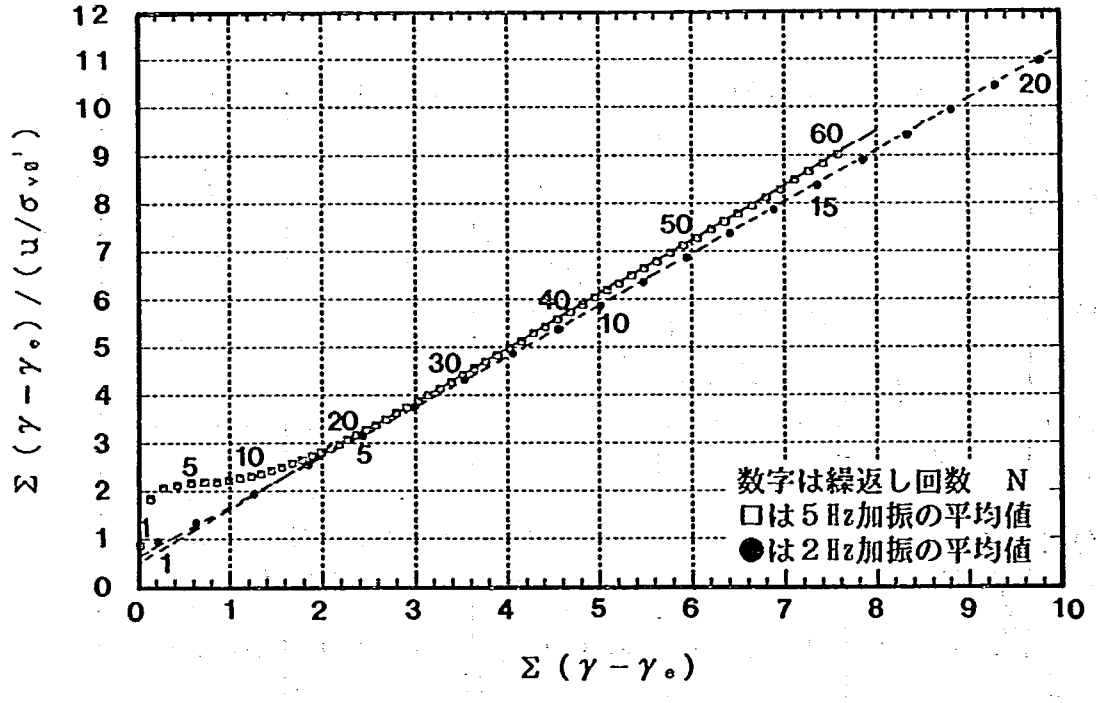
図－6・2・7 各模型ごとのΣγとu/σv0'の関係



図－6・2・8 加振周波数ごとのΣγとu/σv0'の関係



図－６・２・９　加振周波数ごとのΣ（γ－γe）とu/σv0'の関係



図－６・２・10　Σ（γ－γe）とΣ（γ－γe）/（u/σv0'）の関係（双曲線近似式）

7．間隙水圧発生モデルについて

7．1　間隙水圧発生モデルの提案

6．での考察の結果，加振周波数の異なる2種類の実験データから，間隙水圧の発生量はせん断ひずみの累積量を基本とするようなパラメータによって表現するのが最も妥当であろうとの知見を得た。今回の実験ではせん断応力比があまり違わないので累積せん断ひずみは累積ひずみエネルギに置き換えることも可能であろう。いま，そのパラメータをξとして，発生間隙水圧量uを初期有効上載圧σ_{v0}'で正規化した過剰間隙水圧比u/σ_{v0}'を次の双曲線式

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'} = \frac{\xi}{a\xi + b} \qquad (7.1.1)$$

で表現する。ここにa，bは係数でこの2つの係数が決まれば$\xi \sim u/\sigma_{v0}'$の関係は唯一に決定される。1/aは漸近線$(u/\sigma_{v0}')_{ult}$の値，1/bは勾配$d(u/\sigma_{v0}')/d\xi$の$\xi=0$における値で初期勾配である。完全液状化時においてもu/σ_{v0}'は1.0を超えることはないので係数aはほぼ1.0と考えて差しつかえないと思われる。係数bは地盤の物性によって異なるものと考えるのが妥当であると思われるが，今回のデータからはbの値の範囲や傾向についての手がかりは得られていない。

今回の整理ではパラメータξは実効累積せん断ひずみ

$$\xi = \Sigma(\gamma - \gamma_e) \qquad (7.1.2)$$

としている。ここにγはせん断ひずみ振幅，γ_eはせん断ひずみのうち間隙水圧の発生に寄与しない成分である。5Hz加振と2Hz加振で共通するγ_eとして0.05%を用いた場合が最もよい一致を与えている。しかし0.05%(5×10^{-4})のせん断ひずみというのは通常の応答解析で得られる数値に比較してかなり大きい数値であり弾性的な範囲を超えているものであろう。また，γ_eより少しでも小さなせん断ひずみでは間隙水圧が全く発生しないとするのは少々乱暴であり，もっと滑らかな形で表現すべきものであるかもしれない。今回用いたξの表現にはせん断ひずみ振幅以外の要素は全くなく，砂の粒度分布や粒径，粒子の形状といった物理特性も土の締り具合いや拘束圧といった条件も考慮することができない形であり，双曲線式が事実上1つの係数bで決定されることを考えると，ξ自体にも地盤性状の差を表現させる必要があると考えられる。これには土のダイレタンシ特性からの表現法などを検討する必要があると考えられる。しかし，今回の整理では拘束圧の影響として深度方向の分布形状は検討したものの加振条件以外にはパラメトリックな実験ではないので，ここで提案した計算式は今回の実験データについてはうまく説明できるといった限定的なものにならざるを得ないと考えられる。

7．2　今回の実験データによる検証

前節で示した間隙水圧発生量の計算式にはせん断応力に関するものが含まれていない。これはこれまで行われてきた液状化予測手法がせん断応力比で表わした動的せん断強度と入力地震動の大きさをせん断応力比で表わした地震時せん断応力を比較する手法とは大きく異なっている。もちろん土質材料は単純な線形弾性材料ではないものの応力とひずみの間には関係（構成式）があるわけで，この違いは応力とひずみのどちらを前面に出して表現するのが適当であるかの違いによるものである。すなわち，応力で表現した場合もひずみは無関係でなく隠れた存在としてあり，同様にひずみで表現した場合も応力は隠れた存在としてあると考えられる。

今回のデータ整理の結果では5Hz加振と2Hz加振ではせん断応力はあまり差がないもののせん断ひずみが大きく異なっていた。これは線形的な応力－ひずみ関係からは全く説明がつかないことである。ここでは，この説明を土の応力－ひずみ関係の非線形性，すなわちせん断弾性係数の拘束圧依存性，ひずみ依存性および履歴減衰の存在によって説明することを試みる。

7．2．1　応力－ひずみモデル

ここでは4．2で示した応力－ひずみモデルを用いる。これはせん断弾性係数Gの拘束圧依存性，ひずみ依存性および減衰定数hのひずみ依存性について標準的なものを与えて計算するものである。すなわち$G/G_0 \sim \gamma$，$h \sim \gamma$は図－4・2・1に示すものを用い，Gは平均有効拘束圧σ_m'の0.5乗に比例するものとする。間隙水圧の発生に伴うσ_m'の減少についても4．2．3で示したように水平方向土圧係数K_0と破壊線の角度ϕを考慮した形で与えた。実際に用いた数値は$\sigma_m'=1.0 kgf/cm^2$に対する初期せん断弾性係数$G_0=357 kgf/cm^2$（$V_s=135 m/s$），$K_0=0.5$，$\phi=40°$である。これらの値は加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみから求めたせん断応力が比較的よく一致する値として設定したものである。

7．2．2　検証の手順

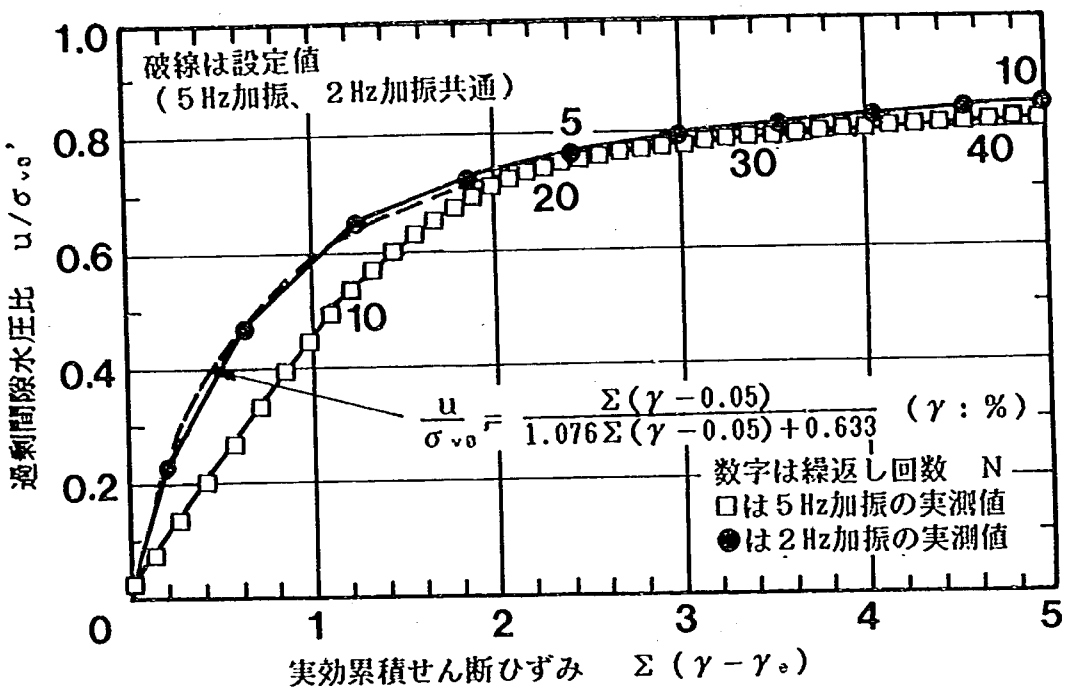
加振周波数ごとに平均した繰返し回数ごとのせん断ひずみ振幅（図－6・1・10）を与えられた入力条件として用い，間隙水圧発生モデルを

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'}=\frac{\Sigma(\gamma-0.05)}{1.076\Sigma(\gamma-0.05)+0.633} \quad (\gamma：\%) \qquad (7.2.1)$$

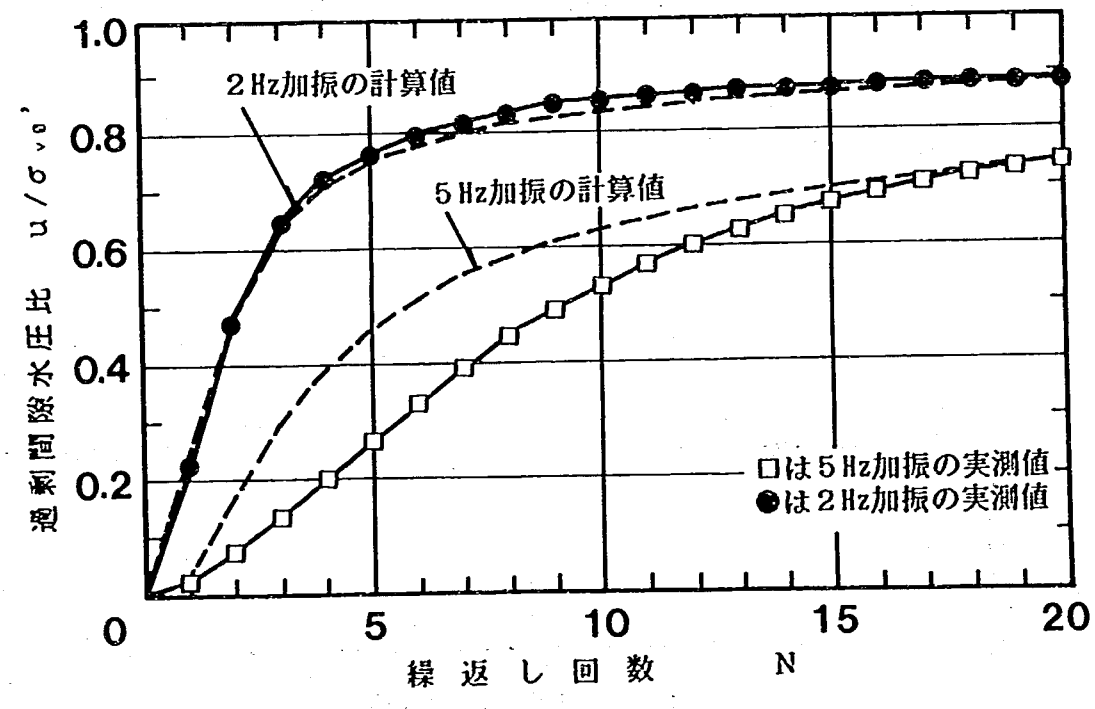
として表現する。上式の係数は5Hz加振および2Hz加振に共通な双曲線近似式をあてはめた場合の係数である。上式の関係を図－7・2・1に破線で示した。2Hz加振の実測値にほぼ一致しているが，5Hz加振の2～15波では幾分差が生じている。これはこの部分が，式の形を双曲線とした場合どうしても誤差となる部分である。

せん断ひずみを与えられた条件とすると過剰間隙水圧比は繰返し回数に対して一義的に求められ，その結果を図－7・2・2に破線で示す。この場合も2Hz加振についてはほぼ実測値に一致しているが，5Hz加振の場合は2～15波で差が生じている。

繰返し回数ごとのせん断ひずみ振幅およびその時点での発生間隙水圧からせん断応力振幅が計算できることになるが，応力－ひずみ関係で履歴減衰を考慮するためには時刻歴波形を知ることが必要になる。実測値の整理は１波ごとのせん断ひずみ振幅あるいはせん断応力振幅で行ってい

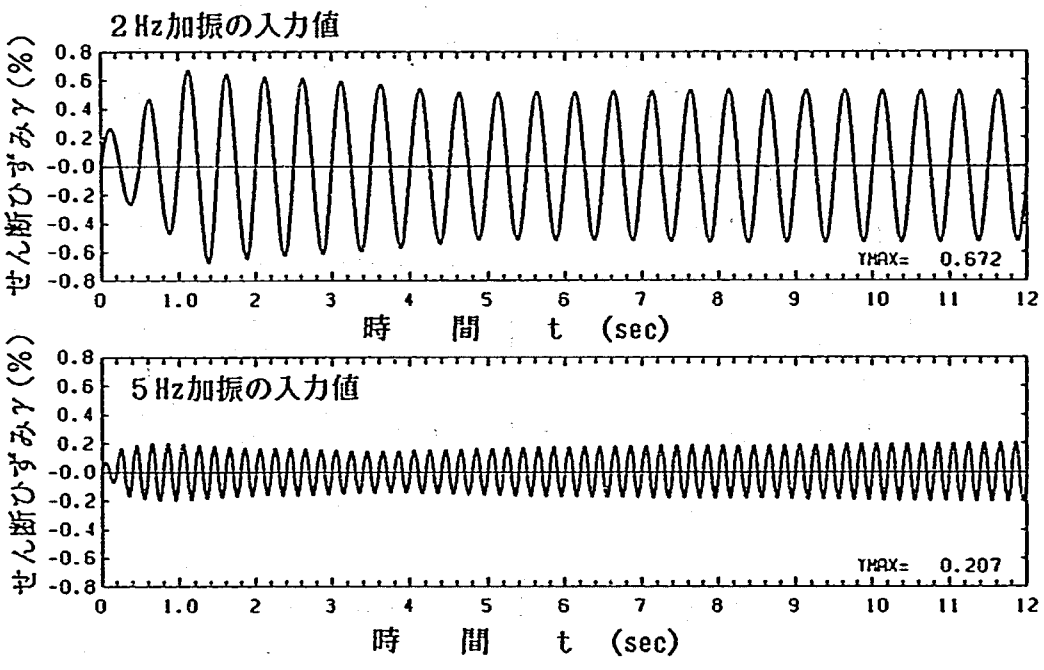


図－７・２・１　間隙水圧発生モデル

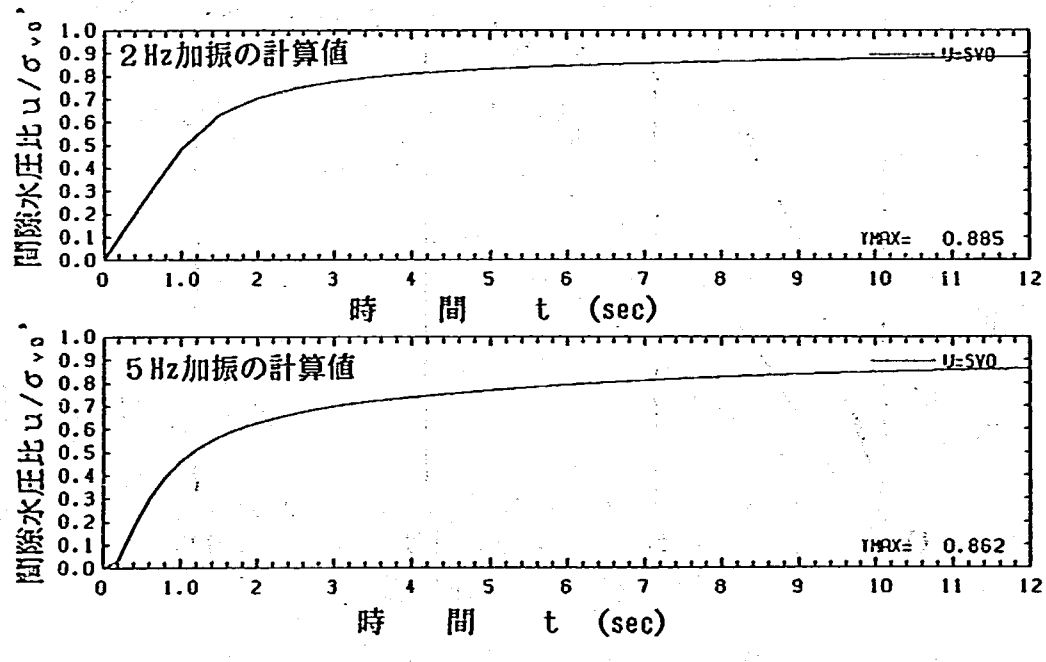


図－７・２・２　過剰間隙水圧比の計算結果

るので両者の位相差を実測データからは設定できない。ここでは1波間の波形をせん断ひずみについては正弦波，過剰間隙水圧については直線で設定した。設定したせん断ひずみの時刻歴波形を図－7・2・3に，過剰間隙水圧比の時刻歴波形を図－7・2・4に示す。時刻は12秒間を示しているが，これは5Hz加振では60波，2Hz加振では24波に相当する。20波目の過剰間隙水圧比はそれぞれ0.738，0.871である。さらに，せん断応力あるいはせん断応力比を計算するためにはσ_{v0}'を設定する必要があり，ここでは深度100～200cmを想定してσ_{v0}'＝100gf/cm^2，150gf/cm^2，200gf/cm^{2}の3種類を設定した。



図－7・2・3　入力条件として設定したせん断ひずみの時刻歴波形



図－7・2・4　過剰間隙水圧比の時刻歴波形

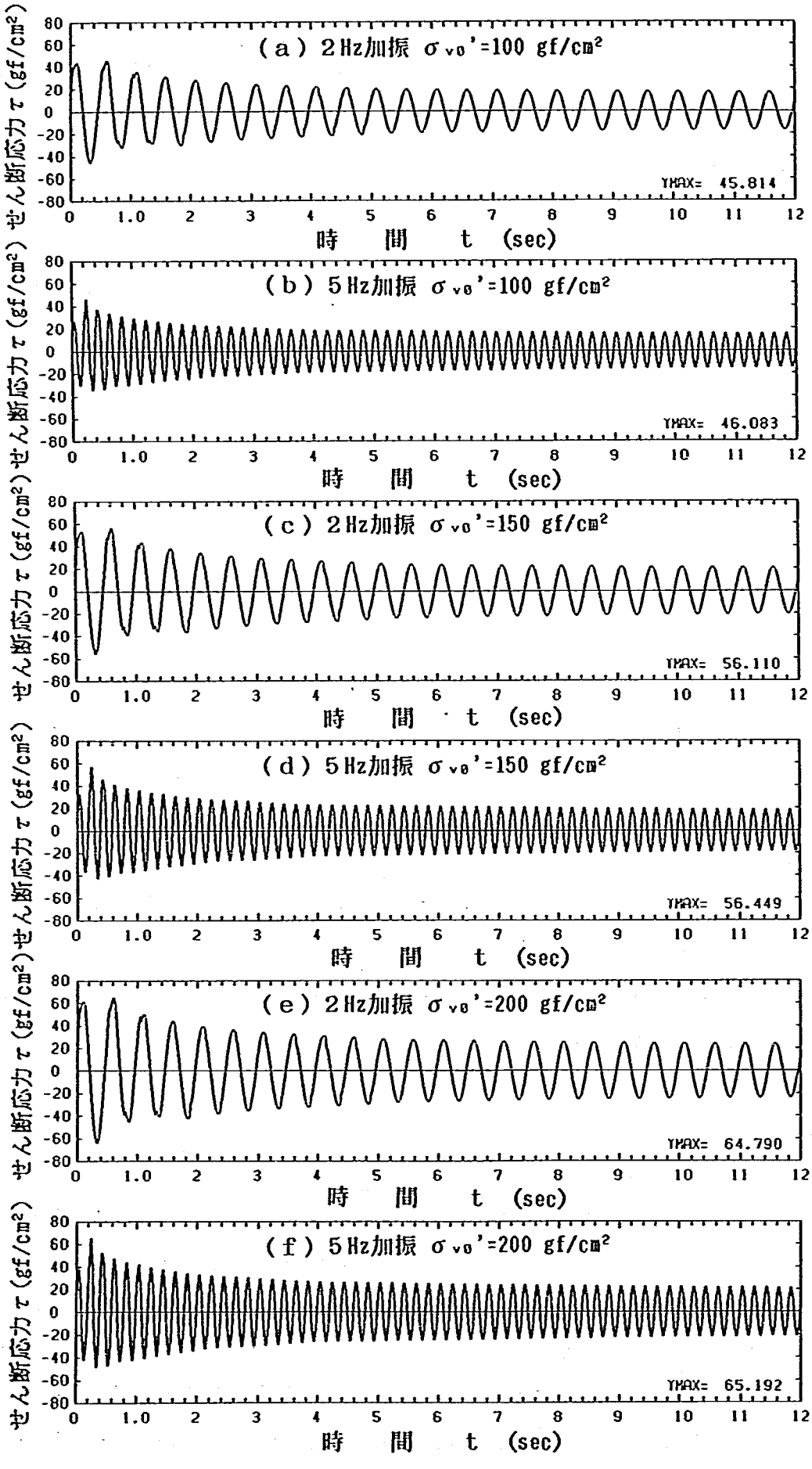
7．2．3　せん断応力の計算結果

せん断弾性係数はσ_m'の0.5 乗に比例するとしているため，同一ひずみに対するせん断応力あるいはせん断応力比の計算結果はσ_m'の影響（σ_{v0}' の影響）を受けてσ_{v0}' が異なればその値は異なってくる。3種類のσ_{v0}' に対するせん断応力の時刻歴を5 Hz加振，2 Hz加振それぞれに対して図－7・2・5に示す。せん断応力の最大値τ_{max} はいずれも2波目のプラス側で生じているが，最大値自体はひずみの小さい5 Hz加振の方がわずかながら大きい値となっている。またσ_{v0}' の違いの影響としてはσ_{v0}' が大きくなれば当然τ_{max} も大きくなるが，その割合は$\sigma_{v0}'=100gf/cm^2$の場合を基準にすれば，$\sigma_{v0}'=150gf/cm^2$の場合は$(150/100)^{0.5}=1.23$倍，$\sigma_{v0}'=200gf/cm^2$の場合は$(200/100)^{0.5}=1.41$倍となっており，これはせん断弾性係数の拘束圧依存性の設定のしかたによって決まる理論値で，5 Hz加振でも2 Hz加振でも全く同じである。図－7・2・6はσ_{v0}' で正規化したせん断応力比τ/σ_{v0}'で示したもので，この場合はτの場合とは逆にσ_{v0}' が大きいほどτ/σ_{v0}'の値は小さくなり，その割合はσ_{v0}' の-0.5(=0.5-1.0)乗に比例するものとなる。

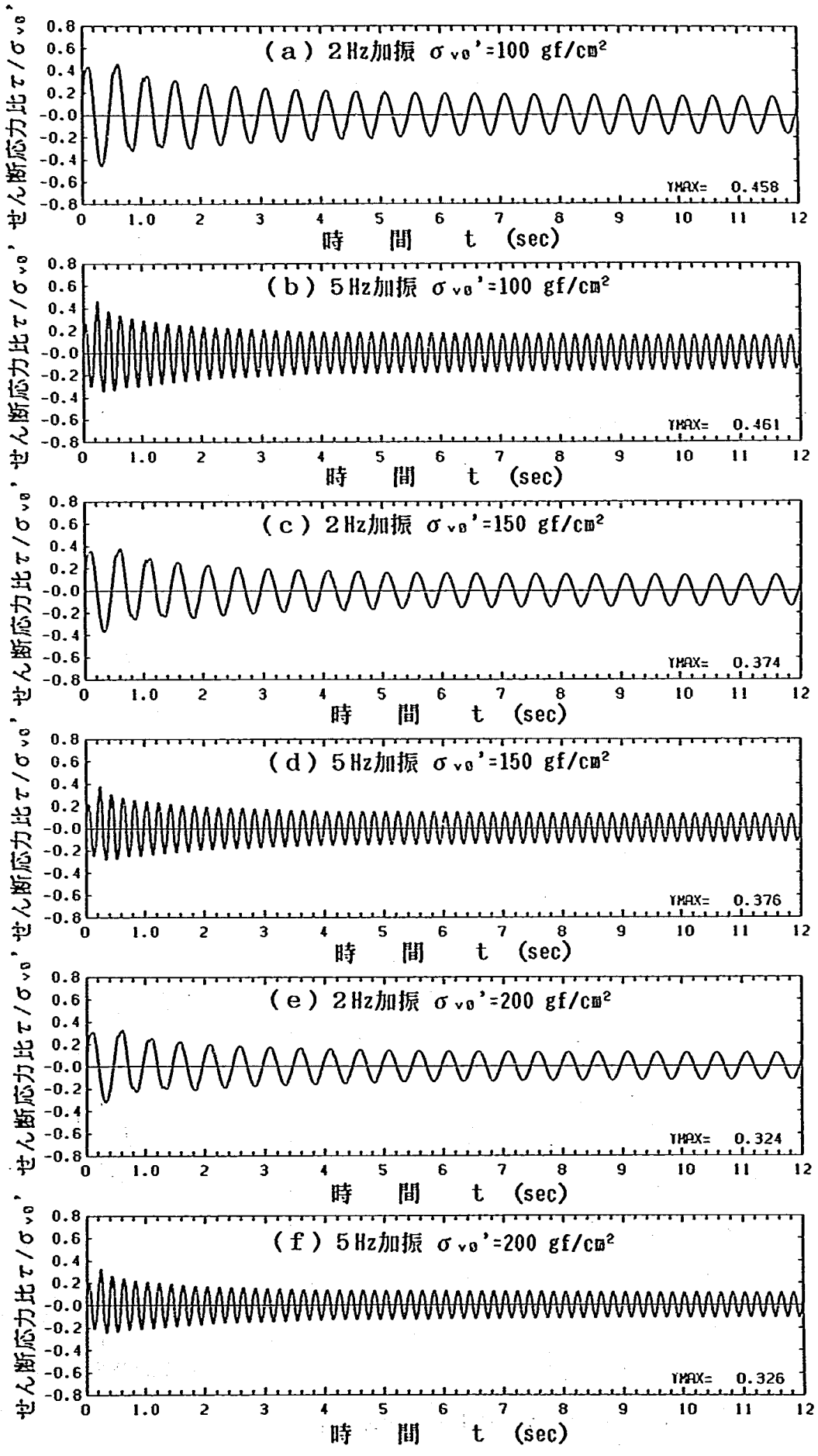
図－7・2・7に応力－ひずみ関係を示す。せん断弾性係数のひずみ振幅依存性を考慮しているためひずみ振幅の変化が大きい1波目と2波目，あるいは2波目と3波目で不連続なGが設定される影響が現われている。この影響はひずみ振幅の変化が大きくかつ間隙水圧の発生が速い（σ_m'の低下が速い）2 Hz加振の方で強く現われ時刻歴波形でも読み取れる。

せん断ひずみ振幅は5 Hz加振の1波目を除いては0.15～0.67%の範囲で，その範囲に対するhは0.22～0.27の範囲とそれほど大きな差がないためヒステリシスループの大きさはそれほど変化していない。同じくせん断ひずみ振幅の差によるG/G$_0$の範囲は5 Hz加振の2波目以降では0.29～0.23，2 Hz加振の2波目以降では0.12～0.09と狭い範囲にあり，骨格直線の傾きが小さくなるのは主に間隙水圧の発生に伴うσ_m'の影響と考えられる。

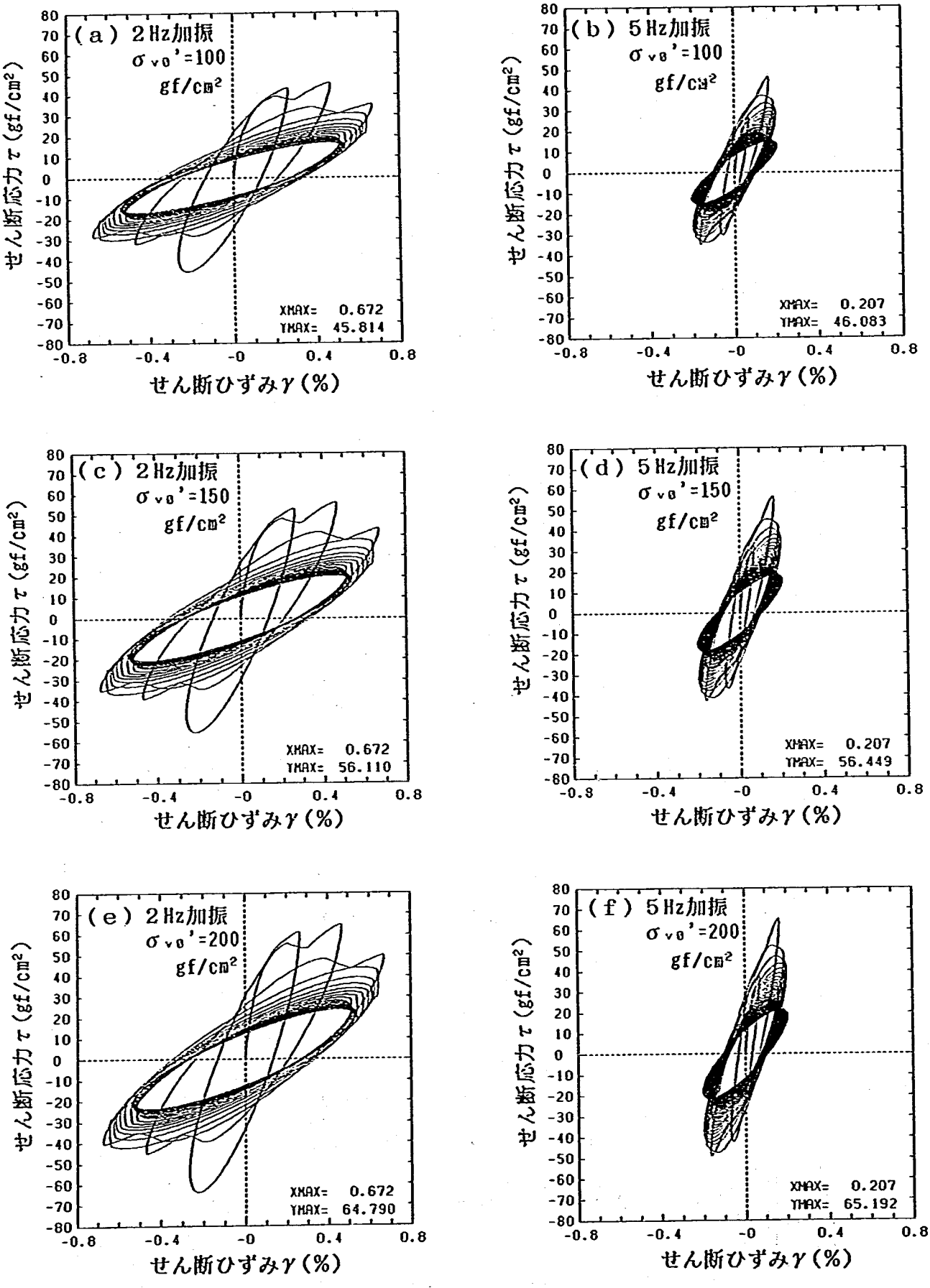
繰返し回数に対するせん断応力比を図－7・2・8に示す。5 Hz加振と2 Hz加振に分けてそれぞれ実測値と共に示しているが，計算値の方はσ_{v0}' の違いに対してそれぞれ3種類を示している。5 Hz加振の場合，繰返し回数に対するピーク値は実測値と同じく2波目に現われ，その値は$\sigma_{v0}'=100gf/cm^2$の場合 0.413，$\sigma_{v0}'=150gf/cm^2$の場合 0.338，$\sigma_{v0}'=200gf/cm^2$の場合 0.292である。これらの値は図－7・2・6で示した値と異なるが，これは図－7・2・6は片振幅をとっているのに対し，図－7・2・8では両振幅の1/2 をとっていることによる差である。実測値の最大値 0.409に対しては$\sigma_{v0}'=100gf/cm^2$の場合が最もよく一致している。実測値と比較すると，1波目の計算値が小さいこと，計算値の方がピーク後の低下がゆるやかで20波目の残留値は最も小さい$\sigma_{v0}'=200gf/cm^2$の場合でも実測値より大きくなっていることなどが異なっている点としてあげられる。2 Hz加振の場合，ピーク値は実測値と同じく1波目に現われ，その値は$\sigma_{v0}'=100gf/cm^2$の場合 0.444，$\sigma_{v0}'=150gf/cm^2$の場合 0.362，$\sigma_{v0}'=200gf/cm^2$ の場合 0.313である。これらの値は図－7・2・6では1波目にピークが現われたのと異なるが，この差



図－7・2・5 せん断応力の時刻歴波形の計算結果

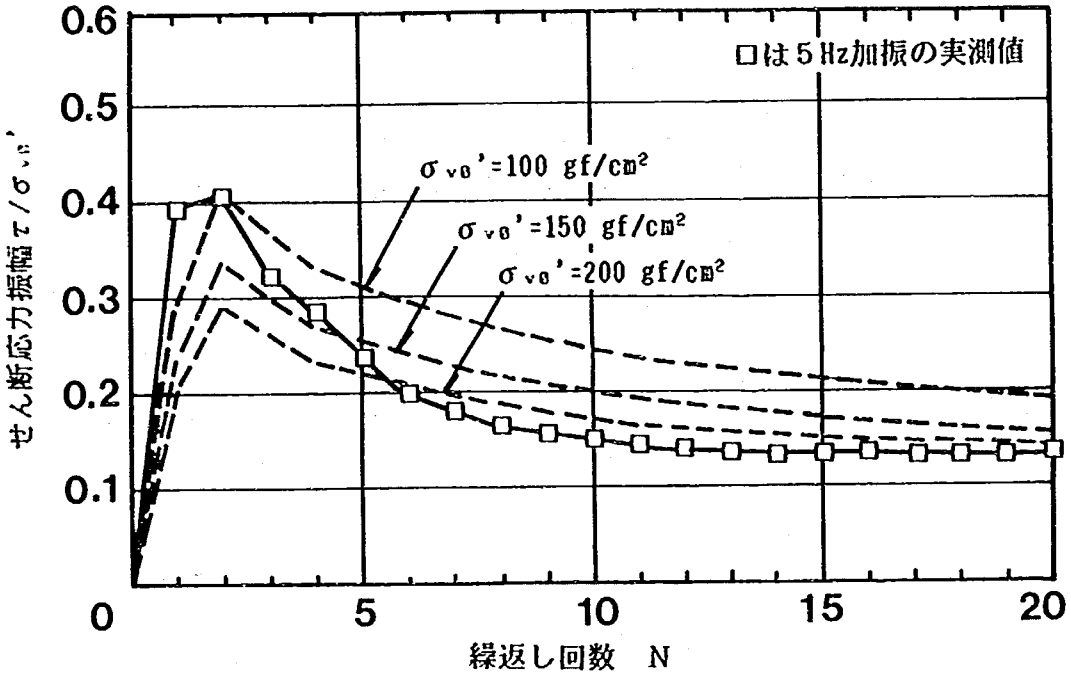


図－7・2・6 せん断応力比の時刻歴波形の計算結果

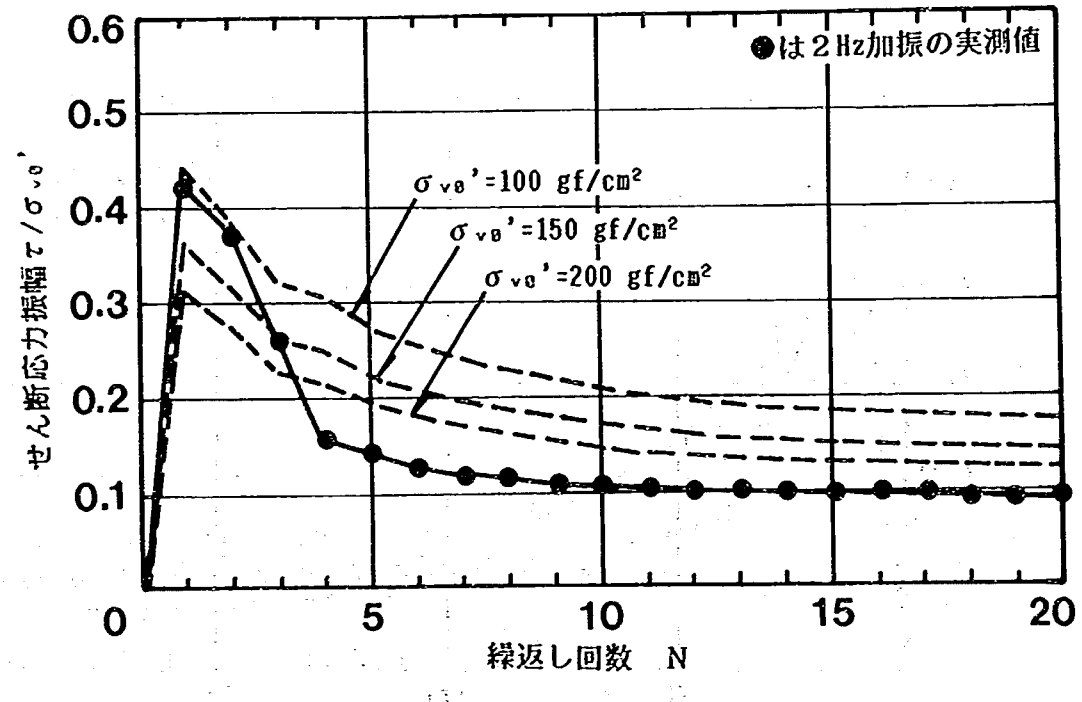


図－７・２・７　応力～ひずみ関係

も片振幅と両振幅の差によるものである。実測値の最大値 0.423に対してはσ_{v0}'＝100gf/cm^{2}の場合が最もよく一致していることと計算値の方がピーク後の低下がゆるやかで20波目の残留値は最も小さいσ_{v0}'＝200gf/cm^{2}の場合でも実測値より大きくなっていることなどの傾向は５Hz加振の場合と同様である。



（ａ）５Hz加振の計算結果

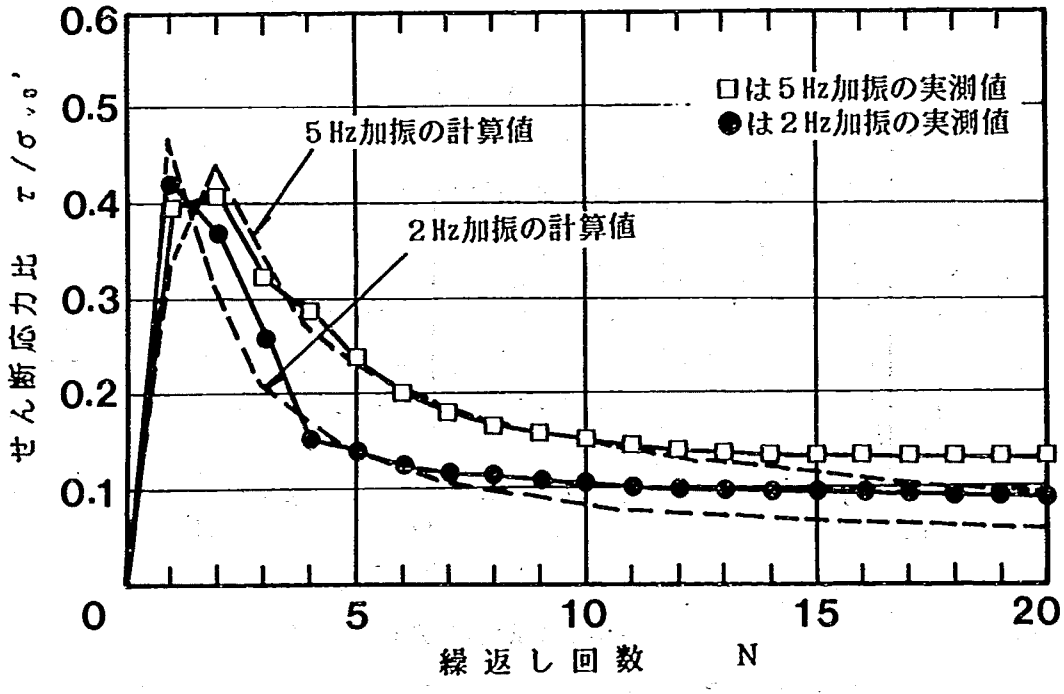


（ｂ）２Hz加振の計算結果

図－７・２・８　せん断応力振幅τ/σ_{v0}'と繰返し回数Ｎの関係

7．2．4　検証結果の考察

実効累積せん断ひずみをパラメータとする間隙水圧発生モデルを提案し，今回整理した実験データをせん断ひずみを与えられた条件として検証した。その結果５Hz加振と２Hz加振では最大ひずみ振幅が前者は0.202%，後者が0.671%と約3.3 倍の差があるが計算結果としてのせん断応力比はほとんど変わらないという実測データの傾向に一致した結果を得た。また，５Hz加振の場合は２波目が，２Hz加振の場合は１波目が最大せん断応力比を与えるのも実測データと一致した結果である。しかし，同一ひずみに対して拘束圧（有効上載圧）が異なればせん断応力あるいはせん断応力比が異なる結果となる。これはせん断弾性係数が拘束圧の0.5 乗に比例するとしたことによるもので実験事実が深度方向にほぼ一様なせん断応力比で推移していることを説明できていない。もし，実測データで得られた一様な間隙水圧比，一様なせん断応力比を前提とするなら，せん断弾性係数はσ_m'の1.0 乗に比例することになるので，ここではσ_m'の1.0 乗に比例すると仮定して計算を行ってみた。但し，$\sigma_m'=1.0 kgf/cm^2$に対するＧ０ の値は調整している。その結果を図－７・２・９に示す。σ_m'の0.5 乗に比例するとした場合よりも，５Hz加振の１波目が大きくなっていること，５Hz加振も２Hz加振もピーク後の低下が大きくＮ＝２～10では実測値にほぼ一致していること，その後の残留値は実測値よりも小さくなっていることなどが異なる点である。実測データの残留値が振幅調整の影響を受けていることを考えればσ_m'の1.0 乗に比例すると仮定した計算値はかなりよく実測値を説明していると思われる。このことはせん断弾性係数の拘束圧依存性について，拘束圧が小さい（初期有効上載圧が小さくかつ間隙水圧の発生に伴う拘束圧の低下が生じる）範囲の，大きなせん断ひずみの領域についてはσ_m'の0.5 乗よりも大きい乗数に比例する傾向にあるといえる。



図－７・２・９　せん断応力振幅τ/σ_{v0}'と繰返し回数Ｎの関係
（せん断弾性係数が拘束圧に比例するとした場合）

7．3　実測値と既往の算定法の比較

7．3．1　ねじりせん断試験結果との対比

浅間山砂の室内ねじりせん断試験による結果では，液状化に要する繰返し回数N_1と有効上載圧で正規化した動的せん断強度比$R=\tau/\sigma_{v0}'$の間には

$$\log_{10}R=-0.123\cdot\log_{10}N_1-0.5287 \qquad (7.3.1)$$

で表わされる関係があった。大型振動台実験の整理結果では，せん断応力比は1波ごとに変化し，5Hz加振の平均値は0.134～0.409，2Hz加振の平均値は0.092～0.423の範囲にある。ピーク値約0.4に対して上式を適用すると$N_1=0.09$回程度，同じく残留値約0.1に対しては$N_1=7000$回程度となり，ねじりせん断試験で実施された繰返し回数に対してはいずれも著しい外挿結果となっている。$N_1=20$回に対するRは0.2程度であるので，間隙水圧が繰返し回数に対して直線的に上昇すると仮定して，$R=0.2$に対して等価な繰返し回数を求めると，ピーク値の0.4は280波分，残留値0.1は0.004波分に相当することになる。このことは5Hz加振の場合も2Hz加振の場合もピークの1波のみで液状化することを表わしており，間隙水圧比の実測値がピーク波が作用した後の2波目でも5Hz加振の場合0.075，2Hz加振の場合0.474と小さく，間隙水圧の上昇過程にあったこと，また加振周波数によって大きな差があったことを説明できていない。大型振動台による実験では振動台の加振レベルが200gal，150gal一定条件であるが，地盤に作用する加速度は地盤の物性や間隙水圧の上昇を反映した応答加速度であり，その意味では応力比一定の室内試験結果と直接には結び付けられない面があると考えられる。

7．3．2　F_Lによる判定法との対比

道路橋示方書・同解説[9]による液状化判定法に従って，今回の振動台実験の結果をみてみる。動的せん断強度比R（$=R_1+R_2$）の第1項R_1は通常N値と有効上載圧から求めるが，これはもともと砂の相対密度D_rで表わすものを換算したもので，$D_r=37\sim55\%$に対して

$$R_1=0.0042\cdot D_r=0.16\sim0.23 \qquad (7.3.2)$$

となり，第2項R_2は平均粒径$D_{50}=0.28$mmより

$$R_2=0.225\cdot\log_{10}\left(\frac{0.35}{D_{50}}\right)=0.02 \qquad (7.3.3)$$

と求められ

$$R=R_1+R_2=0.18\sim0.25 \qquad (7.3.4)$$

となる。一方，地震時せん断応力比Lは200gal，150galの加振レベルに対してそれぞれ0.42，0.32であった。したがってF_Lは

200gal，5Hz加振に対して　　$F_L=0.43\sim0.60$

150gal，2Hz加振に対して　　$F_L=0.56\sim0.78$ $\qquad (7.3.5)$

となり，流動化に対する抵抗は全く期待できない範囲になると考えられる。また，岩崎ら[10]によるF_Lと間隙水圧比L_uの関係によれば（図－7・3・1）

$$0.6 < F_L \leqq 0.8 \qquad 0.9 \leqq L_u < 1.0$$

$$F_L \leqq 0.6 \qquad L_u = 1.0 \qquad (7.3.6)$$

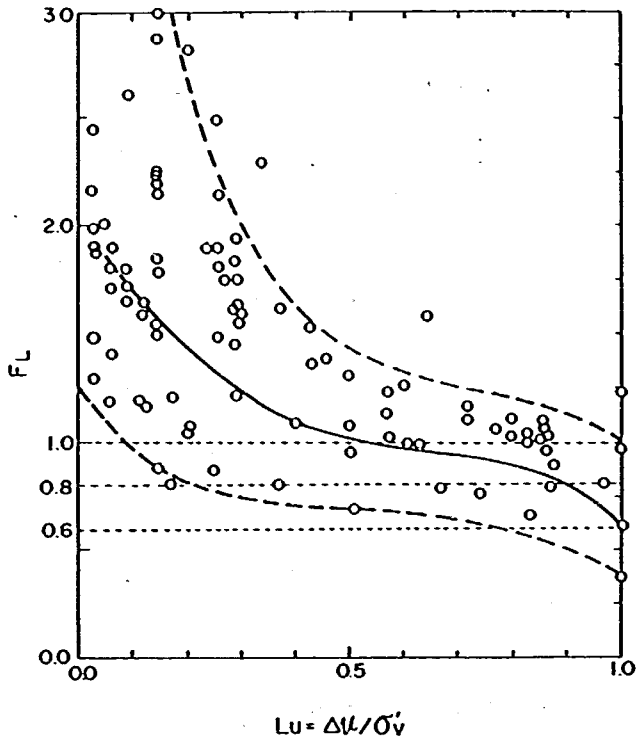
であるから，この関係からもほぼ完全な液状化となる範囲であるといえる。

7．3．3　石原モデルの適用

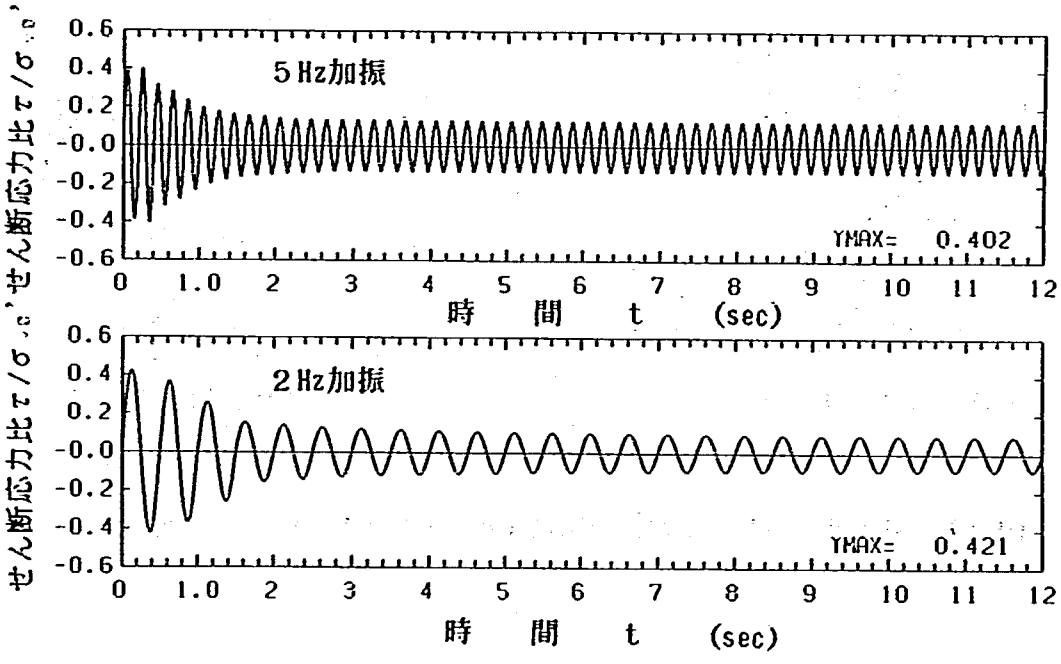
応力径路に基づく間隙水圧算定法の一つである石原モデルに今回の実験結果を適用してみた。石原モデルはせん断応力比の時刻歴がわかれば$\sigma - \tau$空間上の応力径路すなわち発生間隙水圧比が時々刻々計算できるモデルである。入力条件は加振周波数ごとに平均したせん断応力振幅で，波形は正弦波とした。入力したせん断応力比の時刻歴波形を図－7・3・2に示す。石原モデルに用いる定数はねじりせん断試験で得られた$B_\rho' = 0.211$，$B_u' = 0.072$，$\theta_s' = 33°$を用いた。

間隙水圧比の時刻歴の計算結果を図－7・3・3に示す。5 Hz加振の20波目（4秒後）で$u/\sigma_{v0}' = 0.33$程度，2 Hz加振の20波目（10秒後）で$u/\sigma_{v0}' = 0.30$程度であり5 Hz加振の方が大きくなっており，値自体もいずれも実測値よりかなり小さくなっている。また，上昇過程も最初の1波ないし2波での上昇が若干大きいもののその後は非常になだらかな上昇となっている。図－7・3・4に応力径路を示すが，5 Hz加振の場合も2 Hz加振の場合も最初の1波および2波のみが降伏面を超える処女載荷径路で，3波目以降はすべて降伏面内にある除荷・再載荷径路にある。図は12秒間の計算結果を示しているが，この範囲では変相線に達するほどの間隙水圧発生量とはなっていない。したがって，石原モデルによる計算結果と実測値が一致しない理由の一つとして除荷・再載荷過程での間隙水圧発生量を規定する定数B_u'の値の設定に問題があったと考えられる。そこで，ねじりせん断試験の結果でなく振動三軸試験から得られた定数，$B_\rho' = 0.0058$，$B_u' = 0.2233$，$\theta_s' = 33°$を用いて同様の計算を行うと，図－7・3・5，図－7・3・6のようになる。20波目の間隙水圧比は5 Hz加振の場合0.62程度，2 Hz加振の場合0.57程度となり，ねじりせん断試験で得られた定数を用いた場合の2倍程度の値となっているが，5 Hz加振の方が大きいという傾向は変わっていない。応力径路をみると5 Hz加振の40波目以降で変相線を超えるようになるが，ほとんどが除荷・再載荷過程での間隙水圧の発生となっていることがわかる。

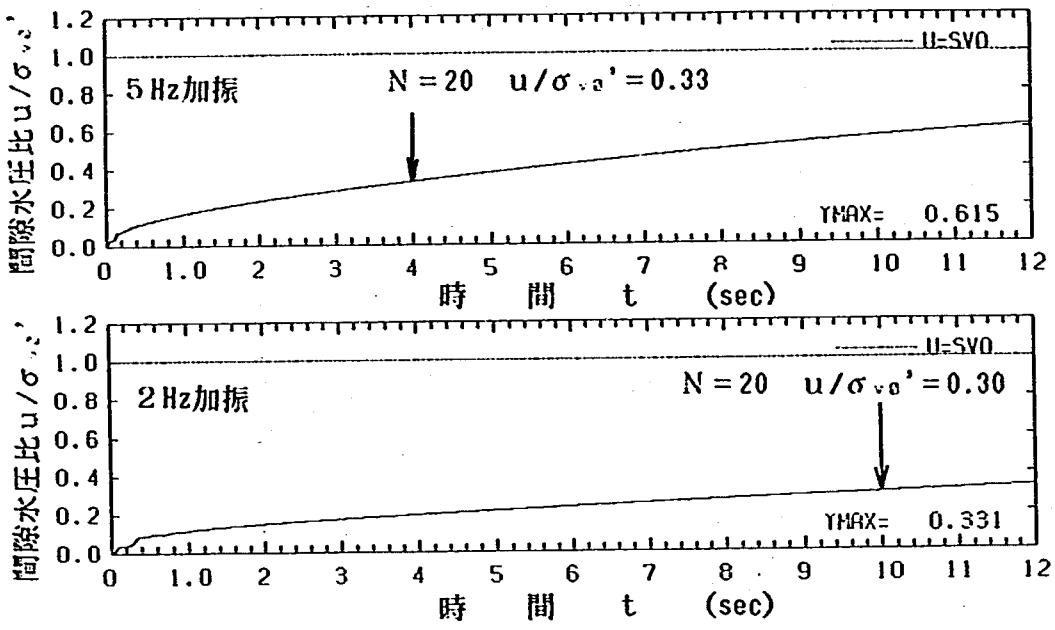
石原モデルはせん断応力比の大きさとその発現順序が決まれば間隙水圧の発生量が決まるモデルである。したがって，5 Hz加振も2 Hz加振も1～2波目にピークが現われ，その後急減して残留値に達するという同じ傾向を示し，そして全体としては加振加速度レベルが大きい5 Hz加振の方がせん断応力比も大きいという実測値を用いると，このモデルによる計算では5 Hz加振の方が繰返し回数に対して間隙水圧の発生が速くなる結果となり，発生間隙水圧比の実測値の傾向をうまく説明することはできないと考えられる。



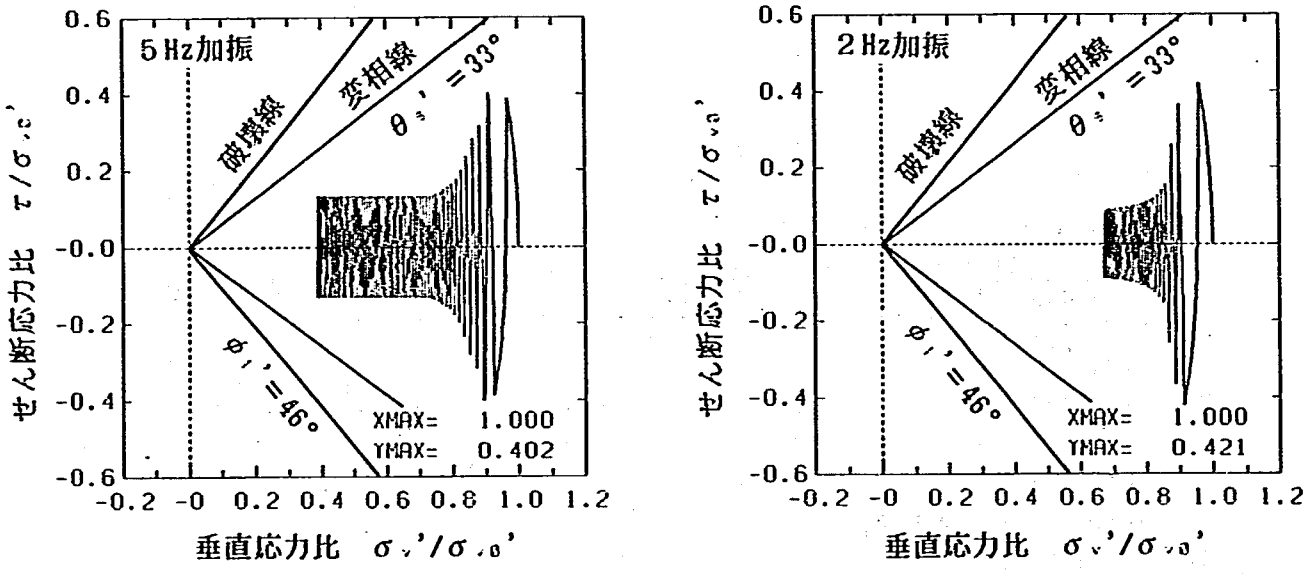
図－７・３・１　液状化抵抗係数F_Lと間隙水圧比L_uの関係（岩崎らによる）



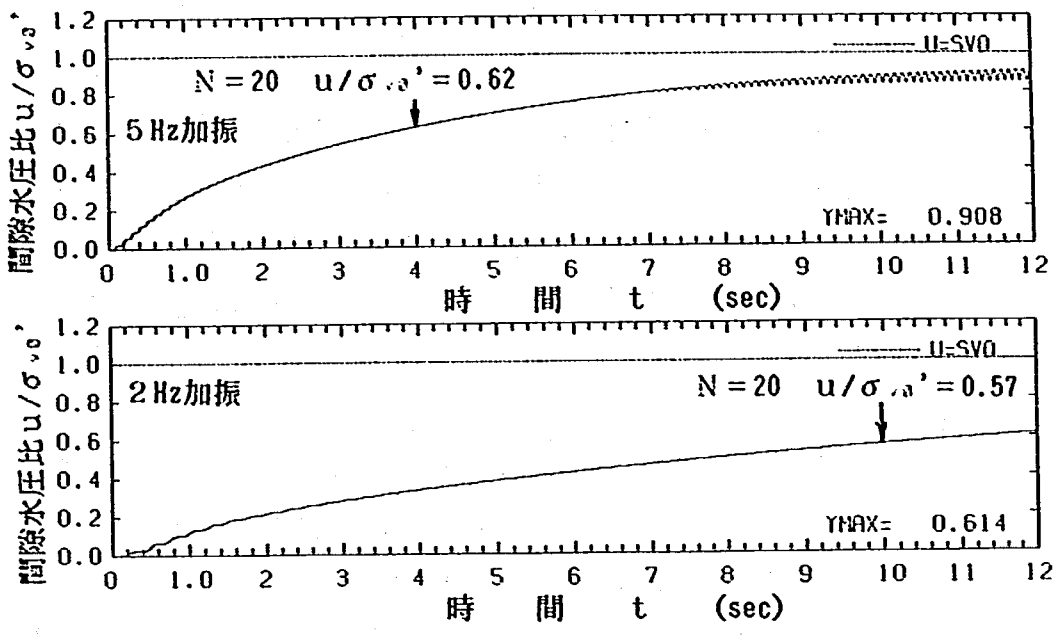
図－７・３・２　石原モデルに入力したせん断応力比の時刻歴波形



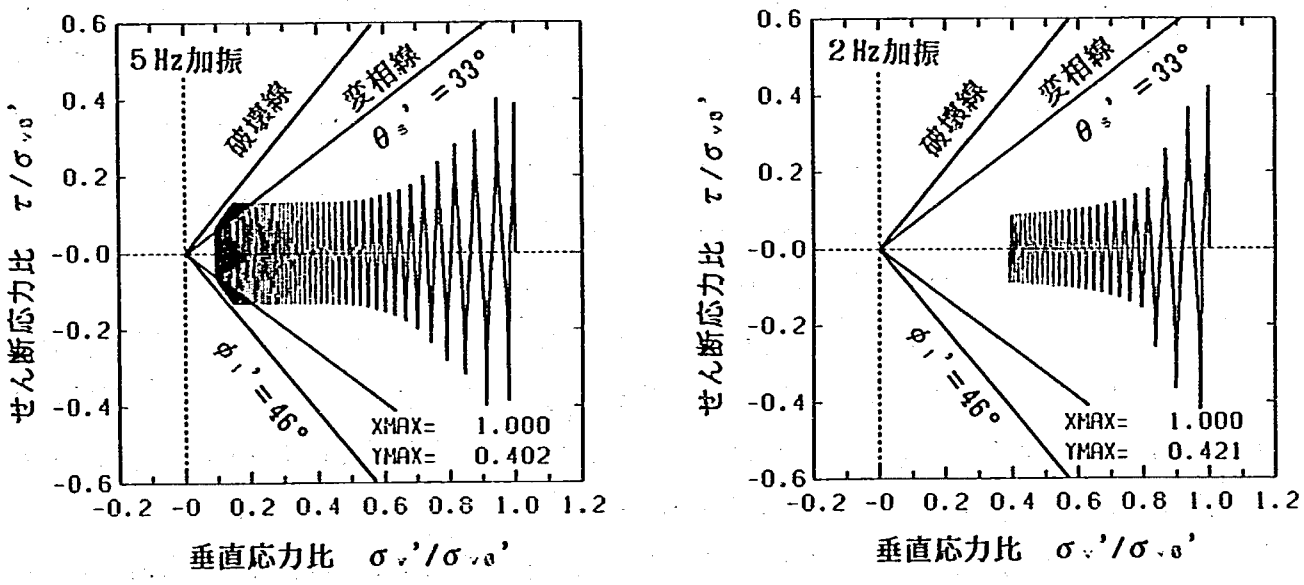
図－７・３・３　間隙水圧比の計算結果（Bf'＝0.211、Bb'＝0.072）



図－７・３・４　応力径路の計算結果（Bf'＝0.211、Bb'＝0.072）



図－7・3・5 間隙水圧比の計算結果（$B_r'=0.0058$、$B_u'=0.2233$）



図－7・3・6 応力径路の計算結果（$B_r'=0.0058$、$B_u'=0.2233$）

8. 第Ⅰ編のまとめ

大型振動台による砂質地盤の液状化実験のデータを整理し，動的せん断時の間隙水圧の発生特性を検討した。振動台実験は掘割道路を対象とした砕石ドレーンによる液状化対策工法の効果確認実験であるが，砕石ドレーンから20～30cm以上離れた地点では加振開始後数秒間では間隙水圧の消散の影響をほとんど受けていないと判断できたので，今回の整理では砂地盤部のデータのみを用いて，間隙水圧の上昇過程に着目して検討を行った。

加振によって生ずる地盤内の過剰間隙水圧は，深度方向にほぼ直線的な分布で上昇し，各測定点の過剰間隙水圧をその地点の初期有効上載圧で正規化した過剰間隙水圧比は一様に上昇することがわかった。加振周波数の異なる２種類（５Hz加振と２Hz加振）の実験結果では，繰返し回数に対する間隙水圧の上昇速度が大きく異なり，２Hz加振の方が３倍以上の速度で上昇し，これは実時間軸をとっても２Hz加振の方が速い結果である。

加振時の地盤内に作用するせん断応力は加速度に質量を乗じて求める手法で算定した。これは地中の各測定点の加速度記録にその測定点に代表される鉛直全応力増分を掛け地表面から順次重ね合わせる手法である。この方法によれば，せん断応力は深度方向の加速度の位相差を反映したものとなり，必ずしもピークを連ねたものとはなっていない。これは地表面における加速度から地震時せん断応力を求める場合に，深さの関数としての低減係数を乗じる方法がとられるが，ここで用いた方法ではその低減係数が地盤の剛性（位相差）を自動的に反映したものになっていると考えられる。地盤が液状化した後の加速度記録には土槽全体の流体的な運動に起因すると思われる成分が大きく現われている。これは側壁の影響と考えられ，液状化後のせん断応力は振幅調整したものを用いることとしたが，波動成分とせん断成分の厳密な区分はできず，振幅調整後のせん断応力の精度はあまり高くないといわざるを得ない。

せん断応力の深度方向の分布もほぼ直線的と見なせ，有効上載圧で正規化したせん断応力比は一様な状態で経時変化すると見なせる結果となった。振動台入力加速度レベルは５Hz加振の場合200gal，２Hz加振の場合150galであるので，せん断応力比は全体としては５Hz加振の方が大きいといえるが，ピークはいずれも１～２波目に生じ，ピーク値はほとんど変わらない値となっている。ピーク後の低下は２Hz加振の方が速いが，これは間隙水圧の上昇を反映したものと考えられる。しかし，加振周波数による差は間隙水圧の場合ほど顕著なものとはなっていない。

地盤内のせん断ひずみは地盤内の変位分布より算定した。地盤内の変位は加速度の直接数値積分によって求めたが，加速度記録には主に加速度計の傾斜に起因すると思われる成分が含まれるので，これを１波ごとに基線補正する方法で除去した。せん断ひずみの空間分布は深度方向にも

水平方向にもばらつきが大きく，ここでは全計算点のひずみを単純平均し，地盤の平均的なせん断ひずみを用いて整理した。せん断ひずみの経時変化は２～３波目にかけて直線的に増大し，その後はほぼ一定の振幅で継続する形となっている。その振幅値は５Hz加振の場合0.15～0.20%，２Hz加振の場合0.5～0.6%と加振周波数によって大きな差がある結果となった。

加振周波数の異なる２種類の実験では，間隙水圧とせん断ひずみに顕著な差があり，せん断応力はあまり変わらないという整理結果が得られたので，間隙水圧の発生特性をせん断ひずみで表現することを試み，せん断ひずみから間隙水圧の発生に寄与しない成分を取り除いたものの累積値（実効累積せん断ひずみ）の双曲線式で表わせるとして，次式を提案した。

$$\frac{u}{\sigma_{v0}'} = \frac{\Sigma(\gamma-\gamma_e)}{a\,\Sigma(\gamma-\gamma_e)+b} \qquad (8.1)$$

ここに，u/σ_{v0}'は過剰間隙水圧比，$\Sigma(\gamma-\gamma_e)$は実効累積せん断ひずみ，a，bは土の物性による定数である。

実験結果ではせん断ひずみに顕著な差があるのにせん断応力はそれほど変わらないという一見奇妙な結果となっているが，上記の間隙水圧発生モデルを用いて検証した結果，せん断弾性係数のひずみ依存性および拘束圧依存性の設定によって合理的に説明できることがわかった。このことは，逆にいえば，せん断応力が少しでも大きければ，せん断弾性係数のひずみ依存性を反映してせん断ひずみはせん断応力の差より増幅して大きくなり，発生間隙水圧がせん断ひずみの大きさによって規定されるとすれば，間隙水圧の発生量が大きくなり，その結果せん断弾性係数の拘束圧依存性により剛性が低下して，さらにせん断ひずみが大きくなるという増幅的な傾向となることを示している。これは液状化特性がせん断応力比に対して非常に敏感であることを表わしているといえる。浅間山砂のねじり試験の結果によれば，液状化に要する繰返し回数N_1とせん断応力比Rの関係が

$$\frac{R_1}{R_2} = \left(\frac{N_{11}}{N_{12}}\right)^{-0.123} \qquad (8.2)$$

で表わされ，Rが１割大きくなればN_1は1/2 以下に減少することからもわかる。

今回整理したデータを既往の液状化判定法および室内動的試験の結果と照合すれば，５Hz加振の場合も２Hz加振の場合もいずれも液状化する範囲となるが，液状化の過程，程度の違いには言及できない。また，石原モデルのようなせん断応力比のみに依存する間隙水圧発生モデルでは，必然的に全体としてせん断応力比が大きい５Hz加振の方が間隙水圧発生量が大きい結果となり，今回の実測値の傾向をうまく説明できないと思われる。

今回提案した間隙水圧発生モデルでは

①入力地震動に対して地盤のせん断ひずみを求めること

②土の物性としてモデルに用いるパラメータを求めること

の２点が必要になる。

入力地震動に対して，通常の方法では，地中のせん断応力が地表の加速度を用いて算定される。せん断応力からせん断ひずみを求める場合はせん断弾性係数を用いることになるが，せん断弾性係数はひずみ依存性および拘束圧依存性を有しているので，繰返し計算が必要になる。さらにひずみ依存性を有する履歴減衰をも考慮するとすれば，簡単な手計算では手に負えなくなり，これらを考慮した応答計算を行う必要があろう。一方，土の液状化強度は，これまで多くの場合応力制御方式の繰返し三軸試験が行われ，せん断応力比と液状化に要する繰返し回数の関係に整理されてきた。これらの試験では液状化の直前に急激に大きなひずみ振幅となるものが多く，今回提案したモデルのパラメータを求めるためにはひずみに着目した整理が必要になる。

振動台実験で得られた間隙水圧の上昇過程をひずみを用いて追跡する計算法を提案したが，この計算法を既往の事例によって検証することはできなかった。液状化の程度を間隙水圧によって定量的に評価することは対策工法の評価に対しても重要なことと思われるので，今後は地盤内のひずみの評価，ひずみに着目した土の物性について検討する必要があると考えられる。

９．第Ｉ編の参考文献

1）佐々木康：地盤液状化に対する砕石ドレーン工法の有効性に関する研究，建設省土木研究所資料，第2194号，1985.

2）Seed, H.B, Martin, P.P. and Lysmer, J. : Pore-Water Pressure Changes during Soil Liquefaction, Proc. ASCE, GT4, pp. 323～345, 1976.

3）Ishihara, K. and Touhata, I. : One-dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes based on Effective Stress Method, Jour. of the Faculty of Engineering, the Univ. of Tokyo (B), Vol. 35, No. 4, pp. 656～700, 1980.

4）近藤益央，佐々木康，松本秀應：飽和砂層の振動台実験における過剰間隙水圧比と動的せん断応力比の関係，土木学会第42回年次学術講演会，第Ⅲ部門，pp. 132～133, 1987.

5）岩崎敏男，龍岡文夫，川島一彦，森本巌：土の非線形性が地盤の地震応答に及ぼす影響に関する解析的検討，建設省土木研究所資料，第1582号，1980.

6）石原研而：土質動力学の基礎，pp. 136～208，鹿島出版会

7）土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー９，土と構造物の動的相互作用，pp. 7～41

8）土質工学会編：土質基礎工学ライブラリー24，土質地震工学，pp. 41～59

9）日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，pp, 16～23, 1980.

10）岩崎敏男，常田賢一，木全俊雄：地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究，建設省土木研究所資料，第1729号，1981.

APPENDIX

APPENDIX－1　加速度記録の補正法

1波ごとの基線補正量α_Hの計算法

$$\alpha_H = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i / N$$

$$\alpha_i = \alpha_i - \alpha_H \quad (i=1, \cdots\cdots, N)$$

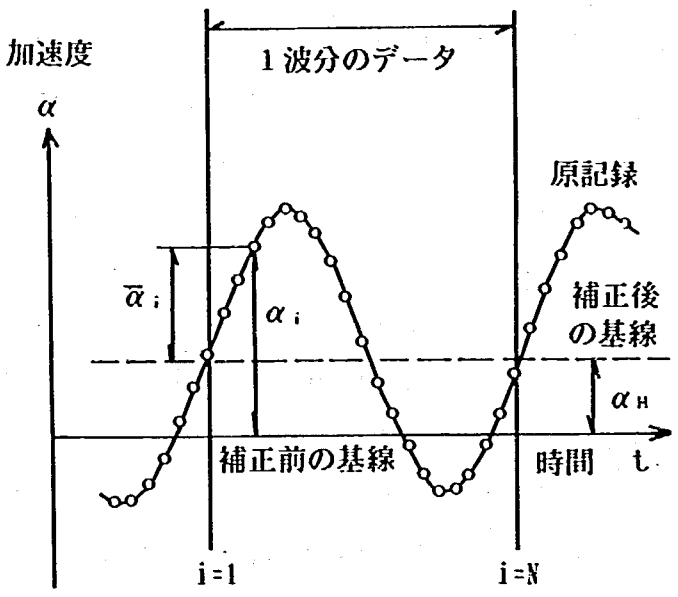
α_H：1波ごとの補正量

α_i：サンプリングデータ

N　：1波分のデータ個数

$$N = \frac{\text{サンプリング周波数}}{\text{加振周波数}}$$

α_i：補正後のデータ



APPENDIX－2　間隙水圧記録の補正法

前後1/2波分の移動平均による補正法

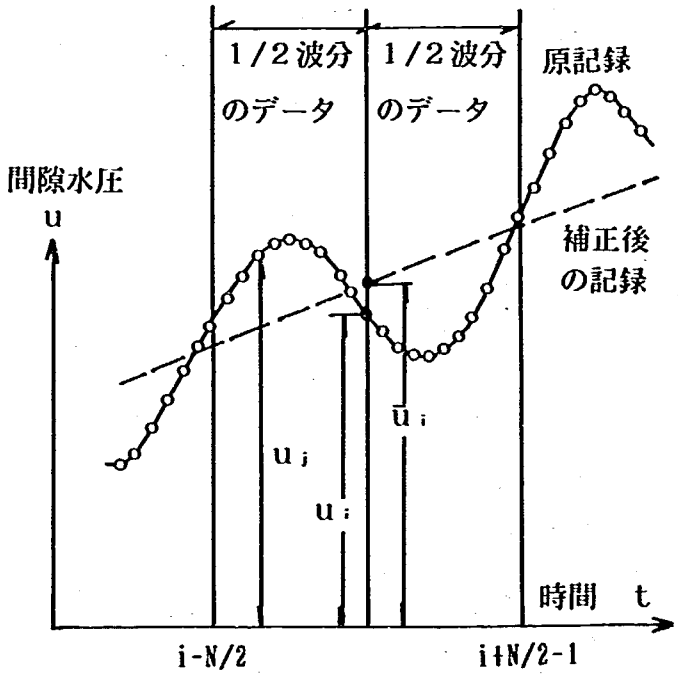
$$u_i = \sum_{j=i-N/2}^{j=i+N/2-1} u_j / N$$

u_i：補正後のデータ

u_j：サンプリングデータ

N　：1波分のデータ個数

$$N = \frac{\text{サンプリング周波数}}{\text{加振周波数}}$$



第Ⅱ編　液状化地盤中の杭の水平抵抗に関する実験データの検討

1．検討を実施した振動台実験の概要

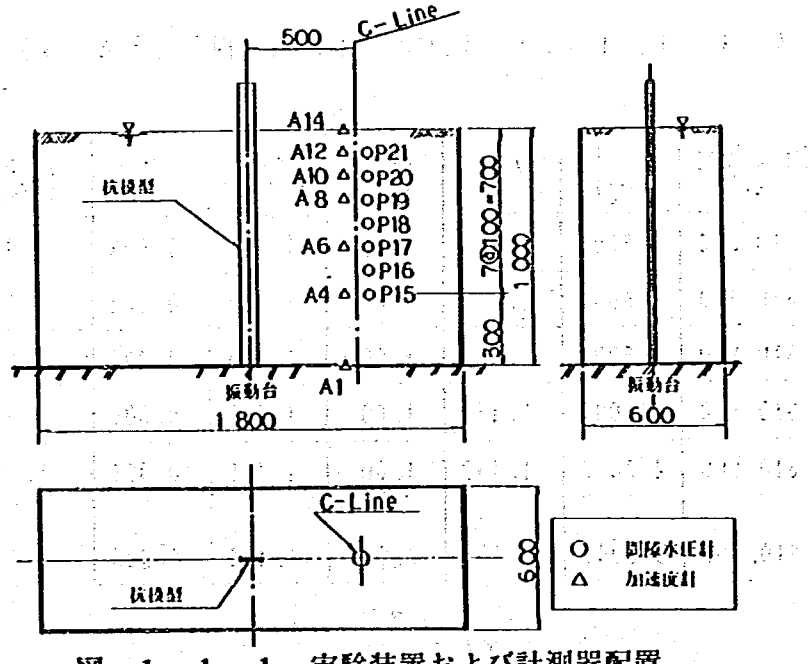
検討に使用した振動台実験は、昭和６１年１０月に実施された液状化地盤中での杭の水平載荷模型実験である。振動台上に設置された60cm×180cm×100cmのせん断箱に揺る詰め砂状態の地盤模型を作成し、計２３回の加振振動実験を実施した。最大加速度と入力波数を調整し、数種の液状化状態を発生させ、杭の水平抵抗差を把握するのを主目的としている。

1.1　実験模型と材料特性

実験に使用したせん断箱および６回の地盤作成時の土の物理定数に関して図－1.1.1及び表－1.1.1(a)～(f)に示す。

1.2　加振条件と計測方法

加振条件は、５HZの正弦波を最大加速度と入力波数を調整した、表－1.2.1に示す２３ケースである。地盤最浅部での最大過剰間隙水圧比は約u/σ_{v0}'＝0.25～0.92の範囲である。（表－1.2.2）せん断箱内の計測器配置は、図－1.1.1に示すとおりである。杭から５０cm離れた（C）ライン上の加速度・間隙水圧計は、杭模型から十分離れており、せん断箱内の液状化発生状況を平均的に代表するものと考えられる。今回の検討に使用した記録データは（C）ライン上の加速度計７箇所（振動台も含む）と間隙水圧計７箇所である。



図－１．１．１　実験装置および計測器配置

表－１．１．１（ａ）　地盤の物理定数（模型番号Ａ－１）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	314.155	216000	1.454	0.37	1.449	0.874	1.916	39.4
2	312.865	216000	1.448	0.38	1.443	0.882	1.912	37.2
3	317.200	216000	1.469	0.62	1.460	0.860	1.923	43.3
4	318.925	216000	1.477	0.41	1.471	0.846	1.930	47.2
5	316.645	216000	1.466	0.45	1.459	0.862	1.922	42.8
平均	315.958	216000	1.463	0.45	1.456	0.865	1.920	41.9

表－１．１．１（ｂ）　地盤の物理定数（模型番号Ａ－２）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	314.130	216000	1.454	0.21	1.451	0.872	1.917	40.0
2	315.410	216000	1.460	0.58	1.452	0.871	1.917	40.3
3	313.060	216000	1.449	0.71	1.439	0.887	1.909	35.8
4	313.350	216000	1.451	0.97	1.437	0.890	1.908	35.0
5	314.780	216000	1.457	0.94	1.443	0.882	1.912	37.2
平均	314.150	216000	1.454	0.68	1.444	0.881	1.912	37.5

表－１．１．１（ｃ）　地盤の物理定数（模型番号Ａ－３）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	310.800	216000	1.439	0.80	1.428	0.902	1.902	31.7
2	310.800	216000	1.439	0.80	1.428	0.902	1.902	31.7
3	310.800	216000	1.439	1.00	1.425	0.906	1.900	30.6
4	310.800	216000	1.439	1.00	1.425	0.906	1.900	30.6
5	310.800	216000	1.439	1.00	1.425	0.906	1.900	30.6
平均	310.800	216000	1.439	0.90	1.426	0.905	1.901	30.8

表－１．１．１（ｄ）　地盤の物理定数（模型番号Ｂ－１）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	310.800	216000	1.439	0.10	1.438	0.889	1.908	35.3
2	310.800	216000	1.439	0.40	1.433	0.895	1.906	33.6
3	310.800	216000	1.439	0.00	1.439	0.887	1.909	35.8
4	310.800	216000	1.439	0.10	1.438	0.889	1.908	35.3
5	310.800	216000	1.439	0.10	1.438	0.889	1.908	35.3
平均	310.800	216000	1.439	0.10	1.438	0.889	1.908	35.3

表－１．１．１（ｅ）　地盤の物理定数（模型番号Ｂ－２）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	310.800	216000	1.439	0.30	1.435	0.893	1.906	34.2
2	310.800	216000	1.439	0.20	1.436	0.891	1.907	34.7
3	310.800	216000	1.439	0.30	1.435	0.893	1.906	34.2
4	310.800	216000	1.439	0.10	1.438	0.889	1.908	35.3
5	310.800	216000	1.439	0.30	1.435	0.893	1.906	34.2
平均	310.800	216000	1.439	0.20	1.436	0.891	1.907	34.7

表－１．１．１（ｆ）　地盤の物理定数（模型番号Ｂ－３）

	投入土量 (kg)	体　積 (cm^3)	γt gf/cm^3	ωn (%)	γd gf/cm^3	e	γsat gf/cm^3	Dr (%)
1	310.800	216000	1.439	0.13	1.437	0.890	1.860	35.0
2	310.800	216000	1.439	0.08	1.439	0.887	1.909	35.8
3	310.800	216000	1.439	0.17	1.437	0.890	1.860	35.0
4	310.800	216000	1.439	0.18	1.436	0.891	1.907	34.7
5	310.800	216000	1.439	0.30	1.435	0.893	1.906	34.2
平均	310.800	216000	1.439	0.17	1.437	0.890	1.908	35.0

表－１．２．１　加振条件一覧表

			A－1	A－2	A－3	B－1	B－2	B－3
杭　幅 (cm)			5	5	5	15	15	15
Dr (%)			41.9	37.5	30.8	35.3	34.7	35.0
加振条件	C1	amax (gal)	——	94.1	91.9	——	——	——
		波　数	——	1	1	——	——	——
		壁変位 (cm)	——	0.14	0.122	——	——	——
	C2	amax (gal)	69.4	94.4	95.0	92.2	93.0	95.5
		波　数	2	2	2	1	1	1
		壁変位 (cm)	0.05	0.22	0.22	0.14	0.16	0.13
	C3	amax (gal)	74.3	98.2	99.8	91.9	93.8	94.7
		波　数	4	4	4	2	2	4
		壁変位 (cm)	0.07	0.24	0.25	0.22	0.22	0.34
	C4	amax (gal)	74.9	97.0	97.7	96.3	93.0	93.9
		波　数	8	8	8	4	4	16
		壁変位 (cm)	0.05	0.15	0.28	0.26	0.27	0.31
	C5	amax (gal)	——	——	97.3	97.1	95.7	——
		波　数	——	——	16	8	16	——
		壁変位 (cm)	——	——	0.24	0.26	0.27	——

表－１．２．２　間隙水圧移動平均前の最大間隙水圧比

		A－1	A－2	A－3	B－1	B－2	B－3
C1	P15	——	0.156	0.125	——	——	——
	P17	——	0.197	0.160	——	——	——
	P19	——	0.262	0.227	——	——	——
	P21	——	0.368	0.292	——	——	——
C2	P15	0.007	0.356	0.290	0.147	0.175	0.150
	P17	0.010	0.404	0.364	0.199	0.221	0.201
	P19	0.151	0.491	0.529	0.288	0.314	0.315
	P21	0.245	0.741	0.655	0.401	0.409	0.666
C3	P15	0.128	0.560	0.451	0.466	0.400	0.676
	P17	0.186	0.628	0.525	0.463	0.468	0.728
	P19	0.293	0.672	0.682	0.623	0.620	0.784
	P21	0.703	0.934	0.826	0.756	0.811	1.021
C4	P15	0.187	0.348	0.615	0.528	0.595	0.841
	P17	0.266	0.427	0.706	0.705	0.684	0.861
	P19	0.373	0.626	0.805	0.841	0.711	0.841
	P21	0.889	0.919	0.835	0.845	0.834	0.918
C5	P15	——	——	0.673	0.641	0.786	——
	P17	——	——	0.850	0.832	0.828	——
	P19	——	——	0.851	0.927	0.805	——
	P21	——	——	0.865	0.898	0.811	——

２．実験データの整理方法

図－1.1.1の計器配置中、加速度計と間隙水圧計が、配置されている GL-10cm,-20cm,-30cm,-40cm,-50cm,-60cm,-70cmの７深度が検討の対象となる。全２３ケースの加振振動実験中、液状化発生特性を検討可能となる以下の２条件より今回の検討ケースを選出する。

（１）移動平均補正後の最大過剰間隙水圧比が 全層にわたり$u/\sigma_{vo}' = 0.6$以上となるもの。

（２）ひずみ波数が８波以上確認できるもの。

上記条件は、いずれも強震時の実地盤での液状化発生状態を想定できるものである。その結果、表－1.2.1中のＡ３Ｃ４，Ａ３Ｃ５，Ｂ１Ｃ５，Ｂ２Ｃ５，Ｂ３Ｃ４の５ケースを検討ケースとする。

２.１　加速度データの整理

加速度記録から、最終的に必要な歪波形を算出するにあたり、加速度計の傾斜により発生する加速度成分を補正する。補正方法は５HZの正弦波加振であるため次式を使用し、一波毎の基線補正を行う。

$$\overline{\alpha}_i = \alpha_i - \alpha_H \quad (i=1,\sim N) \tag{2.1.1}$$

$$\alpha_H = \sum_{i=1}^{N} \alpha_i / N \tag{2.1.2}$$

ここに、 $\overline{\alpha}_i$：基線補正後のデータ

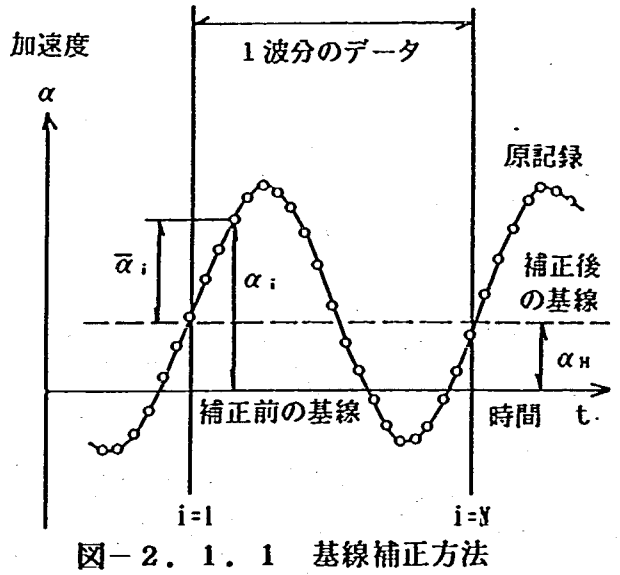
α_H：１波毎の基線補正量

α_i：サンプリングデータ

N ：１波分のデータ個数（N＝f1/f2＝40個）

f１：サンプリング周波数（＝200Hz）

f２：加振周波数 （＝ 5Hz）



図－２．１．１　基線補正方法

2．2　間隙水圧データの整理

間隙水圧データは、加振周波数により振動しながら蓄積が行われているため、振動成分を補正し、全体的な間隙水圧蓄積過程を表現できるよう、次式により移動平均を行う。

$$\overline{u}_i = \sum_{j=i-N/2}^{j=i+N/2} u_j \Big/ N \qquad (2.2.1)$$

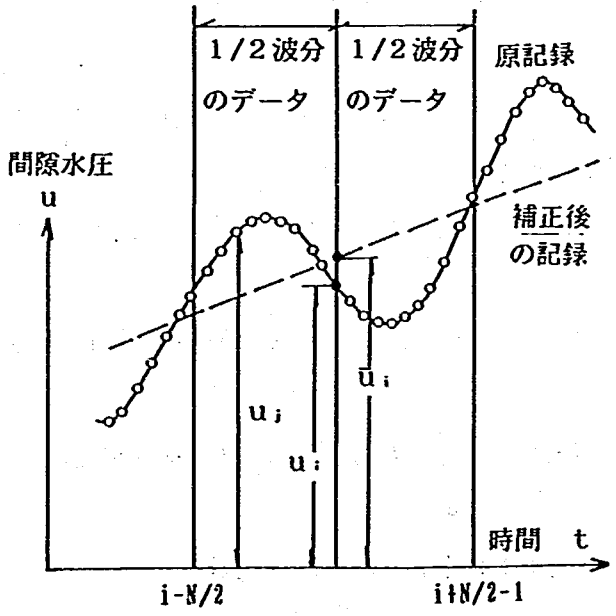
ここに、　$\overline{u}_i$：補正後のデータ

u_j：サンプリングデータ

N　：１波分のデータ個数（N＝f1/f2＝40個）

f１：サンプリング周波数（＝200Hz）

f２：加振周波数　　（＝　5Hz）



図－２．２．１　移動平均による補正

3．間隙水圧とせん断ひずみ関係

第Ⅰ編7．2．2によれば、過剰間隙水圧比と累積せん断ひずみの間には、双曲線関係があることが認められており、今回の検討は、せん断ひずみに着目して間隙水圧との比較を再度行い第Ⅰ編での発生間隙水圧と地盤内せん断ひずみとの関係を検討する。

3．1　せん断ひずみの算出方法

各深度におけるせん断ひずみ分布は、同時刻における水平方向変位により次式で定義される。

$$\gamma = \frac{dy}{dz} \qquad (3.1.1)$$

ここに、　γ　：せん断ひずみ
　　y　：水平方向変位
　　z　：深度

水平変位は、加速度を2回積分する事により算出される。今回の検討において各積分毎に、データサンプリング周波数と加振周波数が厳密に整数倍でないことによる周波数成分を補正するため、加速度と同様な補正を実施した。積分方法は第Ⅰ編と同様に直接数値積分法を用いた。

せん断ひずみの算出方法は、深度方向に7点の深度（Z）及び水平変位（y）が各時間において既知であるため、変位モードを6次曲線として算出する。（図－3.1.1）

$$y(z,t)=a(t)\cdot Z^6+b(t)\cdot Z^5+c(t)\cdot Z^4+d(t)\cdot Z^3+e(t)\cdot Z^2+f(t)\cdot Z+g(t) \qquad (3.1.2)$$

ここに、　$y(z,t)$　：時刻t，深度zにおける水平変位
　　Z　：深度
　　$a(t)\sim g(t)$　：時刻tにおける定数

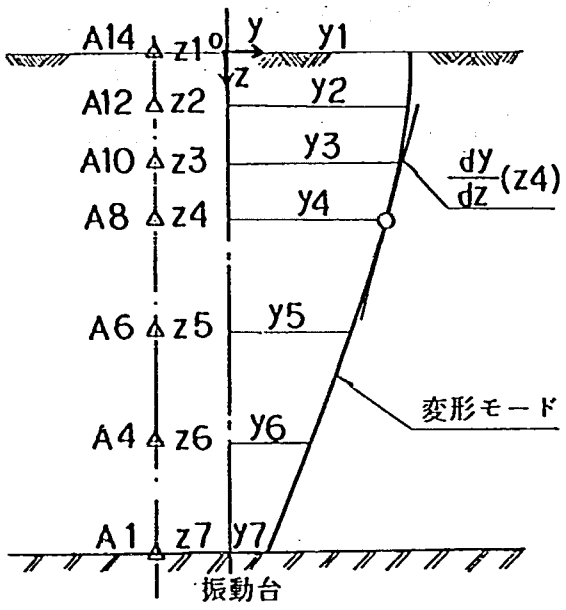
上式を使用し、既知の（z，y）を代入することによりa～gの定数が決定される。したがって任意時刻の任意深度でのせん断ひずみは、次式となる。

$$\gamma(z,t)=6a(t)\cdot Z^5+5b(t)\cdot Z^4+4c(t)\cdot Z^3+3d(t)\cdot Z^2+2e(t)\cdot Z+f(t) \qquad (3.1.3)$$

ここに、$\gamma(z,t)$ ：時刻 t，深度 z におけるせん断ひずみ

Z　　：深度

a (t)～g (t)：時刻 t における定数



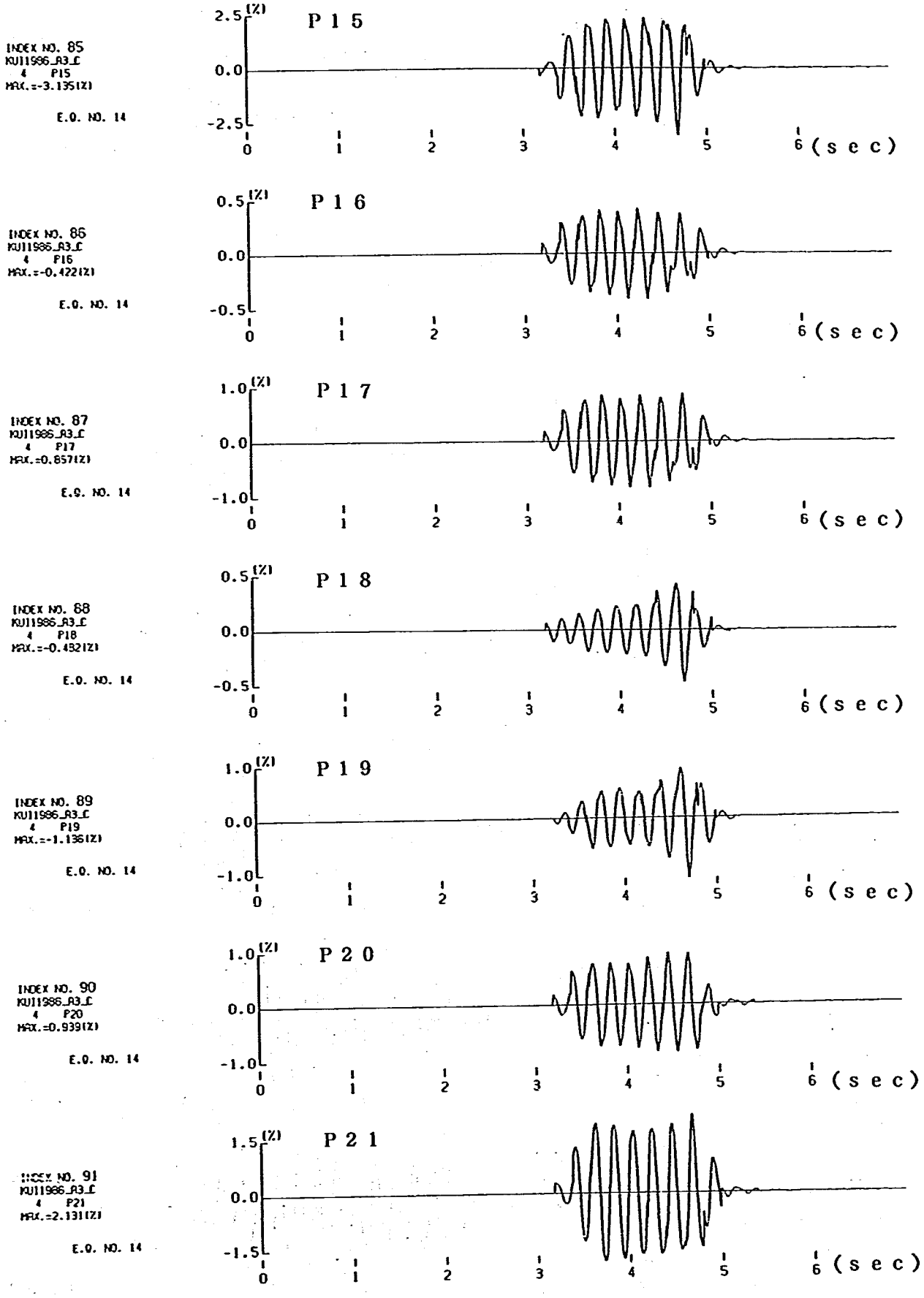
図－３．１．１　せん断ひずみ算出方法

3．2　間隙水圧比の算出方法

第Ⅰ編の報告によると過剰間隙水圧は、深さ方向にほぼ直線的な分布を示すとあるが今回の実験結果では、地表面で間隙水圧が、0となる条件の直線分布とはいい難い（図－3.2.1(a)～(e)）。特に加振後1.0秒あたりまでは、間隙水圧分布は深度の影響を受けない。したがって今回の検討における間隙水圧比は、深度的分布を考慮せず補正後の間隙水圧値をそのまま有効上載圧で除した値として算出する。

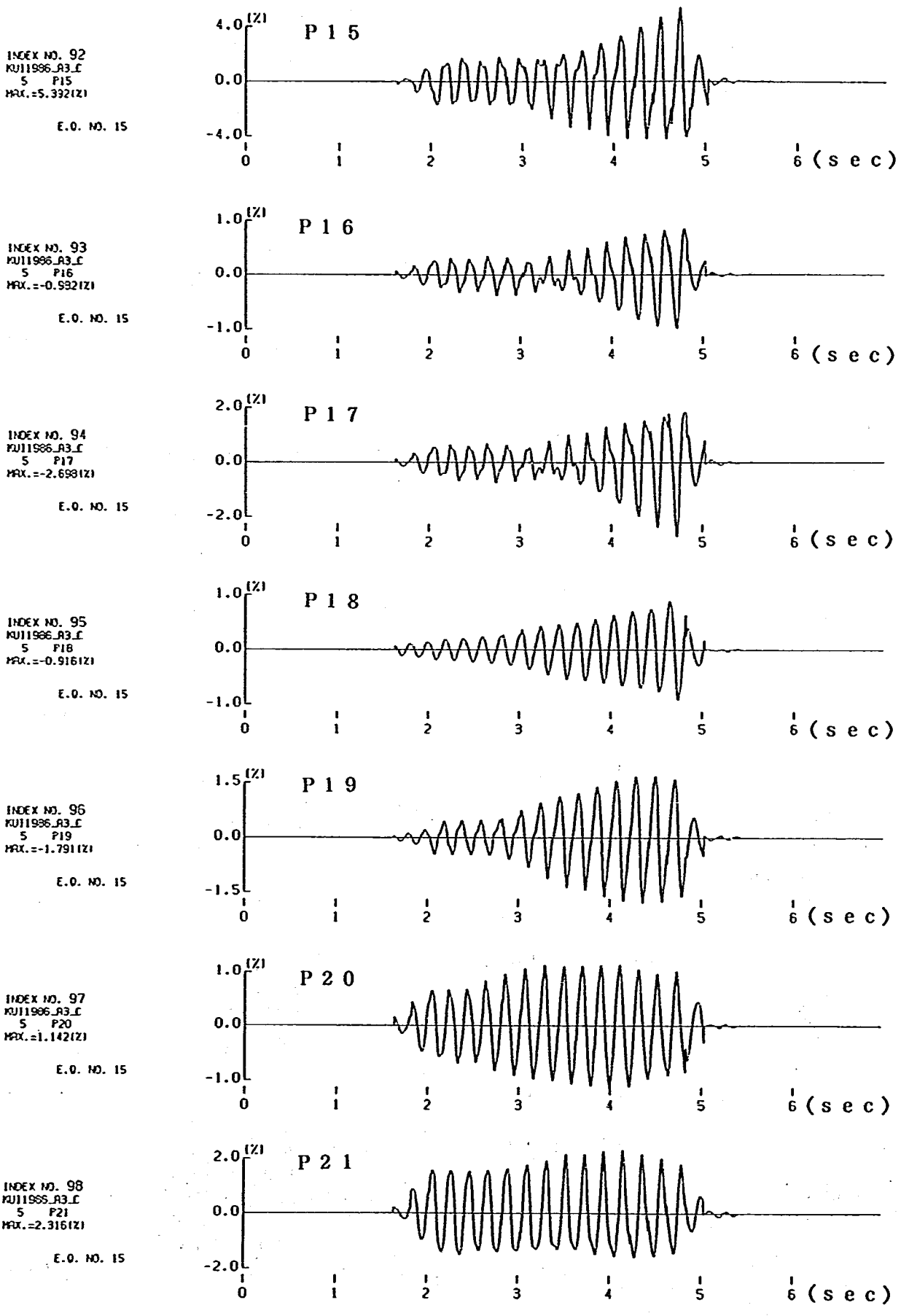
3．3　間隙水圧比とせん断ひずみの時刻歴波形

前項で算出したせん断ひずみ時刻歴及び間隙水圧比時刻歴波形を図－3.3.1,3.3.2に示す。最浅部(P21)及び最深部(P15)のせん断ひずみは、地表及びせん断箱底面での境界の影響を大きくうけ、ひずみの値が地盤中央部の2～3倍の値を示している。これは、変位モードの近似の際に生じる影響と思われる。



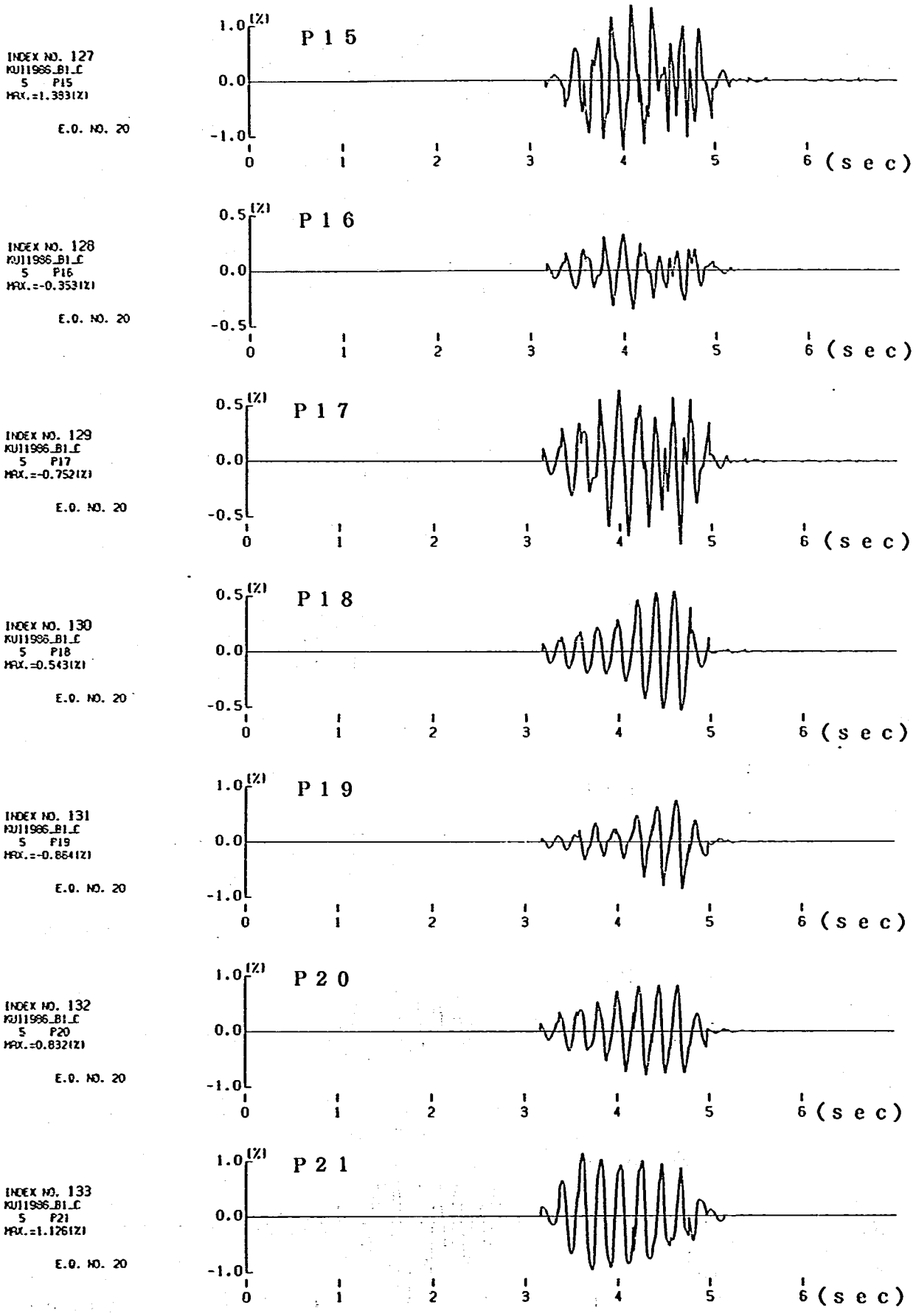
（a）A3C4ケース

図－3．3．1　せん断ひずみ時刻歴波形



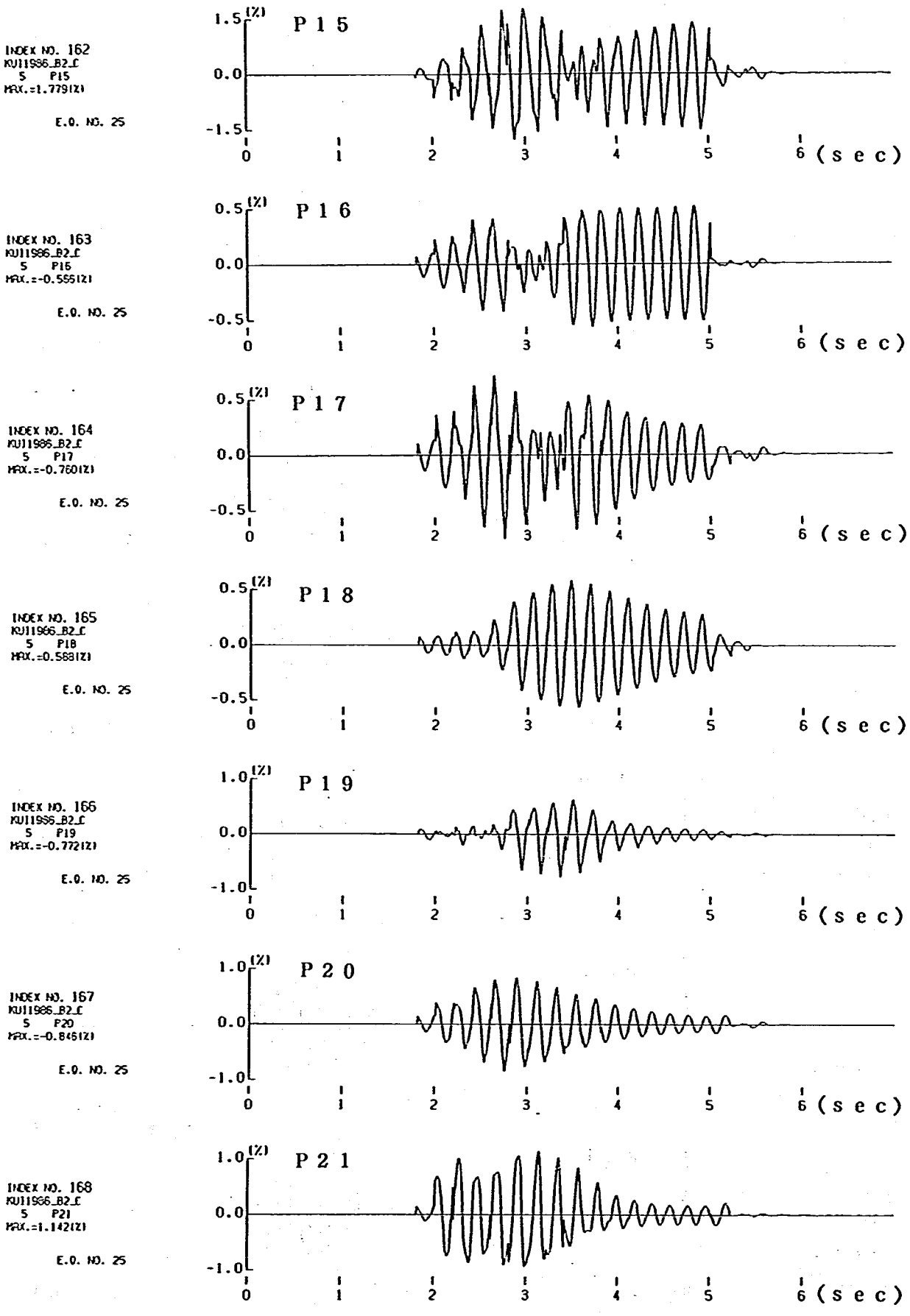
（b）A３C５ケース

図－３．３．１　せん断ひずみ時刻歴波形



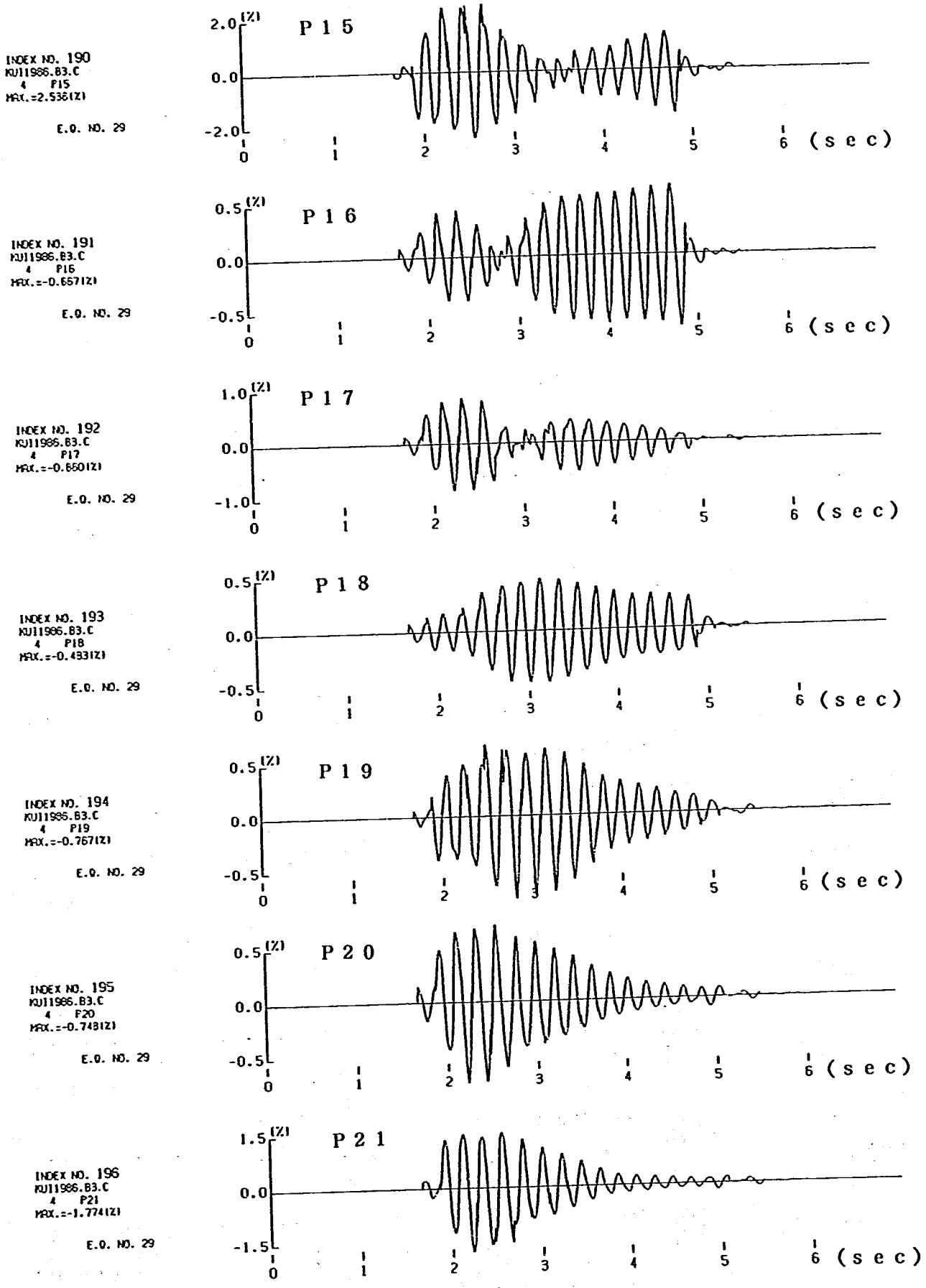
（c）B1C5ケース

図－3．3．1　せん断ひずみ時刻歴波形



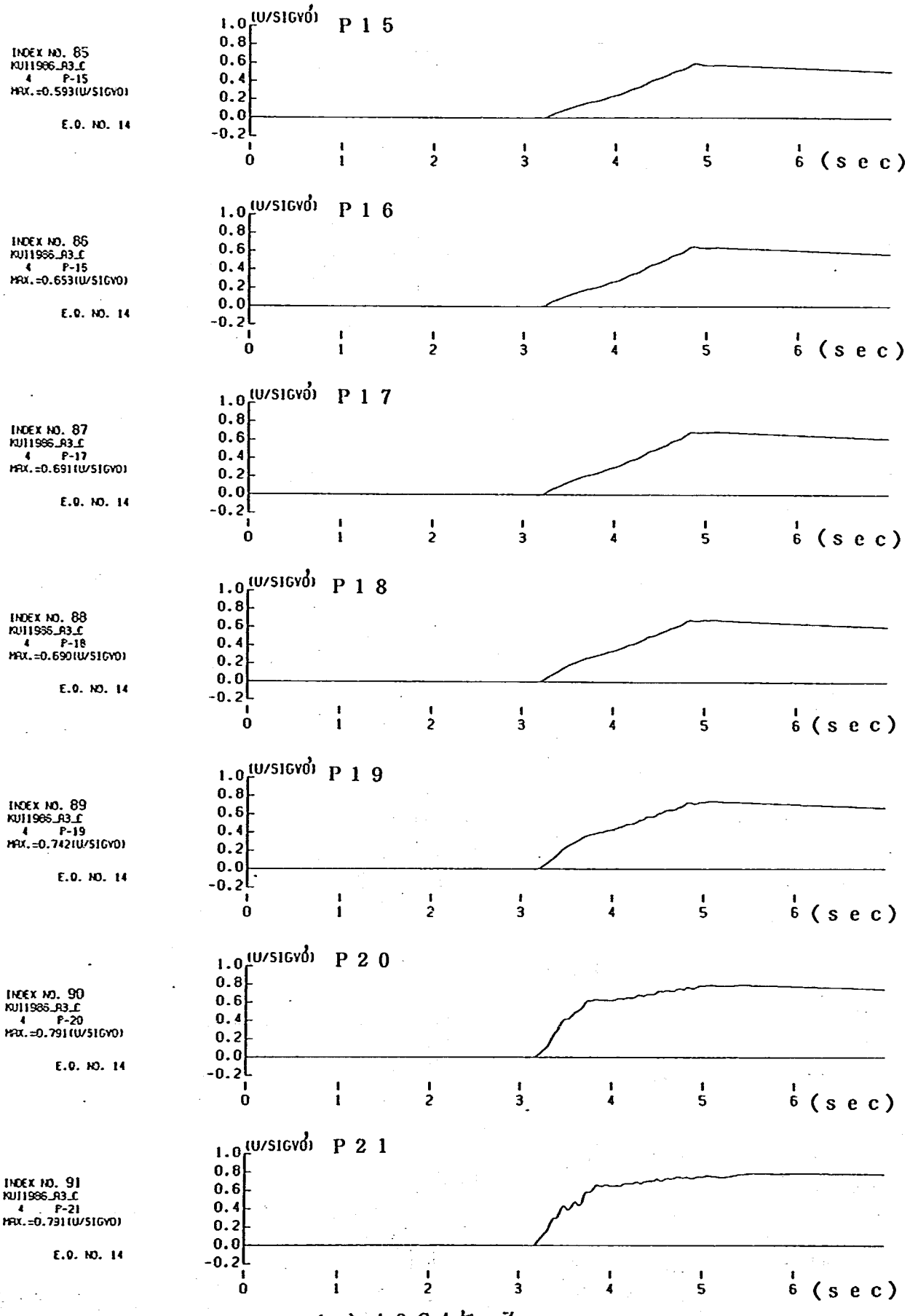
（d）B２C５ケース

図－３．３．１　せん断ひずみ時刻歴波形



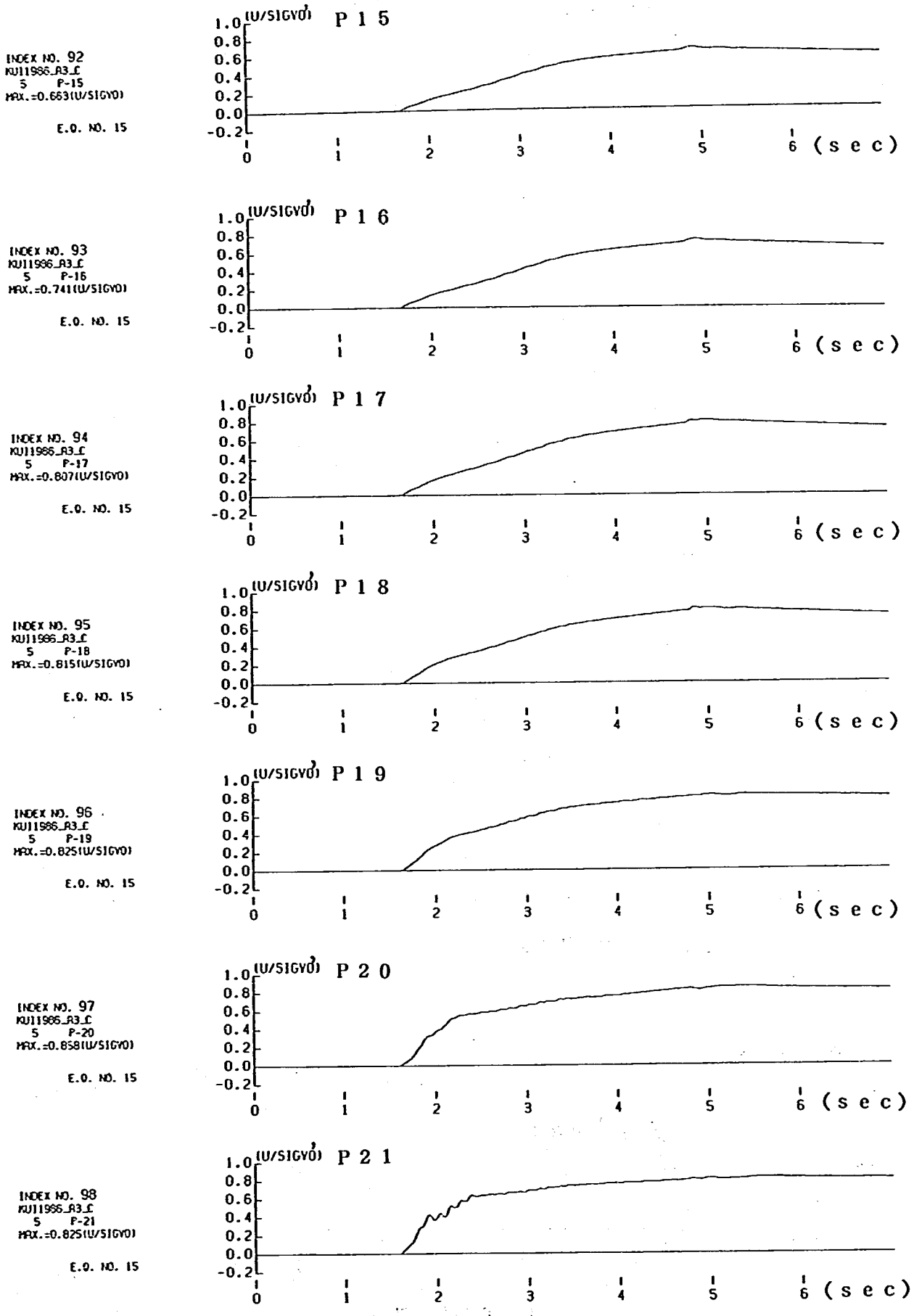
(e) B3C4ケース

図－3．3．1　せん断ひずみ時刻歴波形



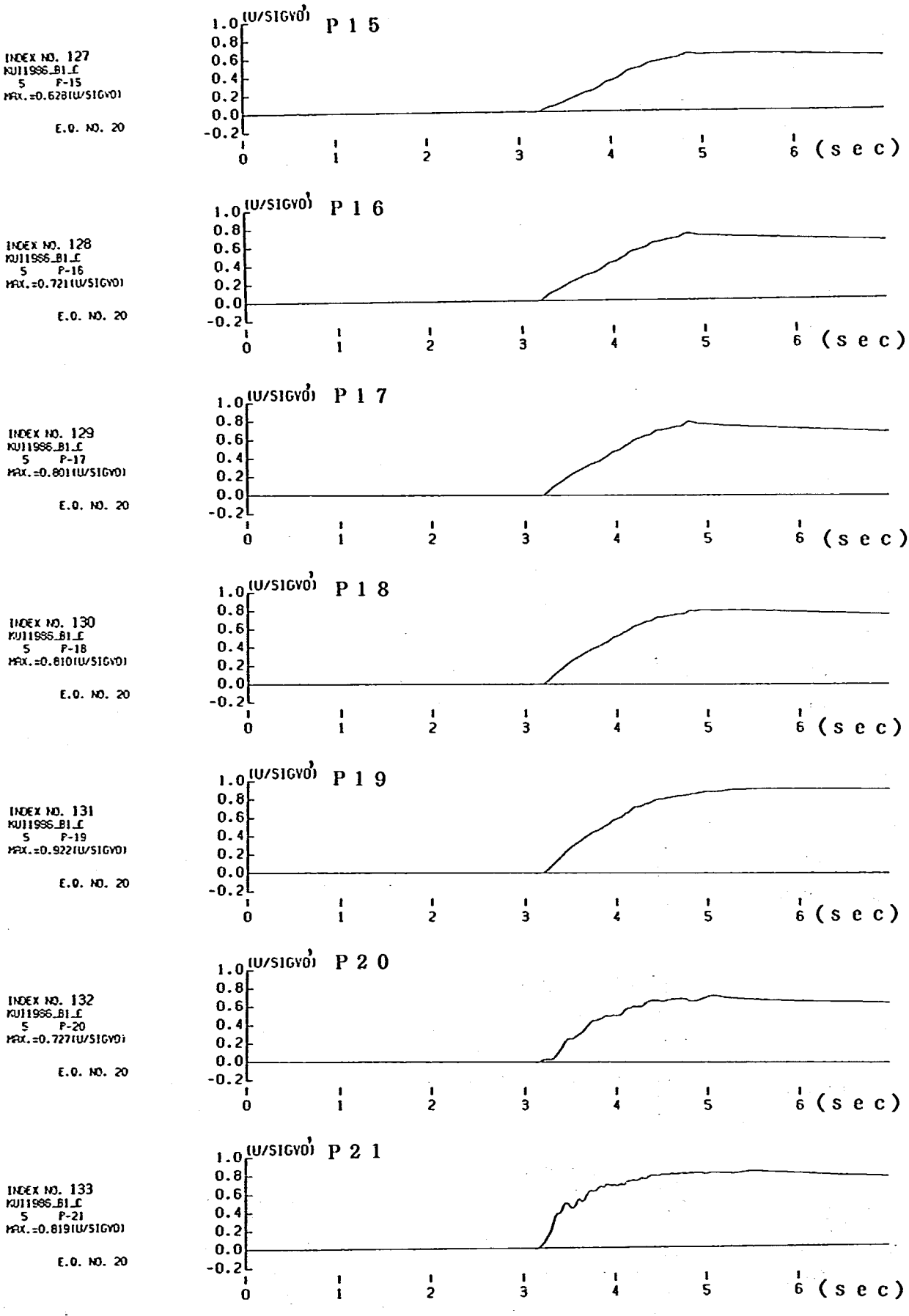
（a）A3C4ケース

図－3．3．2　間隙水圧比時刻歴波形



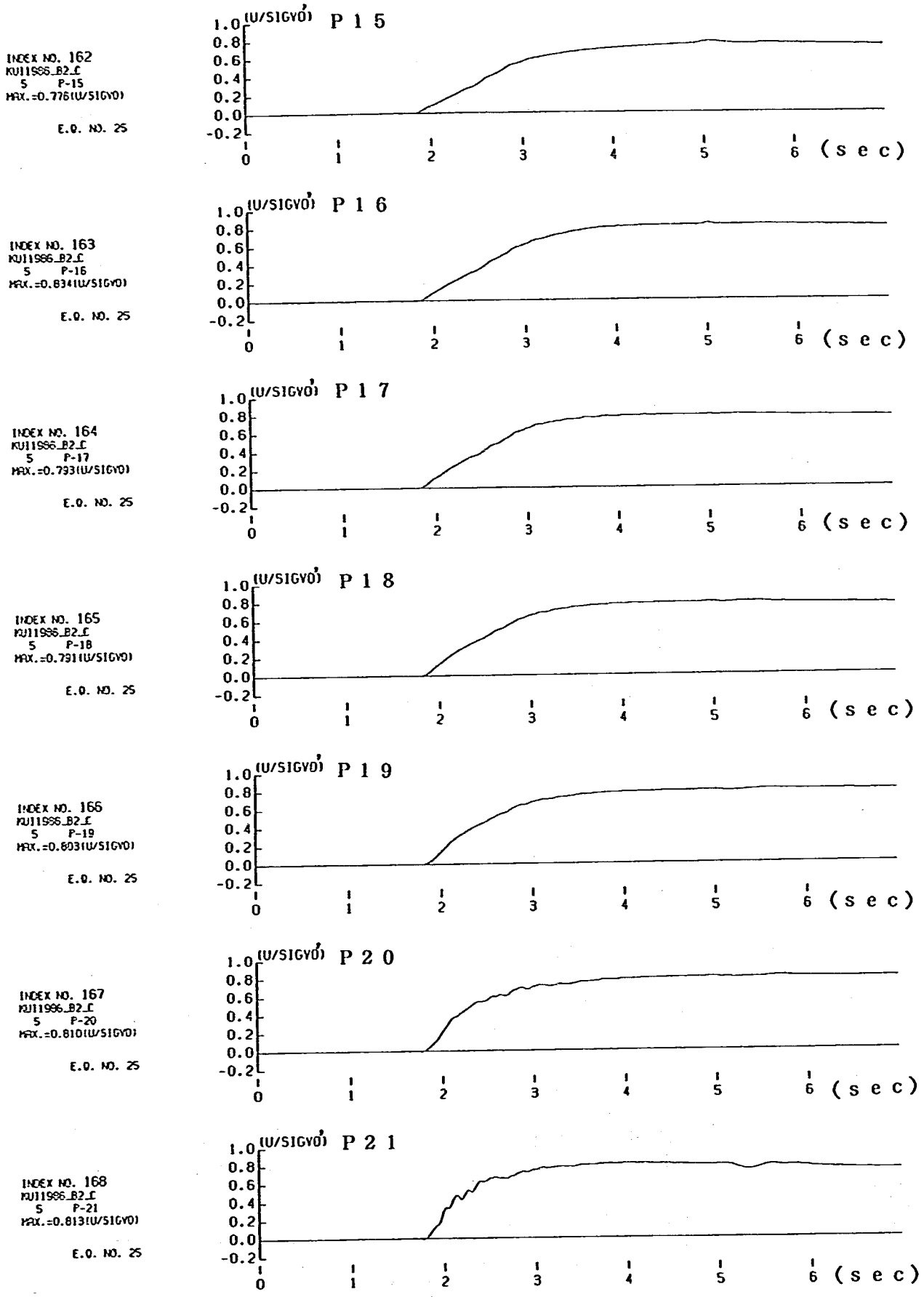
(b) A3C5ケース

図－3．3．2 間隙水圧比時刻歴波形



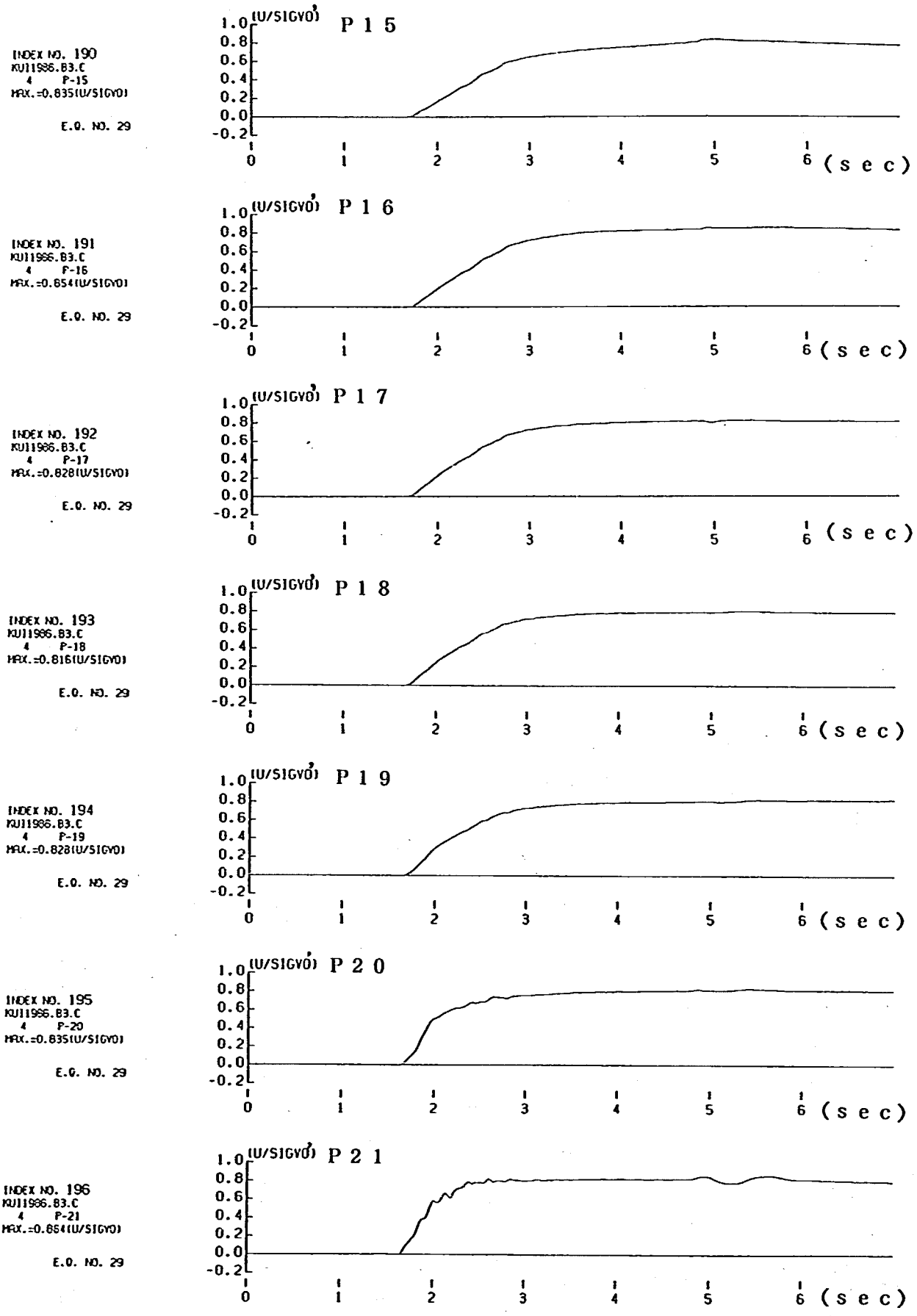
（c）B1C5ケース

図－3．3．2　間隙水圧比時刻歴波形



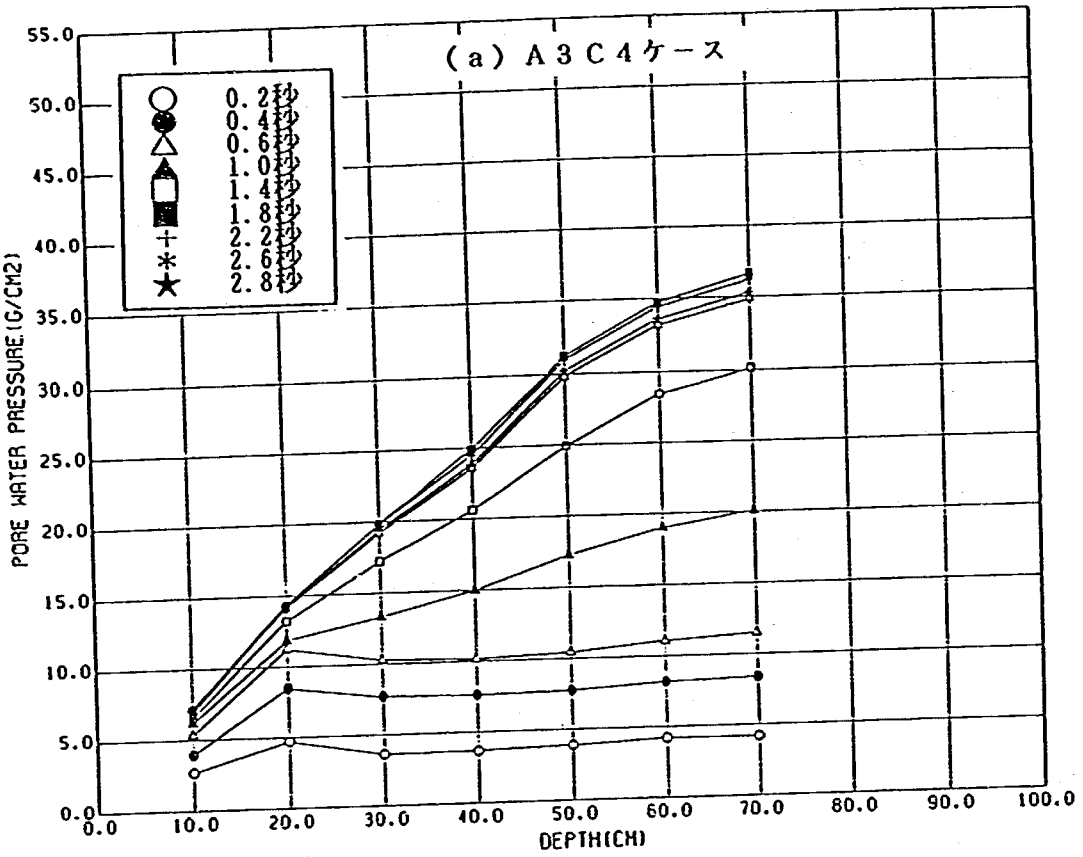
(d) B2C5ケース

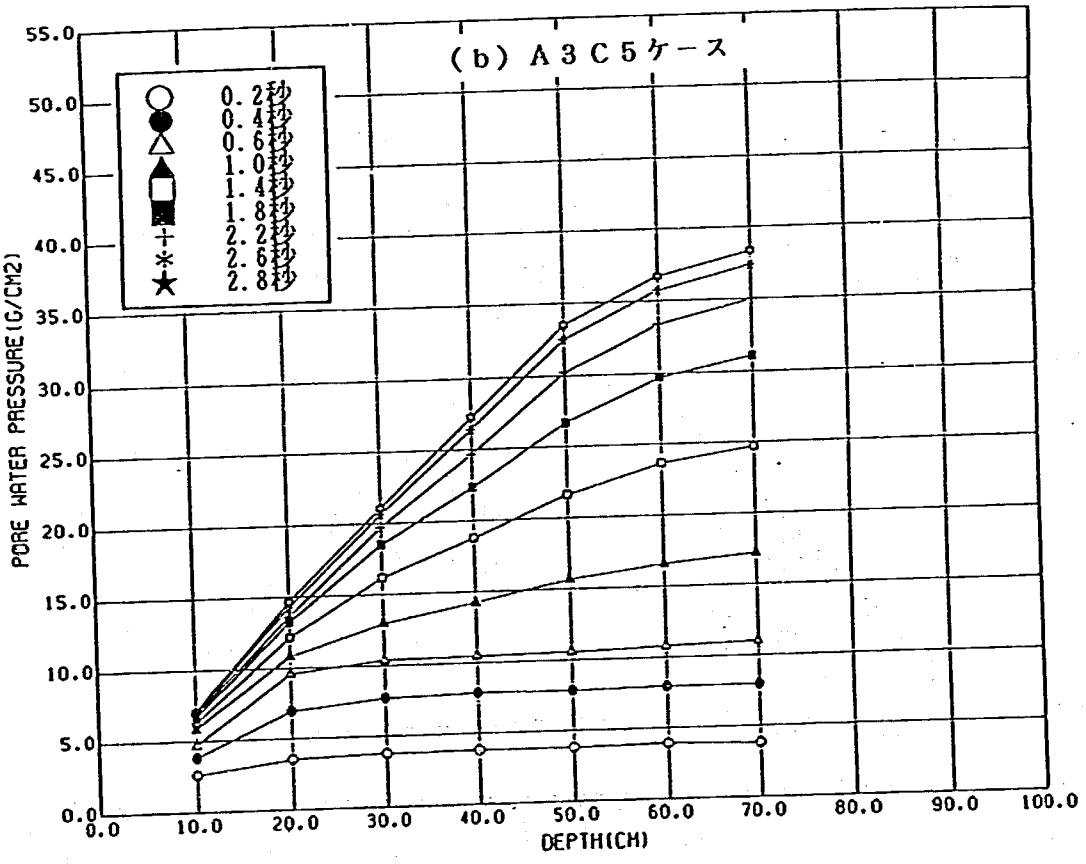
図－3．3．2　間隙水圧比時刻歴波形



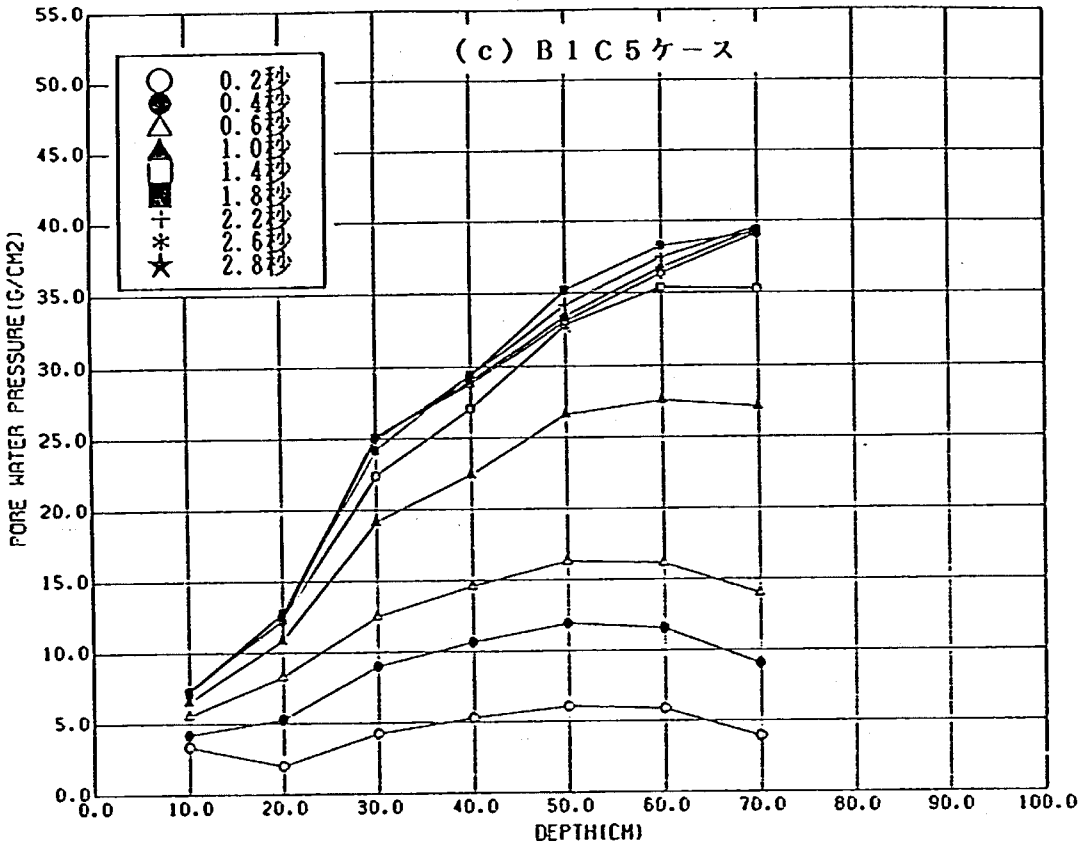
（e）B3C4ケース

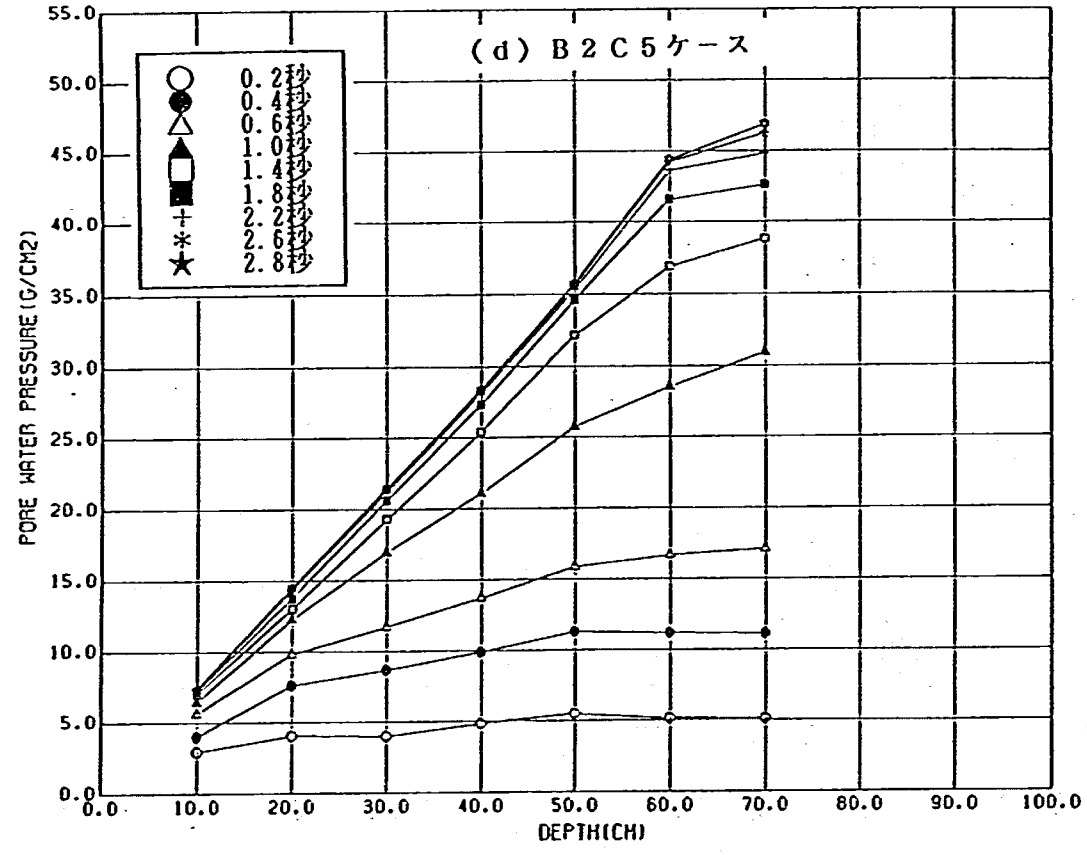
図--3．3．2　間隙水圧比時刻歴波形


(a) A3C4ケース
0.2秒
0.4秒
0.6秒
1.0秒
1.4秒
1.8秒
2.2秒
2.6秒
2.8秒
PORE WATER PRESSURE(G/CM2)
DEPTH(CM)
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
55.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
80.0
90.0
100.0

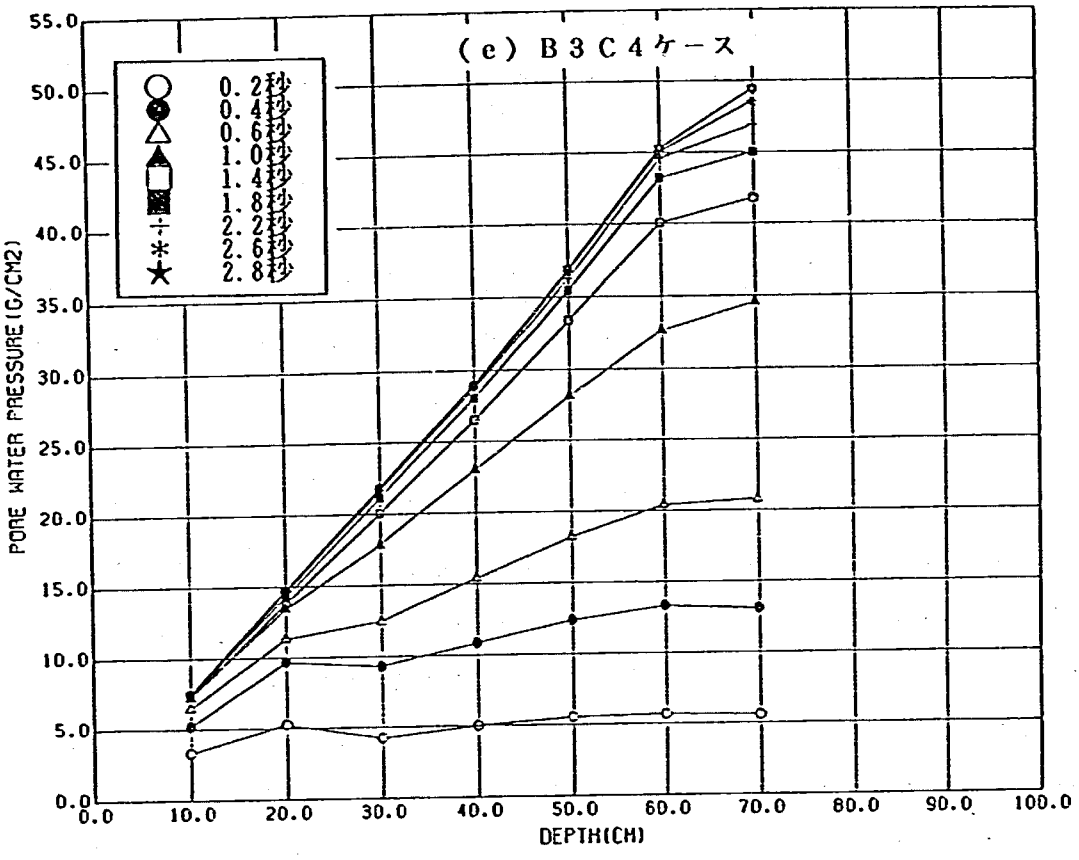

(b) A3C5ケース
0.2秒
0.4秒
0.6秒
1.0秒
1.4秒
1.8秒
2.2秒
2.6秒
2.8秒
PORE WATER PRESSURE(G/CM2)
DEPTH(CM)
0.0
5.0
10.0
15.0
20.0
25.0
30.0
35.0
40.0
45.0
50.0
55.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
80.0
90.0
100.0

図－3．2．1　間隙水圧分布


(c) B1C5ケース
0.2秒
0.4秒
0.6秒
1.0秒
1.4秒
1.8秒
2.2秒
2.6秒
2.8秒
PORE WATER PRESSURE(G/CM2)
DEPTH(CM)
55.0
50.0
45.0
40.0
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
80.0
90.0
100.0


(d) B2C5ケース
0.2秒
0.4秒
0.6秒
1.0秒
1.4秒
1.8秒
2.2秒
2.6秒
2.8秒
PORE WATER PRESSURE(G/CM2)
DEPTH(CM)
55.0
50.0
45.0
40.0
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
80.0
90.0
100.0

図－３．２．１　間隙水圧分布


(e) B3C4ケース
0.2
0.4
0.6
1.0
1.4
1.8
2.2
2.6
2.8
PORE WATER PRESSURE(G/CM2)
DEPTH(CM)
55.0
50.0
45.0
40.0
35.0
30.0
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
0.0
0.0
10.0
20.0
30.0
40.0
50.0
60.0
70.0
80.0
90.0
100.0

図－３．２．１　間隙水圧分布

3.4　間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係

3.4.1　累積せん断ひずみの定義

第Ⅰ編の報告と同様に累積せん断ひずみを間隙水圧発生の内部変数として採用する。

$$\Sigma\gamma_e = \Sigma\,(\overline{\gamma} - \gamma_0) \qquad (3.4.1)$$

ここに、$\Sigma\gamma_e$：実効累積せん断ひずみ(%)

$\overline{\gamma}$　：1波間のひずみの片側の振幅の絶対値の平均(%)

γ_0：Threshold　strain

液状化発生に寄与しないせん断ひずみ値(Threshold　strain)の存在は、R.Dobry等[1]により提案されている。R,Dobryによると、砂の種類、供試体の作成方法及び拘束圧の違いによらず、一定のThreshold　strainが存在すると歪制御三軸試験より確認し、その値は0.01%としている。また、横田－今野－吉田ら[2]は、歪制御三軸試験によりR.Dobryの検証を行いやはり0.01%のThreshold strainを確認している。三軸試験以外の報告では、T.L.Holzer, T.L.Youd, M.J.Bennet[3]が液状化アレー観測記録により0.05%、第Ⅰ編での砕石ドレーン振動台実験では0.05%が確認されている。。今回の検討では、間隙水圧比と比較することによりThreshold　strianについても若干考察する。

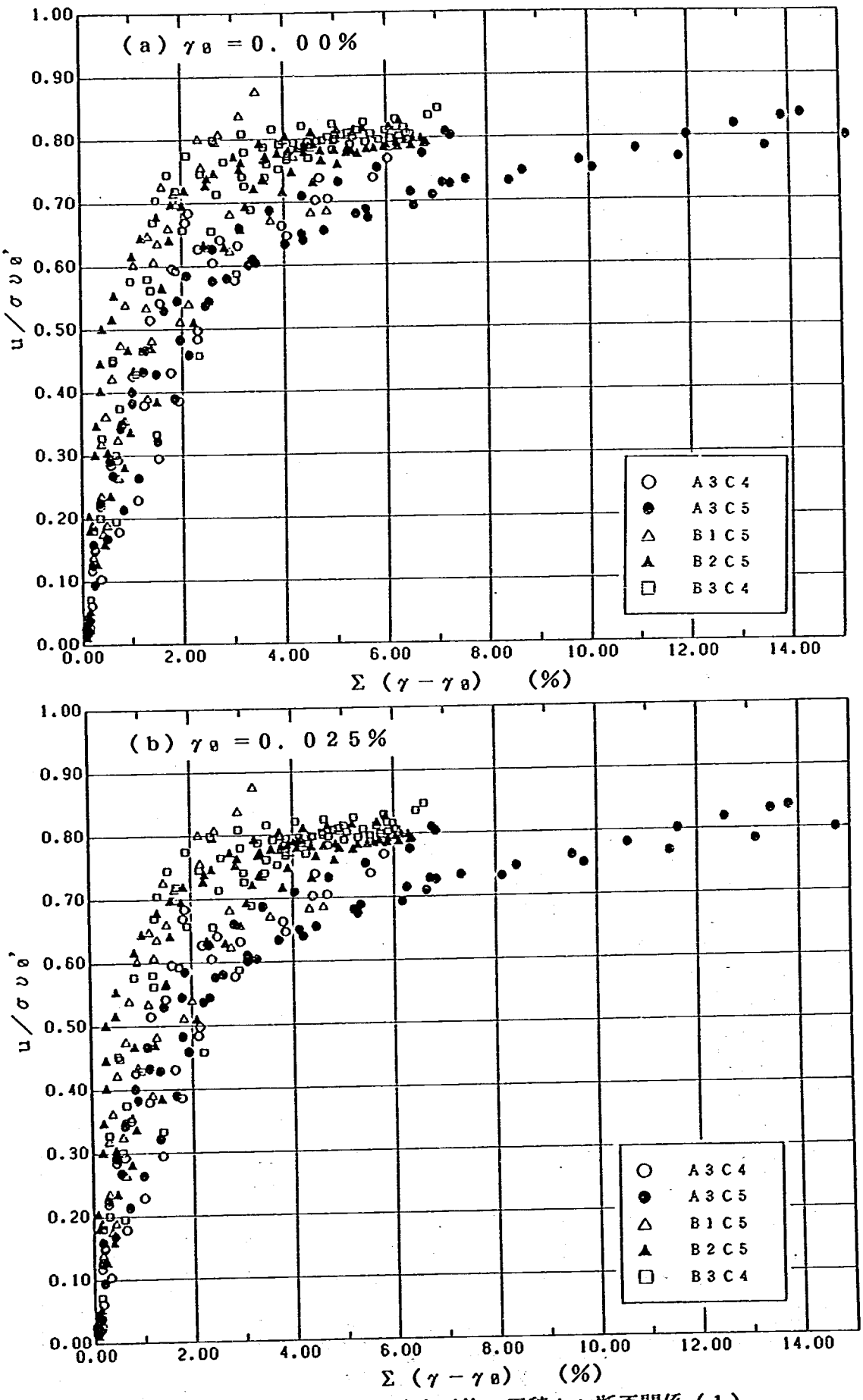
3.4.2　間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係

間隙水圧比と累積せん断ひずみ関係を比較する際に、前項で述べた最深部と最浅部のせん断ひずみは、境界の影響により極端な値（中央部の2～3倍）となっているため、比較から除くこととした。したがって最終比較ケースは、5種類の加振状態で比較深度は間隙水圧設置深度のGL-60cm(P-16),GL-50cm(P-17),GL-40cm(P-18),GL-30cm(P-19),GL-20cm(P-20)の5箇所である。せん断ひずみピーク時刻でのせん断ひずみと比較に使用した同時刻の間隙水圧比のデジタル値を付属資料に示す。

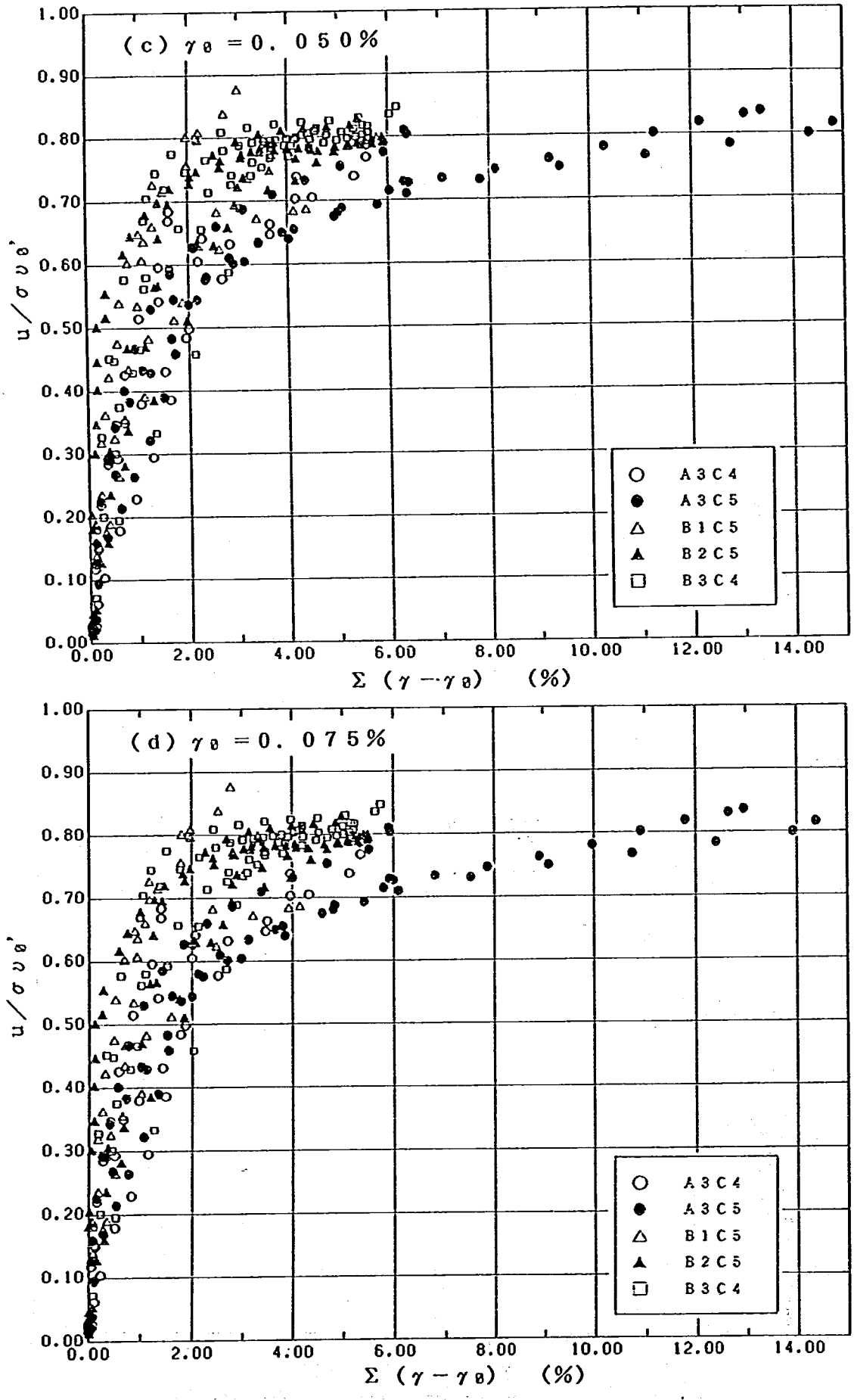
図－3.4.1に、累積せん断ひずみと間隙水圧比との関係を示す。なお、累積せん断ひずみと対応する間隙水圧比は1波間の平均値である。また、2変数は双曲線上の分布形態を示すため図－3.4.1のY軸を$\Sigma\gamma_e/u/\sigma_{vo}'$としたものが図－3.4.2である。

明らかに2変数は、相関がある。γ_0 を0.0%, 0.025%, 0.05%, 0.075%と変化させてプロットさせているが、データの分布状態をみるとγ_0 =0.050%が最も良い集中を示すようである。2変数間の推定式は、第Ⅰ編での双曲線型を採用すると次式となる。

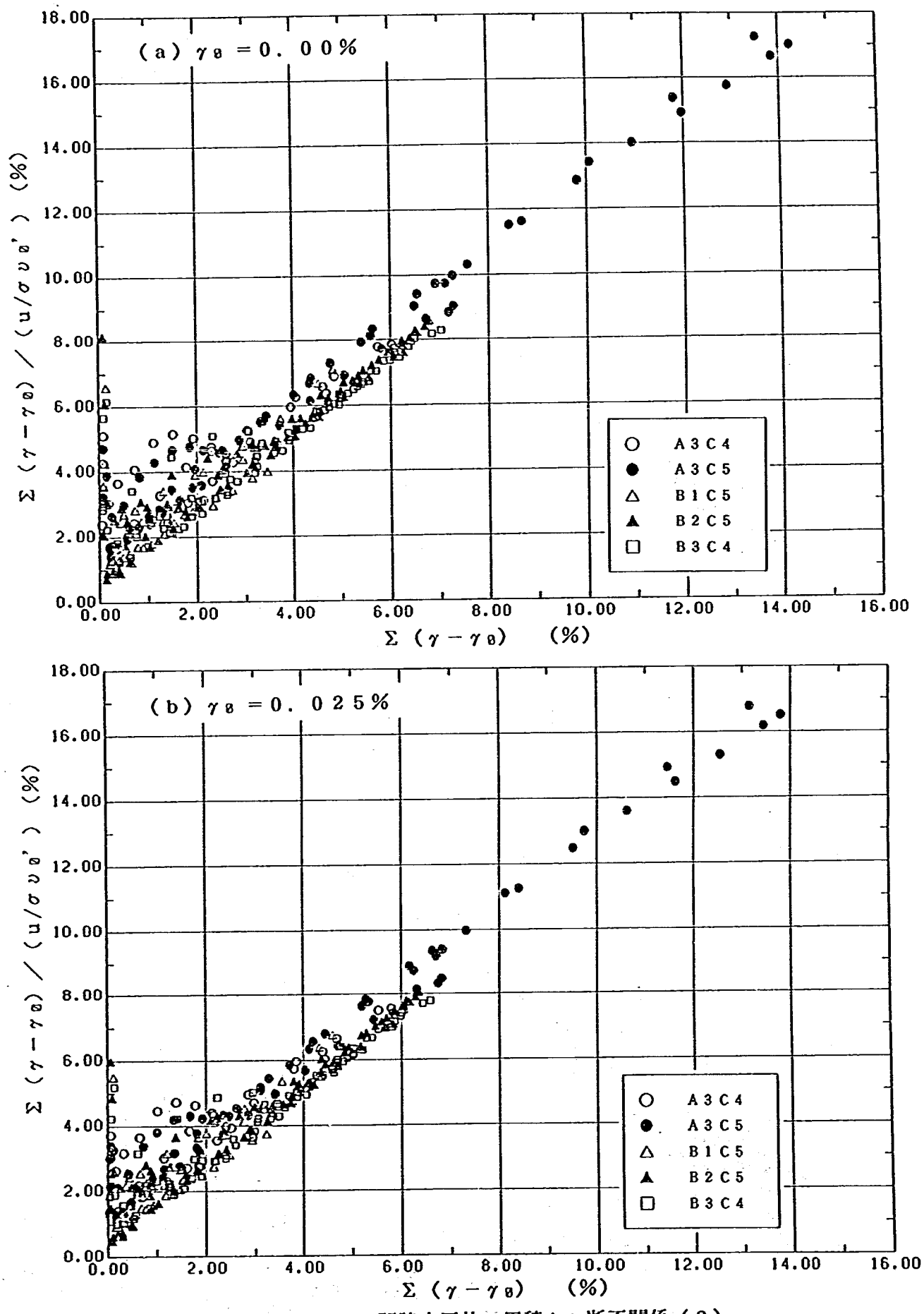
$$u/\sigma_{vo}' = \frac{\Sigma\gamma_e}{1.115\ \Sigma\gamma_e + 1.036} \qquad (3.4.2)$$



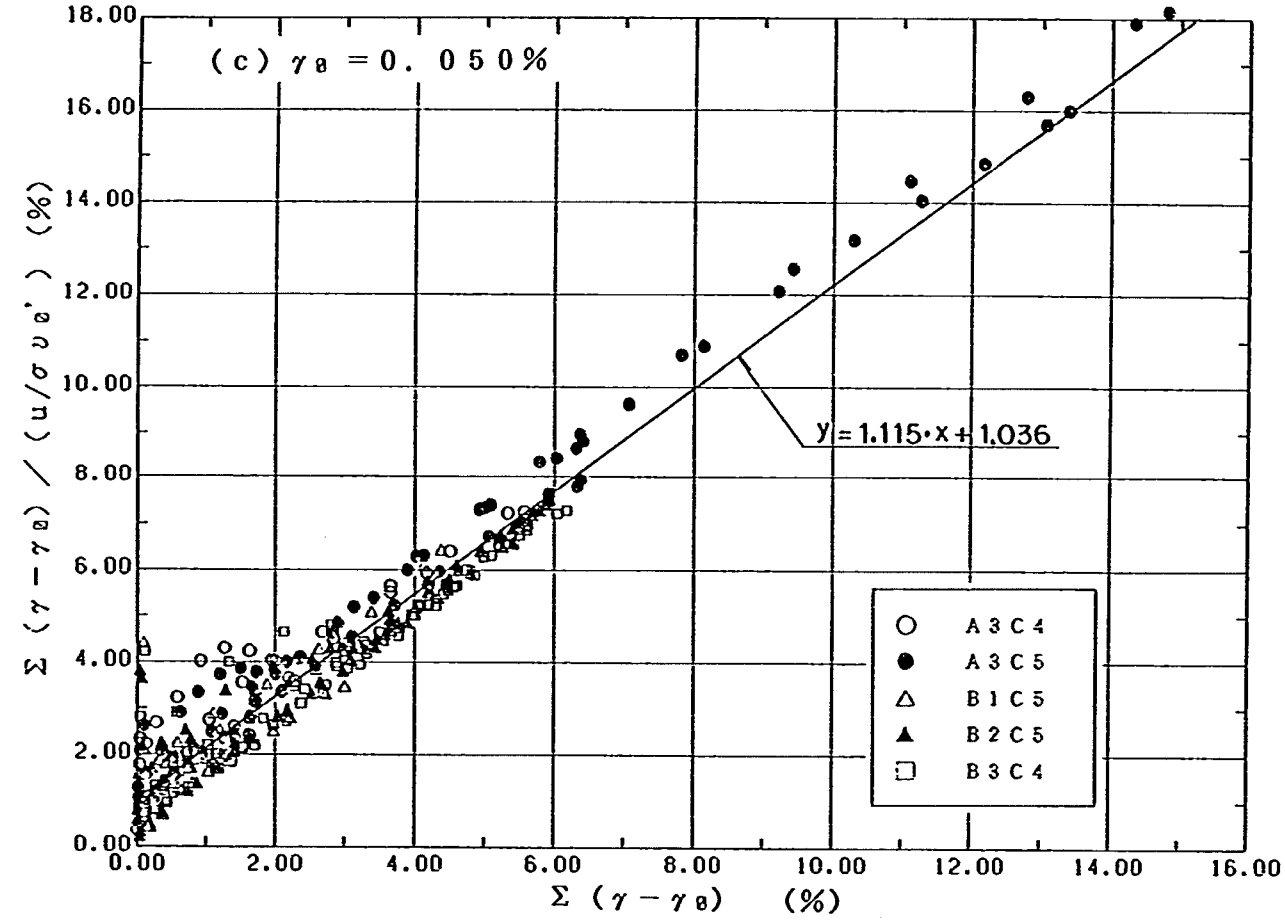
図－3．4．1　間隙水圧比～累積せん断歪関係（1）

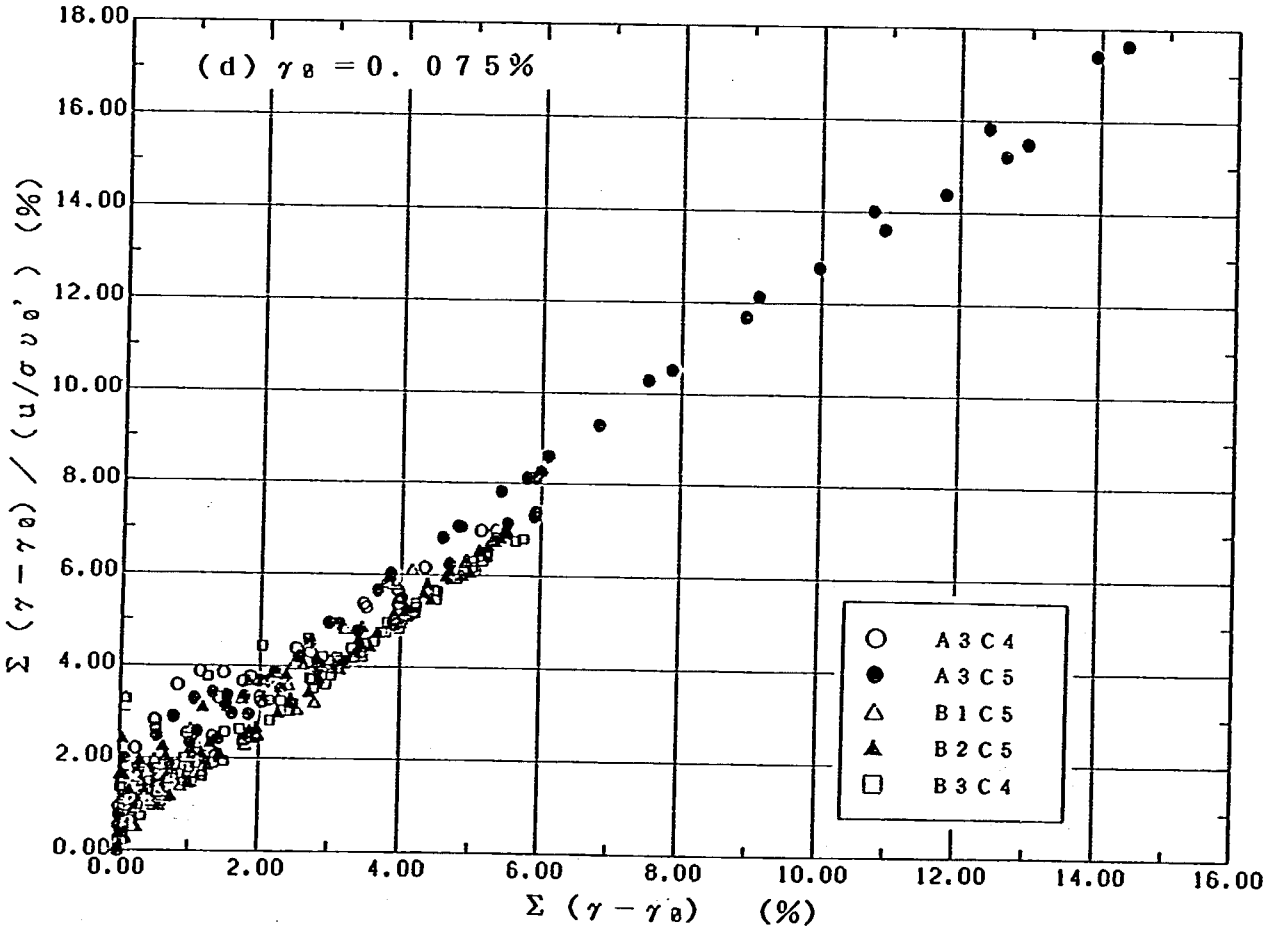


図－3．4．1　間隙水圧比～累積セン断歪関係（1）



図－3．4．2　間隙水圧比～累積セン断歪関係（2）





図－３．４．２　間隙水圧比~累積セン断歪関係（２）

ここに、　u/σ_{vo}' ：過剰間隙水圧比

$\Sigma\gamma_e$ ：実効累積せん断ひずみ（$=\Sigma(\overline{\gamma}-\gamma_0)$）(%)

$\overline{\gamma}$ ：１波間のひずみの片側の振幅の絶対値平均(%)

γ_0 ：Threshold strain (=0.050%) (%)

しかし、上式によるとu/σ_{vo}' =1.0に達しないため、u/σ_{vo}', $\Sigma\gamma_e$ の値の小さい部分に重点をおき、u/σ_{vo}' =1.0に収束する指数関数で表現すると次式となる。指数関数のタイプは、原・清田ら[5]が 粒状体の負のダイレイタンシーの定式化を試みた形式である。

$$u/\sigma_{vo}' = 1 - EXP\left(-0.542(\Sigma\gamma_e)^{0.703}\right) \qquad (3.4.3)$$

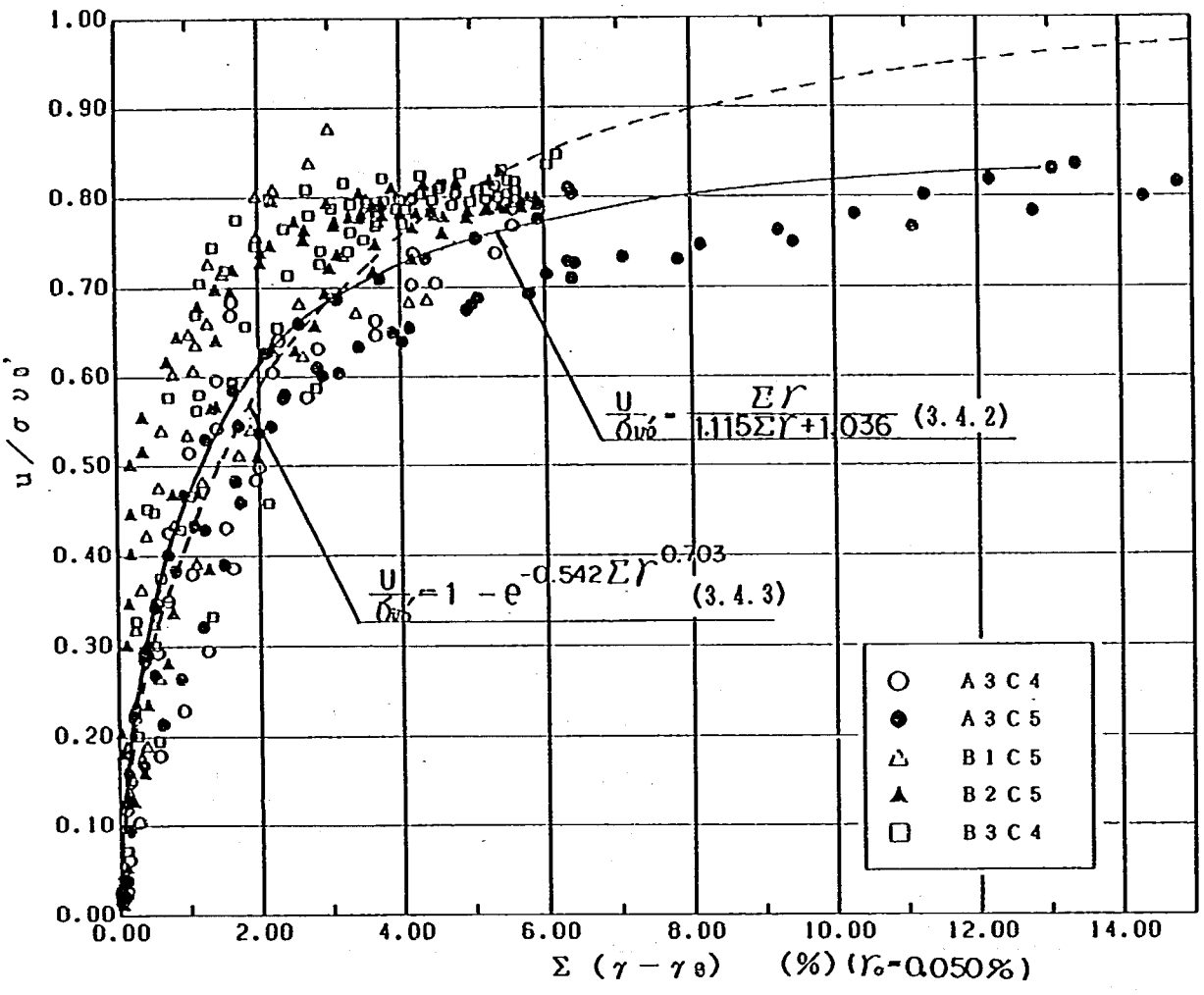
ここに、　u/σ_{vo}' ：過剰間隙水圧比

$\Sigma\gamma_e$ ：実効累積せん断ひずみ（$=\Sigma(\overline{\gamma}-\gamma_0)$）(%)

$\overline{\gamma}$ ：１波間のひずみの片側の振幅の絶対値平均(%)

γ_0 ：Threshold strain (=0.050%) (%)

どちらの式を適用するにせよ、実効累積せん断ひずみと過剰間隙水圧比との間には明確な関係が成立する。(図－3.4.3)



図－３．４．３　間隙水圧推定式

4．第II編のまとめ

第I編の実験データの検討をベースに昭和61年度に実施された、液状化地盤中の杭の水平載荷模型実験のデータ整理を実施し、間隙水圧発生特性の検討を行った。本検討で明かになった事項は、以下の通りである。

(1)本検討においても、第I編の報告による間隙水圧比と累積せん断ひずみとの関係が確認された。この2変数の間に相関関係が存在することは、明確である。今後、間隙水圧評価方法として累積せん断ひずみに着目して実地盤への適用を検討しなければならない。

(2)間隙水圧比と累積せん断ひずみの相関関係の定式化は、双曲線・指数関数タイプとそれぞれの適用性が認められるが、土の物性等を考慮でき、かつ簡便な定式化が必要である。

(3)累積せん断ひずみを求めるためのThreshold strainは、今回の振動台実験結果では、明確には判断されないが、0.05%付近である。

５．第Ⅱ編の参考文献

1)Dobry ,R.,Ladd,R.S.,Chung,R.M.and Powell,D.,1980,Prediction of Pore Water Pressure Buildup and Liquefaction of Sands During Earthquake by the Cyclic Strain Method,NBS BUILDING SCIENCE SERIES 138

2)横田耕一郎、今野政志、吉田一郎(1983)，繰返しせん断歪を用いた液状化ポテンシャルの評価：第18回土質工学研究発表会(郡山)

3)Thomas.L.Holzer,T.Leslie Yound,Michael J.Bennett,In situ measurement of pore pressure build-up during liquefaction :20th U.J.N.R.(1988)

4)佐々木康，増井仁，累積せん断ひずみに基づく間隙水圧発生量の算定，土木学会第43回年次学術講演会，昭和63年

5)原昭夫，溝田芳治，田村英雄，酒井吉郎，有泉浩蔵，松本尚志，青柳隆之，藤田義則：粒状体のダイレイタンシーの定式化(その２)パラメーターの決定方法，第23回土質工学研究発表会，昭和63年

付属資料

せん断ひずみピーク時刻でのせん断ひずみと間隙水圧比のデジタル値

付属資料

（加振ケース　，間隙水圧計番号）

CASE= A3C4-P16

	γ (+)	γ (-)	$\overline{\gamma}$	$\Sigma\overline{\gamma}$	u/σ (+)	u/σ (-)	$\overline{u/\sigma}\ v0$
	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.097	-0.087	0.092	0.092	0.0	0.036	0.018
NO. 2	0.288	-0.284	0.286	0.378	0.083	0.124	0.104
NO. 3	0.342	-0.359	0.350	0.728	0.169	0.189	0.179
NO. 4	0.397	-0.383	0.390	1.118	0.211	0.246	0.229
NO. 5	0.385	-0.417	0.401	1.519	0.273	0.317	0.295
NO. 6	0.412	-0.422	0.417	1.936	0.360	0.412	0.386
NO. 7	0.370	-0.360	0.365	2.301	0.465	0.504	0.484
NO. 8	0.365	-0.242	0.303	2.605	0.568	0.642	0.605
NO. 9	0.222	-0.059	0.140	2.745	0.646	0.637	0.641

CASE= A3C4-P18

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.064	-0.107	0.086	0.086	0.002	0.038	0.020
NO. 2	0.102	-0.126	0.114	0.199	0.090	0.146	0.118
NO. 3	0.146	-0.202	0.174	0.373	0.199	0.240	0.220
NO. 4	0.185	-0.211	0.198	0.572	0.270	0.299	0.285
NO. 5	0.215	-0.225	0.220	0.791	0.331	0.363	0.347
NO. 6	0.225	-0.244	0.234	1.026	0.407	0.445	0.426
NO. 7	0.350	-0.337	0.344	1.369	0.502	0.529	0.515
NO. 8	0.413	-0.482	0.447	1.817	0.581	0.612	0.596
NO. 9	0.339	-0.171	0.255	2.072	0.659	0.680	0.669
NO.10	0.107	-0.019	0.063	2.135	0.684	0.685	0.684

CASE= A3C4-P19

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.016	-0.101	0.058	0.058	0.004	0.045	0.025
NO. 2	0.105	-0.295	0.200	0.258	0.111	0.187	0.149
NO. 3	0.323	-0.586	0.455	0.713	0.262	0.323	0.293
NO. 4	0.507	-0.560	0.533	1.246	0.368	0.393	0.380
NO. 5	0.552	-0.522	0.537	1.783	0.418	0.444	0.431
NO. 6	0.491	-0.554	0.522	2.306	0.486	0.511	0.498
NO. 7	0.687	-0.769	0.728	3.034	0.569	0.586	0.577
NO. 8	0.900	-1.136	1.018	4.052	0.641	0.653	0.647
NO. 9	0.617	-0.516	0.566	4.618	0.695	0.711	0.703
NO.10	0.088	-0.062	0.075	4.693	0.737	0.739	0.738

CASE= A3C4-P20

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.195	-0.181	0.188	0.188	0.022	0.102	0.062
NO. 2	0.618	-0.623	0.620	0.808	0.282	0.419	0.350
NO. 3	0.750	-0.759	0.754	1.563	0.501	0.583	0.542
NO. 4	0.760	-0.761	0.760	2.323	0.630	0.624	0.627
NO. 5	0.742	-0.802	0.772	3.095	0.624	0.641	0.632
NO. 6	0.849	-0.864	0.856	3.952	0.651	0.676	0.663
NO. 7	0.939	-0.871	0.905	4.857	0.688	0.722	0.705
NO. 8	0.924	-0.839	0.881	5.738	0.725	0.751	0.738
NO. 9	0.343	-0.235	0.289	6.027	0.755	0.782	0.768
NO.10	0.051	-0.062	0.056	6.084	0.788	0.787	0.787

CASE= A3C5-P16

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.068	-0.069	0.068	0.068	0.0	0.029	0.014
NO. 2	0.172	-0.192	0.182	0.250	0.075	0.115	0.095
NO. 3	0.260	-0.240	0.250	0.500	0.158	0.178	0.168
NO. 4	0.318	-0.329	0.323	0.824	0.200	0.229	0.214
NO. 5	0.299	-0.320	0.309	1.133	0.251	0.278	0.264
NO. 6	0.359	-0.381	0.370	1.503	0.307	0.338	0.322
NO. 7	0.331	-0.374	0.352	1.856	0.375	0.405	0.390
NO. 8	0.243	-0.316	0.279	2.135	0.448	0.470	0.459
NO. 9	0.359	-0.287	0.323	2.458	0.519	0.555	0.537
NO.10	0.470	-0.363	0.416	2.875	0.568	0.592	0.580
NO.11	0.515	-0.498	0.506	3.381	0.602	0.619	0.610
NO.12	0.623	-0.645	0.634	4.015	0.627	0.642	0.634
NO.13	0.710	-0.816	0.763	4.778	0.648	0.663	0.655
NO.14	0.771	-0.943	0.857	5.635	0.668	0.682	0.675
NO.15	0.828	-0.982	0.905	6.540	0.687	0.700	0.693
NO.16	0.862	-0.286	0.574	7.114	0.720	0.739	0.729
NO.17	0.269	-0.027	0.148	7.262	0.730	0.725	0.727

CASE= A3C5-P18

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.069	-0.110	0.090	0.090	0.002	0.036	0.019
NO. 2	0.106	-0.137	0.122	0.211	0.094	0.159	0.126
NO. 3	0.134	-0.187	0.160	0.372	0.205	0.245	0.225
NO. 4	0.183	-0.198	0.191	0.562	0.279	0.305	0.292
NO. 5	0.198	-0.224	0.211	0.773	0.331	0.355	0.343
NO. 6	0.232	-0.248	0.240	1.013	0.389	0.414	0.401
NO. 7	0.272	-0.280	0.276	1.289	0.456	0.479	0.467
NO. 8	0.371	-0.355	0.363	1.652	0.519	0.540	0.530
NO. 9	0.429	-0.458	0.443	2.095	0.574	0.597	0.585
NO.10	0.467	-0.540	0.503	2.599	0.615	0.639	0.627
NO.11	0.499	-0.562	0.530	3.129	0.653	0.668	0.660
NO.12	0.561	-0.605	0.583	3.712	0.681	0.693	0.687
NO.13	0.643	-0.650	0.646	4.359	0.705	0.715	0.710
NO.14	0.703	-0.699	0.701	5.060	0.728	0.736	0.732
NO.15	0.749	-0.764	0.756	5.816	0.751	0.757	0.754
NO.16	0.890	-0.916	0.903	6.719	0.773	0.779	0.776
NO.17	0.639	-0.284	0.461	7.181	0.811	0.810	0.810
NO.18	0.177	-0.017	0.097	7.278	0.808	0.801	0.804

CASE= A3C5-P19

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.046	-0.103	0.074	0.074	0.004	0.042	0.023
NO. 2	0.113	-0.188	0.150	0.225	0.118	0.200	0.159
NO. 3	0.206	-0.467	0.336	0.561	0.263	0.319	0.291
NO. 4	0.438	-0.467	0.452	1.014	0.371	0.396	0.383
NO. 5	0.459	-0.478	0.468	1.482	0.417	0.442	0.429
NO. 6	0.475	-0.496	0.485	1.968	0.472	0.494	0.483
NO. 7	0.524	-0.595	0.559	2.527	0.535	0.553	0.544
NO. 8	0.743	-0.820	0.781	3.309	0.595	0.608	0.601
NO. 9	0.947	-1.125	1.036	4.345	0.645	0.655	0.650
NO.10	1.122	-1.367	1.244	5.589	0.683	0.692	0.688
NO.11	1.211	-1.448	1.330	6.919	0.707	0.713	0.710
NO.12	1.394	-1.620	1.507	8.426	0.730	0.732	0.731
NO.13	1.555	-1.741	1.648	10.074	0.749	0.751	0.750
NO.14	1.668	-1.791	1.729	11.803	0.767	0.768	0.767
NO.15	1.682	-1.765	1.724	13.527	0.783	0.785	0.784
NO.16	1.597	-1.609	1.603	15.130	0.797	0.804	0.800
NO.17	0.559	-0.504	0.531	15.661	0.811	0.821	0.816

CASE= A3C5-P20

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.159	-0.148	0.153	0.153	0.013	0.066	0.039
NO. 2	0.448	-0.474	0.461	0.614	0.207	0.329	0.268
NO. 3	0.659	-0.573	0.616	1.230	0.400	0.466	0.433
NO. 4	0.676	-0.694	0.685	1.915	0.534	0.557	0.545
NO. 5	0.689	-0.677	0.683	2.598	0.568	0.584	0.576
NO. 6	0.847	-0.824	0.835	3.434	0.594	0.614	0.604
NO. 7	0.969	-0.913	0.941	4.375	0.628	0.653	0.640
NO. 8	1.081	-0.981	1.031	5.406	0.669	0.694	0.681
NO. 9	1.142	-1.008	1.075	6.481	0.704	0.727	0.715
NO.10	1.120	-1.066	1.093	7.574	0.730	0.738	0.734
NO.11	1.122	-1.102	1.112	8.686	0.746	0.748	0.747
NO.12	1.136	-1.128	1.132	9.818	0.762	0.764	0.763
NO.13	1.140	-1.119	1.130	10.947	0.777	0.785	0.781
NO.14	1.064	-0.973	1.018	11.966	0.798	0.806	0.802
NO.15	0.982	-0.919	0.951	12.916	0.813	0.826	0.819
NO.16	1.020	-0.853	0.937	13.853	0.830	0.833	0.831
NO.17	0.454	-0.302	0.378	14.231	0.832	0.841	0.836

CASE= B1C5-P16

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.062	-0.073	0.067	0.067	0.0	0.046	0.023
NO. 2	0.156	-0.163	0.160	0.227	0.112	0.165	0.138
NO. 3	0.190	-0.157	0.174	0.400	0.208	0.261	0.234
NO. 4	0.303	-0.322	0.313	0.713	0.299	0.349	0.324
NO. 5	0.328	-0.353	0.340	1.053	0.412	0.455	0.433
NO. 6	0.241	-0.255	0.248	1.301	0.506	0.561	0.533
NO. 7	0.130	-0.157	0.143	1.445	0.585	0.628	0.606
NO. 8	0.108	-0.060	0.084	1.529	0.632	0.637	0.635
NO. 9	0.170	-0.270	0.220	1.749	0.651	0.667	0.659
NO.10	0.186	-0.147	0.166	1.915	0.675	0.720	0.697

CASE= B1C5-P17

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.111	-0.122	0.116	0.116	0.0	0.055	0.027
NO. 2	0.297	-0.314	0.305	0.422	0.139	0.212	0.175
NO. 3	0.349	-0.279	0.314	0.736	0.260	0.267	0.263
NO. 4	0.558	-0.593	0.576	1.311	0.362	0.416	0.389
NO. 5	0.642	-0.679	0.660	1.972	0.484	0.538	0.511
NO. 6	0.505	-0.598	0.551	2.523	0.610	0.646	0.628
NO. 7	0.399	-0.444	0.421	2.945	0.655	0.708	0.681
NO. 8	0.571	-0.752	0.661	3.606	0.725	0.744	0.734
NO. 9	0.383	-0.383	0.383	3.989	0.800	0.794	0.797
NO.10	0.347	-0.066	0.206	4.196	0.774	0.768	0.771

CASE= B1C5-P18

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.073	-0.105	0.089	0.089	0.001	0.049	0.025
NO. 2	0.132	-0.151	0.141	0.230	0.154	0.219	0.186
NO. 3	0.149	-0.193	0.171	0.401	0.290	0.344	0.317
NO. 4	0.220	-0.200	0.210	0.611	0.398	0.445	0.421
NO. 5	0.287	-0.267	0.277	0.888	0.516	0.561	0.538
NO. 6	0.467	-0.427	0.447	1.335	0.629	0.665	0.647
NO. 7	0.530	-0.515	0.522	1.858	0.701	0.728	0.714
NO. 8	0.543	-0.528	0.535	2.393	0.749	0.761	0.755
NO. 9	0.397	-0.140	0.268	2.662	0.788	0.803	0.795
NO.10	0.123	-0.015	0.069	2.731	0.809	0.806	0.807

CASE= B1C5-P19

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.066	-0.113	0.089	0.089	0.0	0.051	0.025
NO. 2	0.109	-0.143	0.126	0.215	0.142	0.235	0.188
NO. 3	0.209	-0.335	0.272	0.487	0.337	0.385	0.361
NO. 4	0.337	-0.262	0.299	0.787	0.451	0.497	0.474
NO. 5	0.239	-0.301	0.270	1.057	0.583	0.620	0.601
NO. 6	0.477	-0.647	0.562	1.619	0.717	0.733	0.725
NO. 7	0.633	-0.795	0.714	2.333	0.793	0.807	0.800
NO. 8	0.748	-0.864	0.806	3.139	0.833	0.841	0.837
NO. 9	0.388	-0.255	0.322	3.460	0.866	0.884	0.875

CASE= B1C5-P20

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.142	-0.159	0.150	0.150	0.013	0.033	0.023
NO. 2	0.339	-0.357	0.348	0.498	0.123	0.253	0.188
NO. 3	0.388	-0.348	0.368	0.866	0.316	0.393	0.354
NO. 4	0.529	-0.542	0.535	1.402	0.460	0.503	0.481
NO. 5	0.725	-0.739	0.732	2.134	0.508	0.571	0.539
NO. 6	0.815	-0.796	0.805	2.939	0.606	0.638	0.622
NO. 7	0.832	-0.758	0.795	3.734	0.674	0.667	0.670
NO. 8	0.829	-0.754	0.791	4.526	0.671	0.693	0.682
NO. 9	0.320	-0.292	0.306	4.832	0.668	0.703	0.685

CASE= B2C5-P16

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.075	-0.112	0.093	0.093	0.001	0.022	0.011
NO. 2	0.227	-0.208	0.217	0.311	0.100	0.151	0.126
NO. 3	0.254	-0.255	0.254	0.565	0.205	0.264	0.234
NO. 4	0.405	-0.414	0.409	0.975	0.311	0.362	0.336
NO. 5	0.414	-0.423	0.418	1.393	0.442	0.494	0.468
NO. 6	0.218	-0.253	0.235	1.629	0.523	0.604	0.563
NO. 7	0.129	-0.149	0.139	1.768	0.624	0.656	0.640
NO. 8	0.206	-0.300	0.253	2.021	0.661	0.707	0.694
NO. 9	0.421	-0.547	0.484	2.505	0.726	0.748	0.737
NO.10	0.485	-0.566	0.525	3.030	0.764	0.779	0.771
NO.11	0.484	-0.518	0.501	3.531	0.788	0.797	0.792
NO.12	0.503	-0.513	0.508	4.039	0.801	0.805	0.803
NO.13	0.503	-0.506	0.504	4.544	0.808	0.810	0.809
NO.14	0.505	-0.499	0.502	5.046	0.812	0.813	0.813
NO.15	0.512	-0.505	0.508	5.554	0.814	0.816	0.815
NO.16	0.520	-0.511	0.515	6.070	0.816	0.818	0.817
NO.17	0.363	-0.020	0.191	6.261	0.834	0.821	0.827

CASE= B2C5-P17

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.104	-0.144	0.124	0.124	0.001	0.040	0.020
NO. 2	0.361	-0.296	0.328	0.452	0.126	0.191	0.158
NO. 3	0.396	-0.401	0.399	0.851	0.248	0.313	0.280
NO. 4	0.625	-0.653	0.639	1.490	0.355	0.414	0.384
NO. 5	0.719	-0.760	0.739	2.229	0.480	0.538	0.509
NO. 6	0.572	-0.629	0.600	2.830	0.610	0.646	0.628
NO. 7	0.224	-0.422	0.323	3.153	0.610	0.702	0.656
NO. 8	0.208	-0.317	0.262	3.415	0.714	0.726	0.720
NO. 9	0.183	-0.142	0.163	3.578	0.730	0.740	0.735
NO.10	0.478	-0.674	0.576	4.154	0.744	0.748	0.746
NO.11	0.531	-0.632	0.581	4.735	0.766	0.764	0.765
NO.12	0.488	-0.494	0.491	5.226	0.778	0.776	0.777
NO.13	0.384	-0.401	0.392	5.619	0.783	0.781	0.782
NO.14	0.332	-0.329	0.331	5.949	0.786	0.784	0.785
NO.15	0.296	-0.282	0.289	6.238	0.787	0.785	0.786
NO.16	0.278	-0.252	0.265	6.503	0.788	0.787	0.787
NO.17	0.266	-0.230	0.248	6.751	0.789	0.791	0.790

CASE= B2C5-P18

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.065	-0.072	0.068	0.068	0.003	0.063	0.033
NO. 2	0.081	-0.091	0.086	0.154	0.146	0.215	0.180
NO. 3	0.121	-0.122	0.121	0.276	0.277	0.323	0.300
NO. 4	0.125	-0.107	0.116	0.392	0.377	0.425	0.401
NO. 5	0.234	-0.225	0.229	0.621	0.496	0.534	0.515
NO. 6	0.395	-0.412	0.403	1.025	0.601	0.630	0.615
NO. 7	0.480	-0.496	0.488	1.513	0.669	0.686	0.677
NO. 8	0.549	-0.551	0.550	2.063	0.713	0.723	0.718
NO. 9	0.588	-0.565	0.576	2.639	0.743	0.747	0.745
NO.10	0.555	-0.511	0.533	3.172	0.761	0.763	0.762
NO.11	0.494	-0.448	0.471	3.643	0.770	0.772	0.771
NO.12	0.431	-0.387	0.409	4.052	0.775	0.776	0.775
NO.13	0.378	-0.333	0.355	4.408	0.778	0.778	0.778
NO.14	0.331	-0.285	0.308	4.716	0.780	0.780	0.780
NO.15	0.303	-0.254	0.278	4.994	0.781	0.782	0.781
NO.16	0.284	-0.231	0.257	5.252	0.783	0.785	0.784
NO.17	0.100	-0.096	0.098	5.350	0.775	0.781	0.778

CASE= B2C5-P19

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.087	-0.095	0.091	0.091	0.011	0.079	0.045
NO. 2	0.061	-0.038	0.049	0.141	0.151	0.256	0.203
NO. 3	0.132	-0.195	0.164	0.304	0.324	0.369	0.346
NO. 4	0.146	-0.032	0.089	0.393	0.428	0.463	0.445
NO. 5	0.066	-0.005	0.035	0.428	0.492	0.508	0.500
NO. 6	0.177	-0.279	0.228	0.656	0.537	0.570	0.553
NO. 7	0.442	-0.654	0.548	1.204	0.635	0.651	0.643
NO. 8	0.475	-0.726	0.600	1.805	0.691	0.702	0.696
NO. 9	0.575	-0.772	0.673	2.478	0.724	0.729	0.726
NO.10	0.628	-0.694	0.661	3.139	0.749	0.754	0.751
NO.11	0.446	-0.495	0.470	3.610	0.765	0.769	0.767
NO.12	0.249	-0.292	0.271	3.880	0.774	0.778	0.776
NO.13	0.199	-0.238	0.218	4.099	0.779	0.782	0.780
NO.14	0.153	-0.176	0.164	4.263	0.783	0.785	0.784
NO.15	0.122	-0.133	0.127	4.391	0.787	0.787	0.787
NO.16	0.101	-0.106	0.104	4.494	0.789	0.789	0.789
NO.17	0.087	-0.089	0.088	4.582	0.790	0.793	0.791

CASE= B2C5-P20

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.173	-0.143	0.158	0.158	0.012	0.092	0.052
NO. 2	0.386	-0.334	0.360	0.518	0.236	0.369	0.303
NO. 3	0.384	-0.444	0.414	0.932	0.422	0.510	0.466
NO. 4	0.661	-0.692	0.676	1.608	0.541	0.589	0.565
NO. 5	0.806	-0.846	0.826	2.434	0.612	0.650	0.631
NO. 6	0.837	-0.796	0.816	3.251	0.689	0.695	0.692
NO. 7	0.773	-0.680	0.726	3.977	0.718	0.713	0.715
NO. 8	0.668	-0.533	0.600	4.578	0.729	0.732	0.730
NO. 9	0.543	-0.410	0.476	5.054	0.757	0.760	0.758
NO.10	0.462	-0.324	0.393	5.447	0.774	0.777	0.775
NO.11	0.358	-0.262	0.310	5.757	0.783	0.785	0.784
NO.12	0.287	-0.215	0.251	6.008	0.788	0.790	0.789
NO.13	0.233	-0.177	0.205	6.213	0.792	0.793	0.792
NO.14	0.194	-0.152	0.173	6.386	0.795	0.796	0.795
NO.15	0.168	-0.137	0.152	6.539	0.798	0.798	0.798
NO.16	0.152	-0.158	0.155	6.694	0.802	0.795	0.798
NO.17	0.166	-0.025	0.095	6.789	0.794	0.791	0.793

CASE= B3C4-P16

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.088	-0.110	0.099	0.099	0.0	0.035	0.017
NO. 2	0.097	-0.233	0.165	0.264	0.104	0.199	0.151
NO. 3	0.417	-0.398	0.407	0.671	0.263	0.340	0.301
NO. 4	0.435	-0.406	0.420	1.092	0.394	0.465	0.429
NO. 5	0.305	-0.273	0.289	1.381	0.539	0.585	0.562
NO. 6	0.097	-0.126	0.111	1.492	0.693	0.718	0.705
NO. 7	0.189	-0.275	0.232	1.724	0.736	0.754	0.745
NO. 8	0.351	-0.411	0.381	2.105	0.769	0.782	0.775
NO. 9	0.490	-0.542	0.516	2.621	0.794	0.804	0.799
NO.10	0.547	-0.594	0.570	3.192	0.802	0.817	0.809
NO.11	0.558	-0.596	0.577	3.769	0.810	0.822	0.816
NO.12	0.574	-0.605	0.589	4.358	0.818	0.825	0.821
NO.13	0.580	-0.601	0.590	4.949	0.823	0.825	0.824
NO.14	0.603	-0.612	0.607	5.556	0.826	0.827	0.826
NO.15	0.628	-0.626	0.627	6.183	0.830	0.830	0.830
NO.16	0.644	-0.667	0.655	6.839	0.837	0.835	0.836
NO.17	0.270	-0.100	0.185	7.024	0.844	0.850	0.847

CASE= B3C4-P17

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.138	-0.182	0.160	0.160	0.001	0.051	0.026
NO. 2	0.550	-0.462	0.506	0.666	0.161	0.229	0.195
NO. 3	0.773	-0.860	0.816	1.482	0.296	0.371	0.333
NO. 4	0.836	-0.855	0.845	2.328	0.421	0.495	0.458
NO. 5	0.779	-0.693	0.736	3.064	0.560	0.614	0.587
NO. 6	0.286	-0.276	0.281	3.345	0.680	0.698	0.689
NO. 7	0.233	-0.331	0.282	3.627	0.728	0.752	0.740
NO. 8	0.356	-0.515	0.435	4.062	0.766	0.771	0.768
NO. 9	0.411	-0.540	0.475	4.538	0.786	0.786	0.786
NO.10	0.391	-0.470	0.430	4.968	0.797	0.797	0.797
NO.11	0.344	-0.420	0.382	5.350	0.803	0.804	0.803
NO.12	0.302	-0.379	0.340	5.691	0.808	0.809	0.808
NO.13	0.265	-0.319	0.292	5.983	0.813	0.813	0.813
NO.14	0.199	-0.261	0.230	6.213	0.816	0.821	0.818
NO.15	0.103	-0.182	0.142	6.355	0.816	0.819	0.817

CASE= B3C4-P18

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.079	-0.082	0.081	0.081	0.001	0.050	0.025
NO. 2	0.142	-0.164	0.153	0.234	0.145	0.217	0.181
NO. 3	0.172	-0.173	0.172	0.406	0.295	0.361	0.328
NO. 4	0.221	-0.225	0.223	0.629	0.426	0.479	0.452
NO. 5	0.358	-0.360	0.359	0.988	0.560	0.595	0.577
NO. 6	0.416	-0.471	0.443	1.431	0.661	0.679	0.670
NO. 7	0.446	-0.479	0.462	1.894	0.711	0.727	0.719
NO. 8	0.477	-0.483	0.480	2.374	0.743	0.750	0.746
NO. 9	0.468	-0.440	0.454	2.828	0.764	0.767	0.765
NO.10	0.433	-0.378	0.405	3.233	0.779	0.781	0.780
NO.11	0.395	-0.329	0.362	3.595	0.788	0.789	0.788
NO.12	0.354	-0.284	0.319	3.914	0.792	0.793	0.792
NO.13	0.317	-0.246	0.281	4.196	0.794	0.795	0.794
NO.14	0.318	-0.248	0.283	4.479	0.796	0.797	0.796
NO.15	0.310	-0.229	0.269	4.748	0.798	0.799	0.798
NO.16	0.283	-0.207	0.245	4.993	0.799	0.802	0.800
NO.17	0.027	-0.037	0.032	5.025	0.801	0.800	0.800

CASE= B3C4-P19

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.060	-0.082	0.071	0.071	0.004	0.046	0.025
NO. 2	0.192	-0.400	0.296	0.367	0.164	0.239	0.201
NO. 3	0.388	-0.393	0.391	0.757	0.360	0.391	0.375
NO. 4	0.484	-0.457	0.470	1.228	0.435	0.497	0.466
NO. 5	0.664	-0.655	0.659	1.887	0.577	0.607	0.592
NO. 6	0.616	-0.767	0.691	2.579	0.625	0.686	0.655
NO. 7	0.577	-0.734	0.655	3.234	0.720	0.732	0.726
NO. 8	0.617	-0.707	0.662	3.896	0.750	0.756	0.753
NO. 9	0.580	-0.601	0.590	4.487	0.768	0.773	0.770
NO.10	0.471	-0.458	0.465	4.951	0.781	0.785	0.783
NO.11	0.354	-0.333	0.343	5.295	0.789	0.793	0.791
NO.12	0.308	-0.292	0.300	5.595	0.793	0.797	0.795
NO.13	0.270	-0.254	0.262	5.857	0.797	0.799	0.798
NO.14	0.236	-0.219	0.225	6.081	0.800	0.801	0.800
NO.15	0.185	-0.175	0.180	6.261	0.803	0.803	0.803
NO.16	0.153	-0.136	0.144	6.406	0.806	0.810	0.808
NO.17	0.090	-0.056	0.073	6.479	0.810	0.803	0.806

CASE= B3C4-P20

	GAMMA(+)	GAMMA(-)	MEAN-G.	CUM.-G.	U(+)	U(-)	MEAN-U.
NO. 1	0.150	-0.170	0.160	0.160	0.020	0.123	0.072
NO. 2	0.485	-0.436	0.461	0.620	0.390	0.506	0.448
NO. 3	0.648	-0.748	0.698	1.318	0.550	0.611	0.580
NO. 4	0.682	-0.735	0.708	2.027	0.632	0.682	0.657
NO. 5	0.708	-0.607	0.657	2.684	0.686	0.743	0.714
NO. 6	0.598	-0.420	0.509	3.193	0.729	0.753	0.741
NO. 7	0.546	-0.398	0.472	3.665	0.760	0.762	0.761
NO. 8	0.481	-0.327	0.404	4.069	0.769	0.778	0.773
NO. 9	0.411	-0.258	0.335	4.404	0.783	0.791	0.787
NO.10	0.318	-0.195	0.257	4.660	0.795	0.799	0.797
NO.11	0.242	-0.147	0.194	4.855	0.803	0.804	0.803
NO.12	0.190	-0.113	0.151	5.006	0.806	0.807	0.806
NO.13	0.153	-0.090	0.121	5.128	0.807	0.808	0.807
NO.14	0.126	-0.103	0.114	5.242	0.808	0.810	0.809
NO.15	0.103	-0.056	0.079	5.322	0.808	0.812	0.810
NO.16	0.080	-0.088	0.084	5.406	0.809	0.820	0.814
NO.17	0.086	-0.010	0.048	5.454	0.810	0.817	0.813

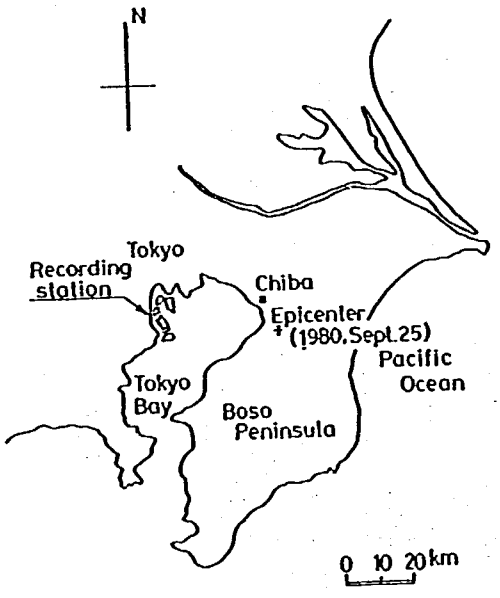
第Ⅲ編　実地盤の強震観測データの検討

1．大井埋立地での間隙水圧観測データの検討

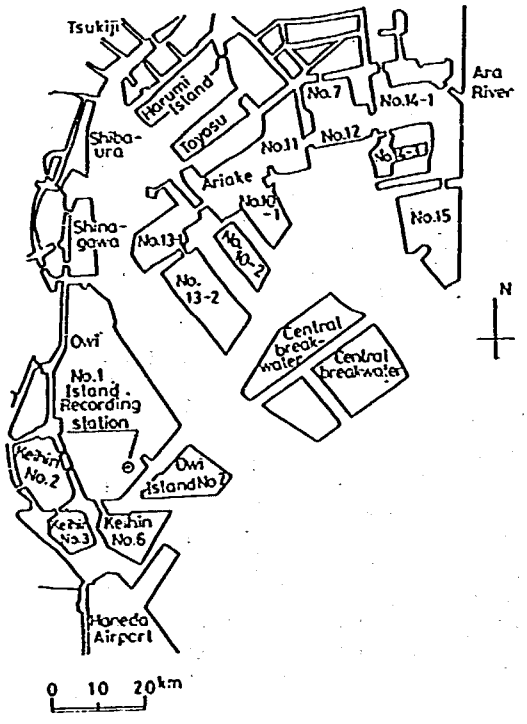
1．1　観測地点および観測方法の概要[1),2)]

大井第1島は、東京湾西岸に位置する（図-1.1.1）。この島は、1960 年代に埋立てられ、約4 km×3.5km×2.5kmの三角形をしている（図-1.1.2）。図-1.1.3に埋立地盤の柱状図を示す。地盤は、沖積地盤上に約10mの埋立てを行ったもので、表層4mは廃土であり、残り6mは付近の海底の砂質土であり、N値は3～10程度である。旧海底面以下（沖積層）は、砂とシルトの互層でN値は2～4と非常に軟弱である。埋立土砂及び沖積層の平均粒径・N値・単位体積重量を推定し、道路橋示方書第Ⅴ編（耐震設計編）による液状化判定を実施した結果を表-1.1.1に示す。各層ともに液状化の可能性は高い。

大井埋立地内には、1980年当時地表に1台の強震計、地中に深度別に4箇所の間隙水圧が設置されている。配置状況を図-1.1.4に示す。



図－1．1．1　観測地点位置図

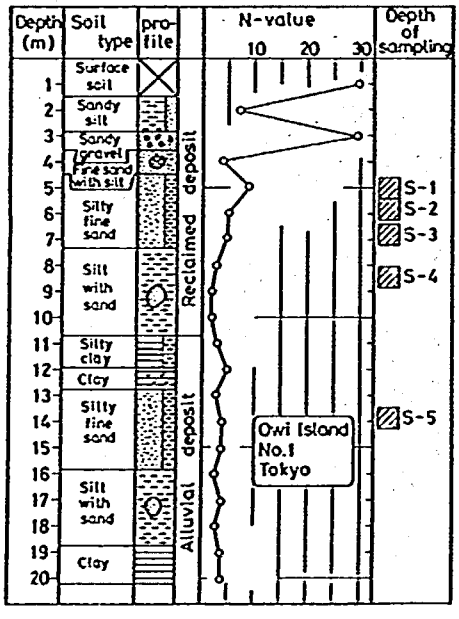


図－1．1．2　大井埋立地位置図

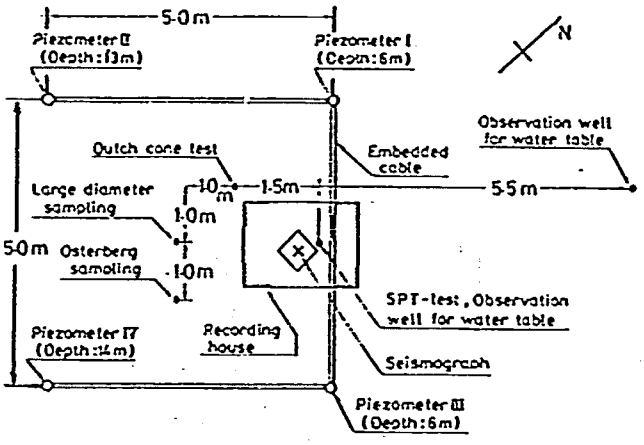
表－１．１．１　大井埋立地液状化判定

土質名	層厚 (m)	計算深度	N	γt2 kg/cm²	D50 (mm)	σv kg/cm²	σv' kg/cm²	rd	L	R	FL	判定
中砂	4.20	2.1	12	1.90	0.35	0.399	0.189	0.969	0.368	0.324	0.88	○
シルト質砂	4.50	6.5	7	1.90	0.07	1.226	0.581	0.903	0.343	0.363	0.94	○
微細砂	1.80	9.6	2	1.70	0.10	1.806	0.846	0.856	0.329	0.223	0.68	○
シルト	2.90	11.9	2	1.60	0.025	2.191	0.996	0.821	0.325	0.286	0.88	○
シルト質砂	3.20	15.0	3	1.70	0.07	2.695	1.195	0.775	0.314	0.268	0.85	○
微細砂	2.10	17.7	2	1.70	0.10	3.146	1.381	0.735	0.302	0.209	0.69	○
シルト	1.90	19.7	4	1.60	0.025	3.476	1.511	0.705	0.292	0.309	1.06	×

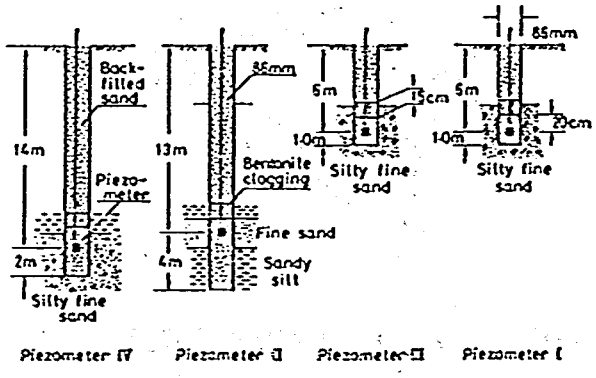
液状化判定用設計水平震度　ks＝0.18



図－１．１．３　埋立地地盤柱状図



（ａ）平　面　図



（ｂ）断　面　図

図－１．１．４　強震計・間隙水圧計設置図

１．２　観測記録の概要

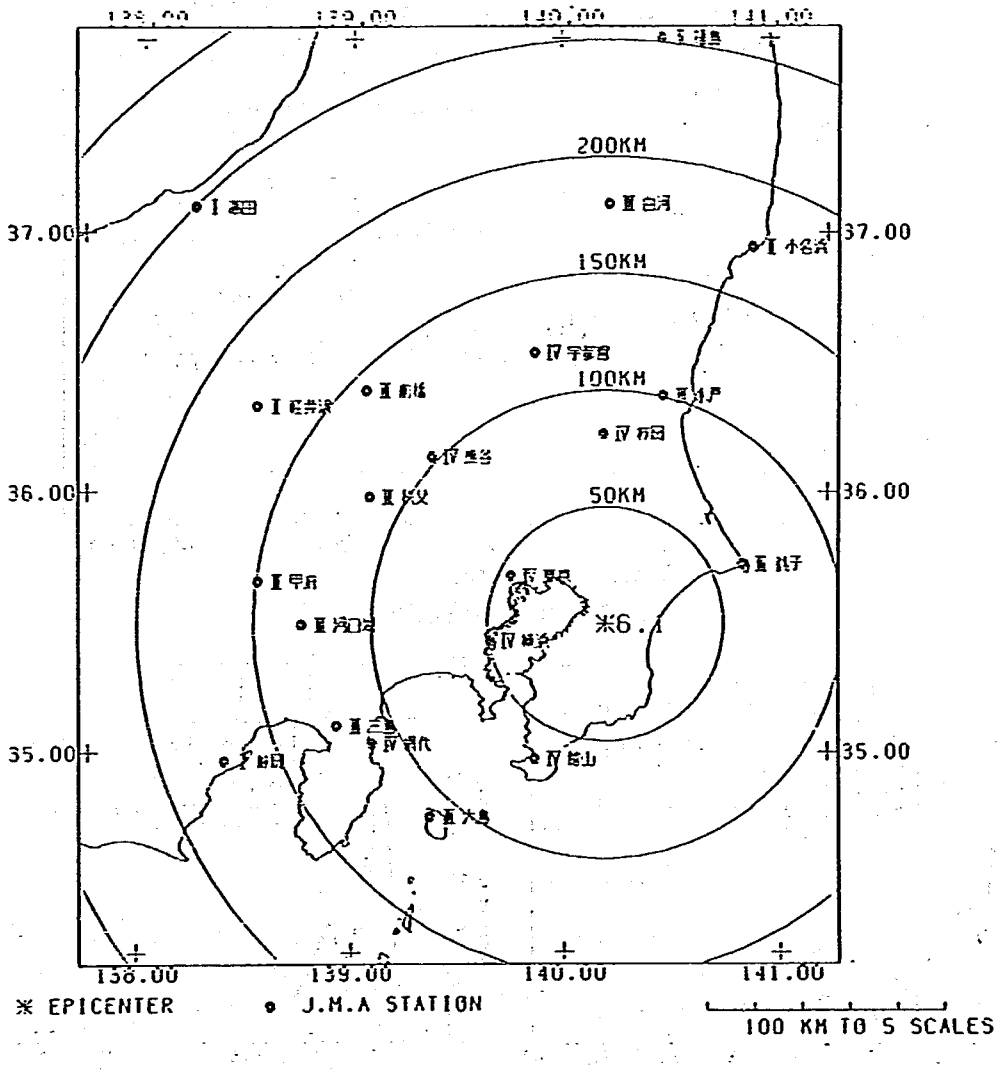
１．２．１　地震の概要

昭和55年9月25日午前2時54分頃、千葉県中部を震源とするマグニチュード6.1の地震が発生した。気象庁によれば、震源位置は北緯35° 30′，東経140° 12′，震源深さ70kmである。図-1.2.1に、この地震による各地の震度を示す。東京湾の観音崎、富津岬での建設省所管の強震計では、100gal以上の最大加速度が観測され、東京湾沿岸の埋立地盤上では、ほぼ100gal程度の最大加速度が発生したと思われる。

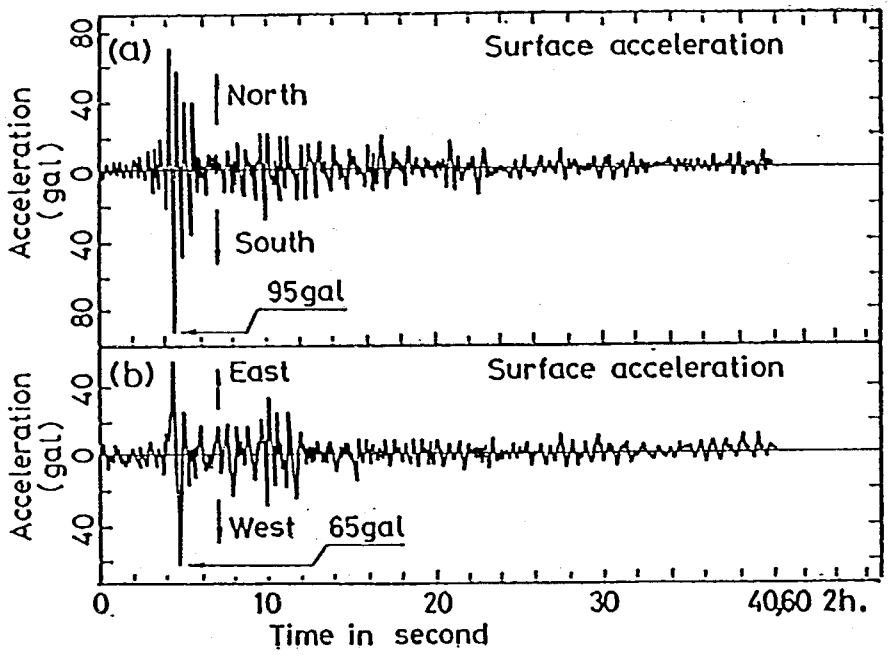
１．２．２　加速度と間隙水圧記録

この地震により大井埋立地内で地表加速度と地下-6.0mと-14.0m深度での間隙水圧記録が得られた。石原ら[1]により整理された観測データを図-1.2.2，図-1.2.3に示す。埋立地盤上での最大加速度は、ＮＳ方向で95gal、ＥＷ方向で65gal である。また、地中での最大間隙水圧は水頭にして地下-6.0mで75cm，地下-14.0mで132cmであり、ともに間隙水圧比は約0.13である。

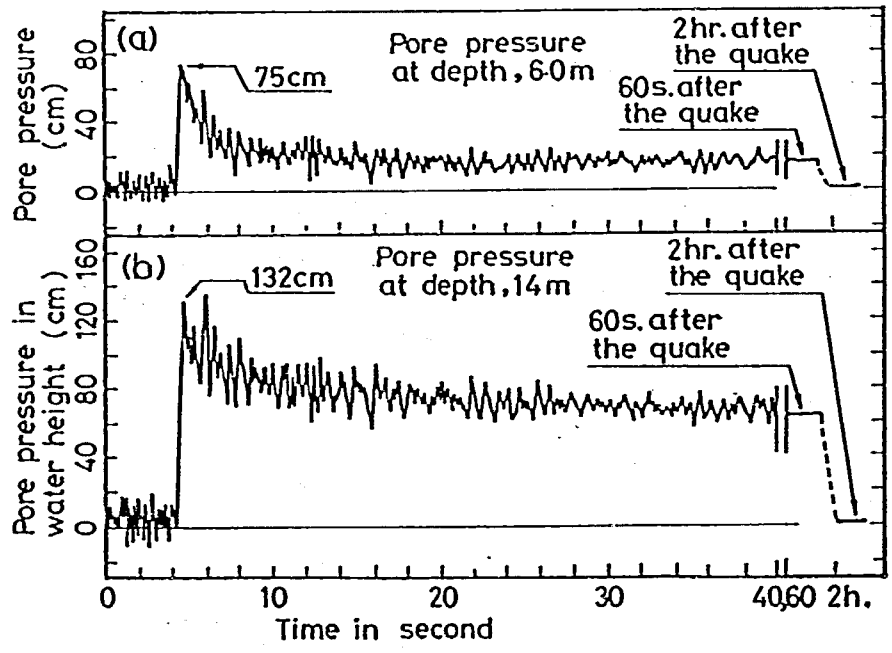
加速度記録のフーリエスペクトルを図-1.2.4に示す。ＮＳ方向の卓越周期は、約0.50秒，ＥＷ方向では、約0.64秒であった。



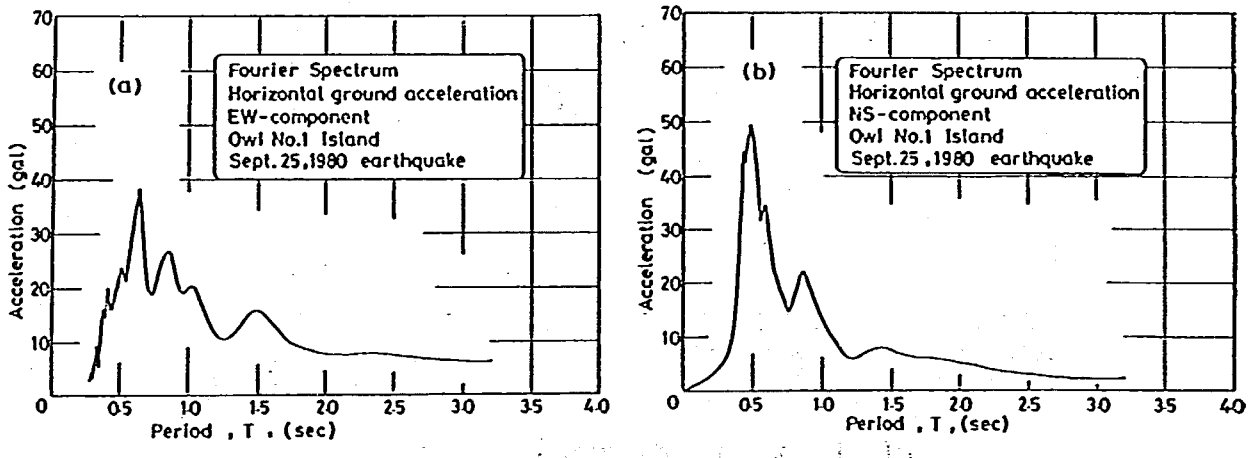
図－１．２．１　各地の震度



図－１．２．２　加速度波形



図－１．２．３　間隙水圧波形



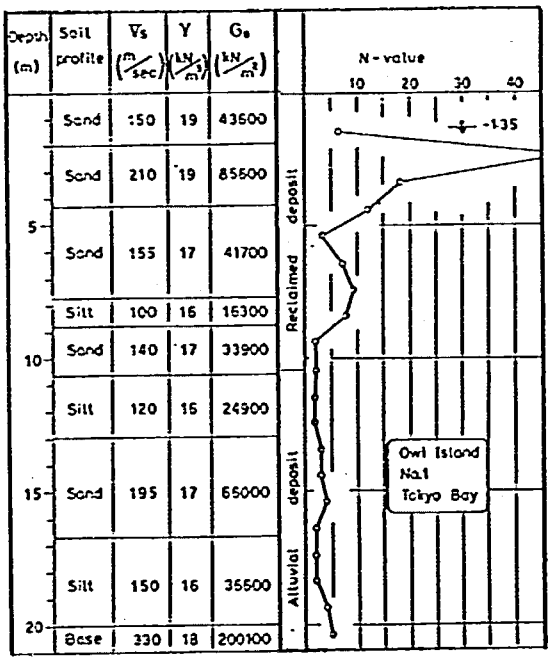
図－１．２．４　加速度フーリエスペクトル

1．3　地震応答解析によるせん断ひずみの算出

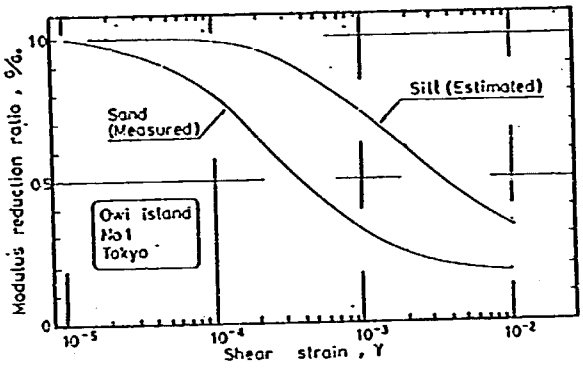
1．3．1　解析用地盤モデルと使用地盤定数[1),2)]

観測された間隙水圧と地盤内せん断ひずみとの比較を行うため、Schnabel[3)]等により開発された地震応答解析「ＳＨＡＫＥ」を使用する。このプログラムは、一次元のせん断波動論と高速フーリエ級数を利用した、等価線形法による応答解析法である。

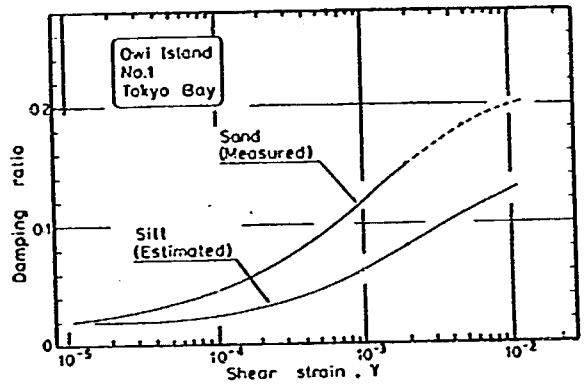
図-1.3.1に応答解析用の地盤モデルを示す。また現地の不撹乱資料により共振法・振動三軸試験を使用し算出したG／G_0～γ曲線及びh～γ曲線を図-1.3.2に示す。



図－１．３．１　応答解析用地盤モデル



（ａ）Ｇ／Ｇ０～γ曲線



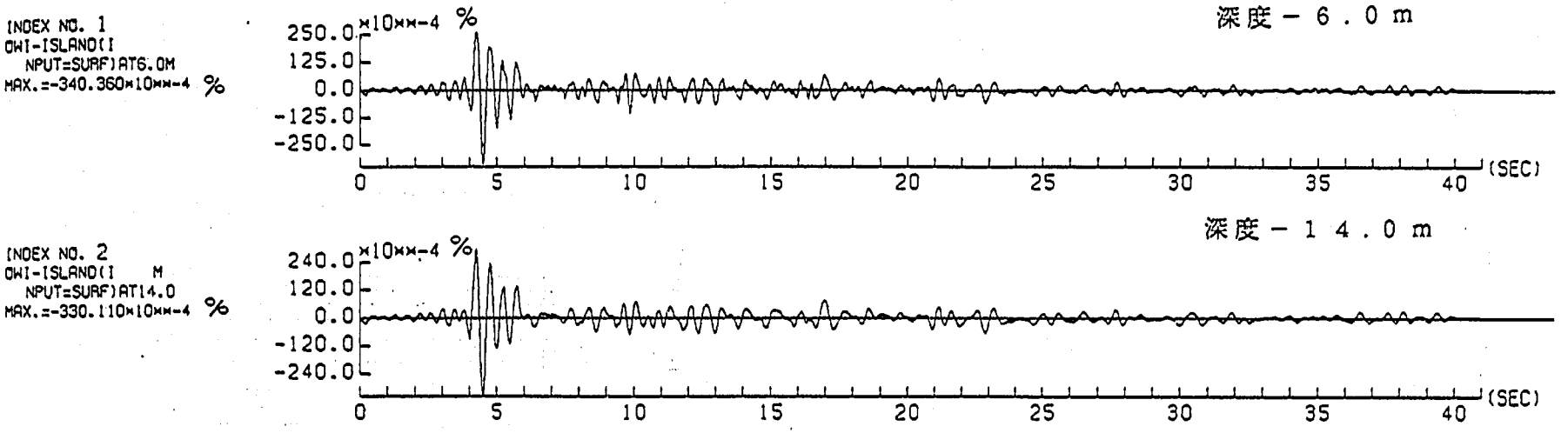
（ｂ）ｈ～γ曲線

図－１．３．２　Ｇ／Ｇ０，ｈ～γ曲線

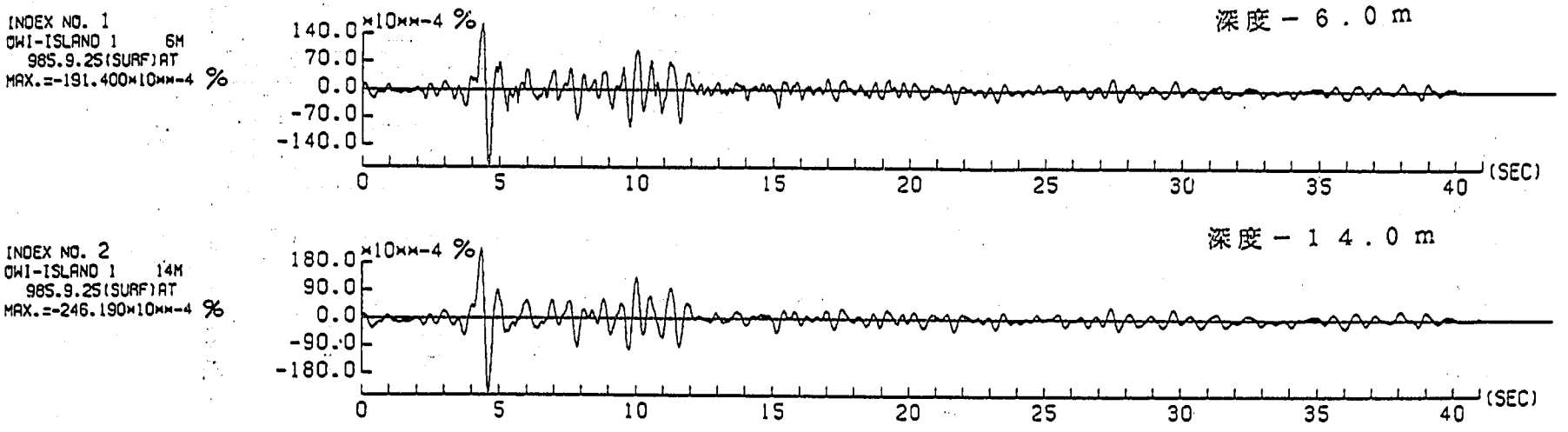
１．３．２　解析結果

プログラム［ＳＨＡＫＥ］を使用して算出した間隙水圧観測深度でのせん断ひずみ波形を図-1.3.3に示す。深度-6.0mでは、ＮＳ方向で最大0.034%，ＥＷ方向で最大0.019%，また深度-14mでは、ＮＳ方向で最大0.033%、ＥＷ方向で最大0.025%のせん断ひずみが発生している。

また、地盤内各層での加速度・せん断応力・せん断ひずみの最大値の分布を図-1.3.4、1.3.5、1.3.6に示す。最大加速度に関しては、深度-10m以深にて急激な増幅が認められる。これは、上昇部の廃土層が下部埋立層より剛性が高いためと思われる。また、最大せん断ひずみは、深度-8m～-13m間のシルト層部で最大となり、ひずみレベルは0.1%程度になっている。

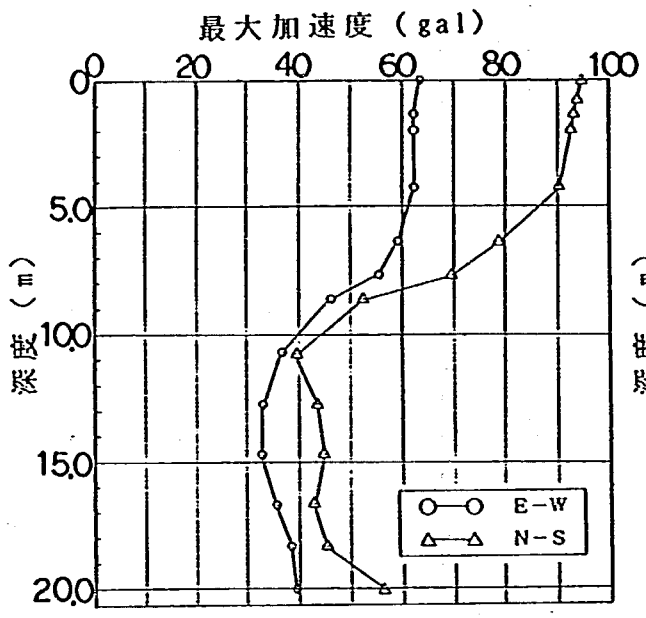


（ａ）ＮＳ方向

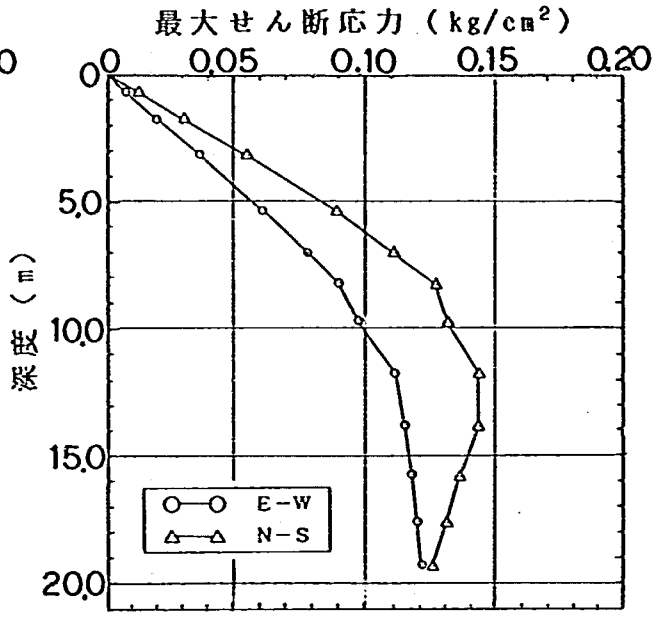


（ｂ）ＥＷ方向

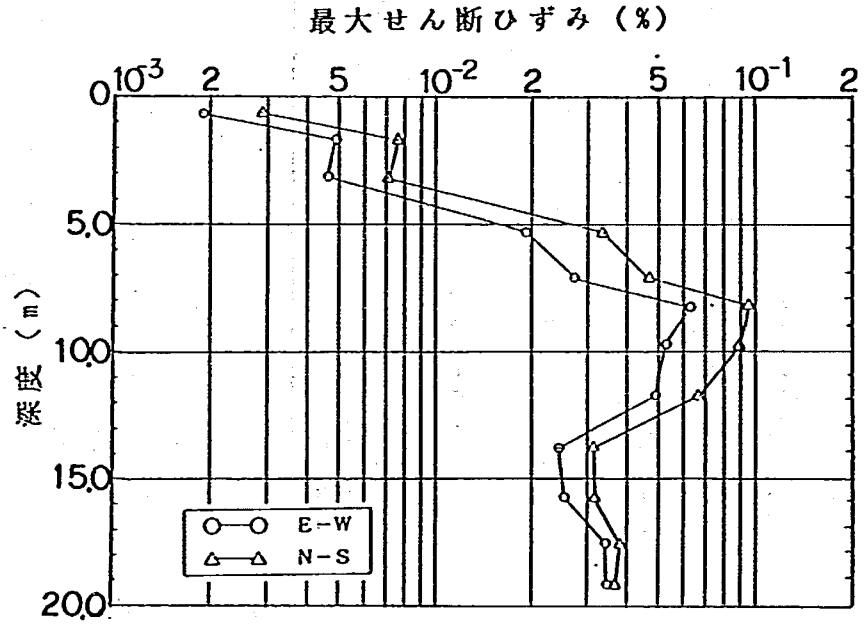
図－１．３．３　せん断ひずみ波形（GL-6.0m,GL-14.0m）



図－１．３．４　最大加速度分布



図－１．３．５ 最大せん断応力分布

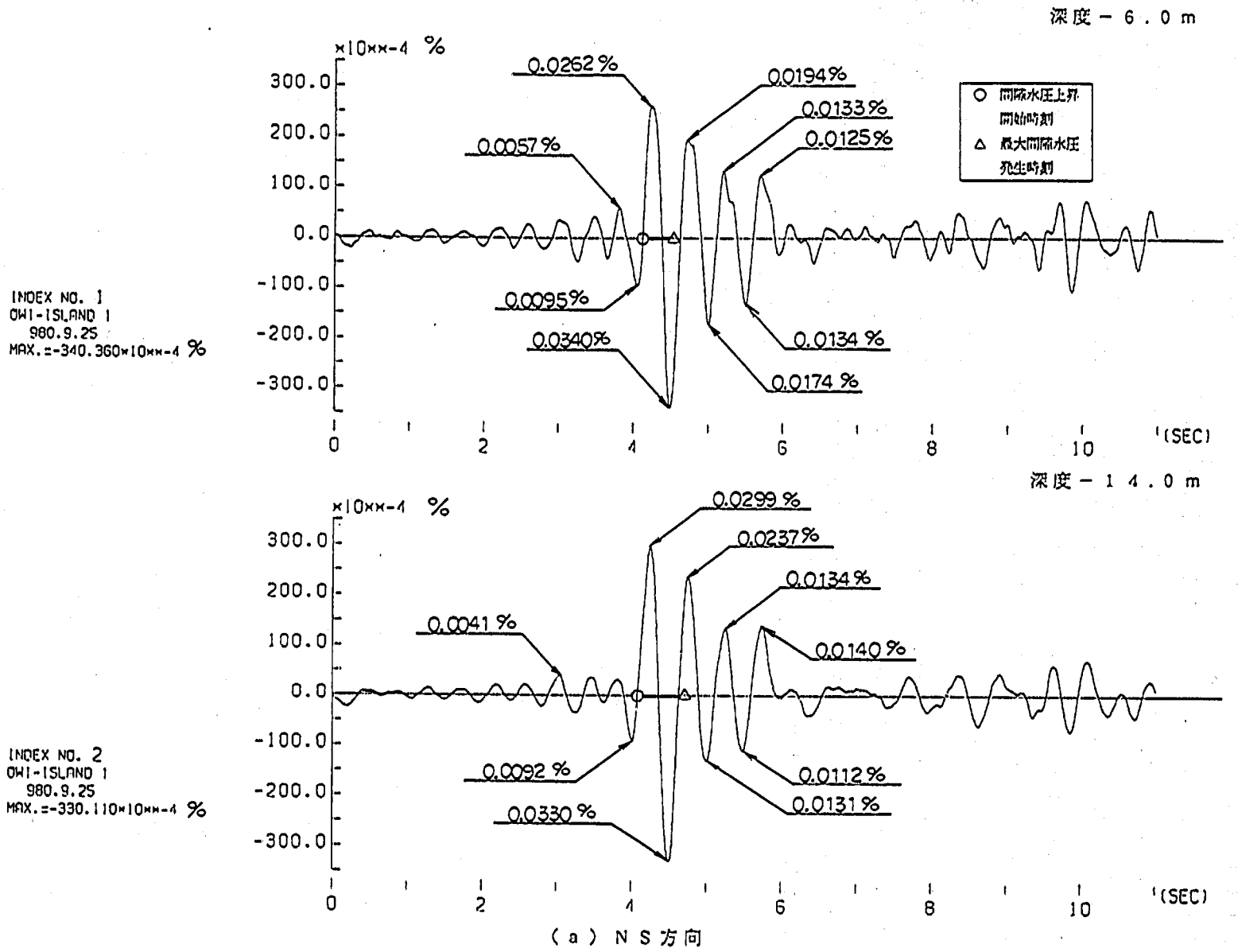


図－１．３．６　最大せん断ひずみ分布

１．４　地盤内せん断ひずみと間隙水圧比との関係

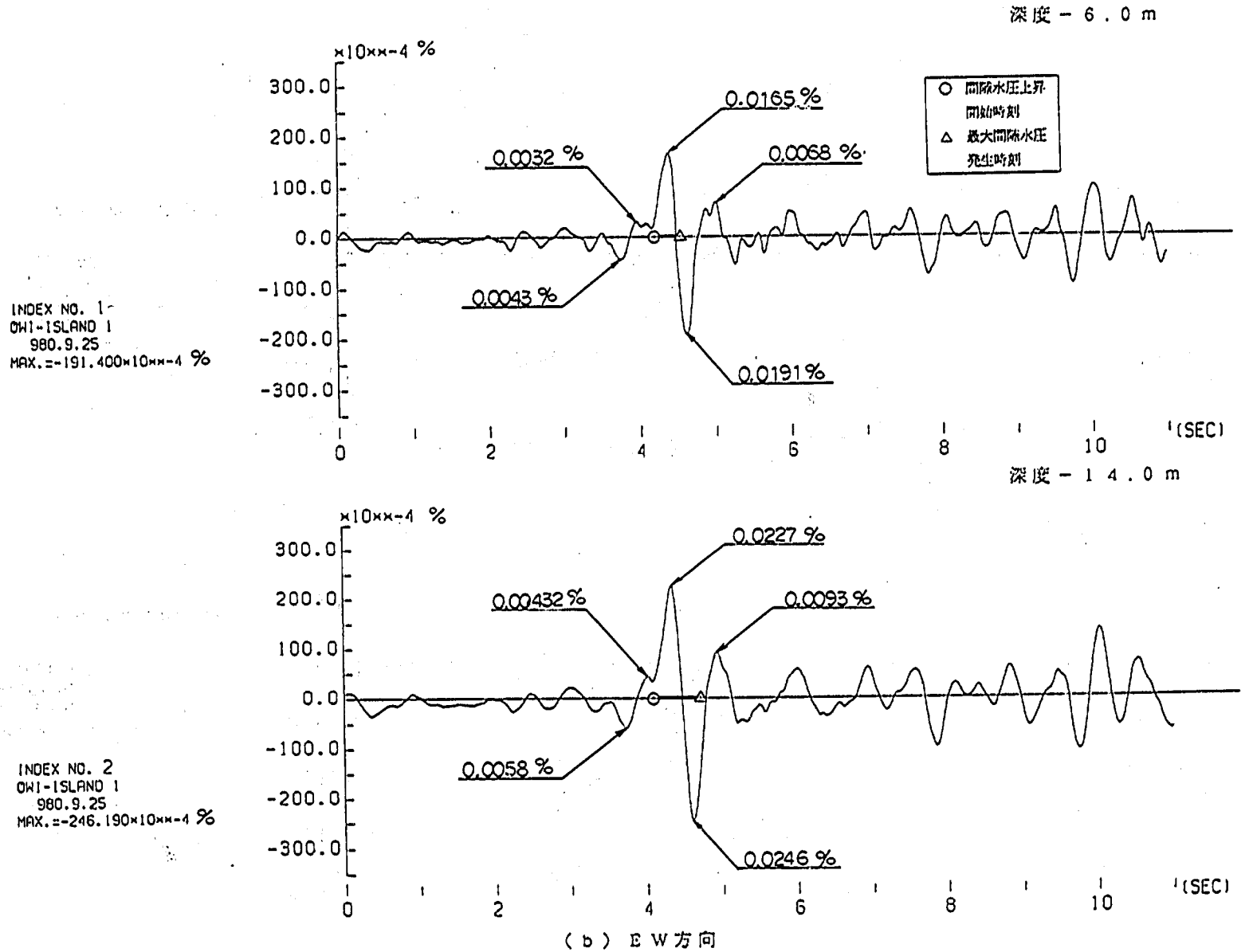
図1.4.1，1.4.2にプログラム「ＳＨＡＫＥ」で算出したせん断ひずみと間隙水圧比の時刻歴波形を11秒まで拡大して示す。間隙水圧計設置深度での最大せん断ひずみは、両深度ともに、ＮＳ方向が大きく、また初期の一波で間隙水圧が上昇している。本地震において発生した間隙水圧比は、両深度ともほぼ等しく、0.12～0.15程度であり、液状化現象の極めて初期状態である。

間隙水圧の蓄積は、ほぼT_1=4.1秒からT_2=4.7秒間で最大値に達している。その後、間隙水圧は応答しながら消散している状況が確認される。間隙水圧の蓄積開始時刻（T_1）とそれ以前のせん断ひずみ値を比較することで、Threshold　Strainを検討する。２成分のせん断ひずみのうち、値の大きいＮＳ成分で、間隙水圧蓄積前の最大値は、深度-6.0mで0.0095%、深度-14.0mで0.0092%であり、Threshold Strainは約0.01%程度と考えられる。この値は横田・今野・吉田[4)]が報告している値と符合する。第Ｉ編で提案した間隙水圧発生モデルにおけるThreshold Strainである0.05%より小さい結果となっている。



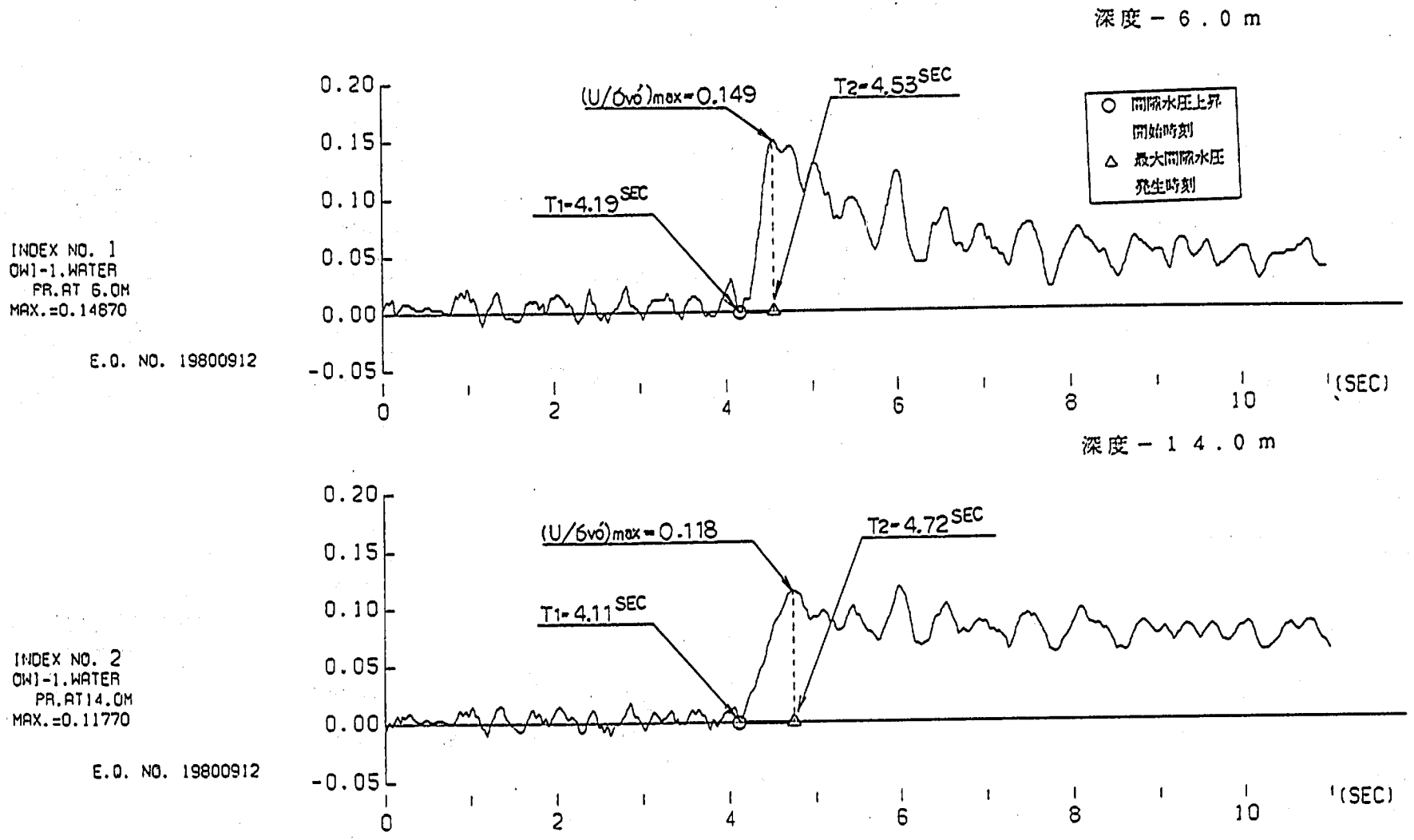
（ａ）ＮＳ方向

図－１．４．１　せん断ひずみ波形（0～11秒）



（ｂ）ＥＷ方向

図－１．４．１　せん断ひずみ波形（0～11秒）



図－１．４．２　間隙水圧比波形（0～11秒）

２．長柄ダムでの観測データの検討

２．１　観測地点及び観測方法の概要[5),6)]

千葉県長生郡長柄町に水資源開発公団が建設中の長柄ダムは堤高52mの傾斜コアを持つゾーン型アースダムである。表-2.1.1に長柄ダムの諸元を示す。昭和48年1月に着工し、昭和55年10月から60年5月にかけてダム本体が建設され、昭和61年4月から試験湛水を行っている。図-2.1.1に長柄ダムの平面図をまた図-2.1.2に断面図を示す。

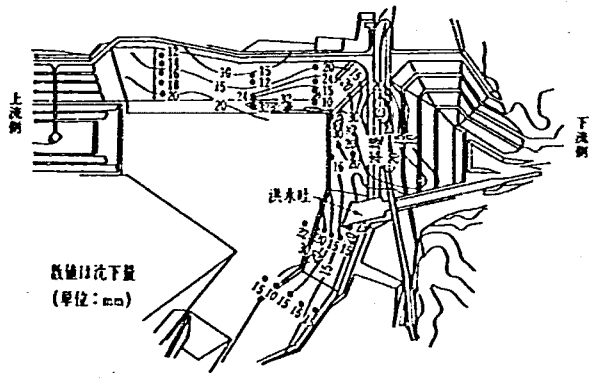
長柄ダムには、堤体及び周辺地盤に計10ヶ所の強震計が設置されている。図-2.1.3、図-2.1.4及び表-2.1.2に強震計配置を示す。設置されている強震計の機種は、Ｇ－１からＧ－７までが可動線型の電磁式強震計（勝島製作所製，ＰＴＫ-130Ｈ，ＰＴＫ-130Ｖ）であり、Ｇ－８からＧ－１０までが普及型強震計（リオン製、ＰＶ20Ｂ）である。

昭和62年12月17日午前11時8分頃、千葉県東方沖を震源とするマグニチュード6.7の地震が発生した。震央から約29kmの地点に位置する長柄ダムでも強震記録が得られた（図-2.1.5）。合計10ヶ所の強震計中９ヶ所の強震計が作動し27成分の加速度記録が観測された。ダム天端上下流方向の最大加速度は369galであった。

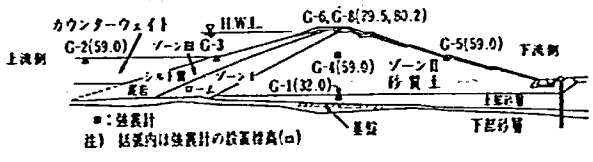
また、長柄ダムには、ボアホール型15ヶ所、盛土型41ヶ所の間隙水圧計が設置されている。地震時に、ＥＬ=46m付近に設置された間隙水圧計によるとゾーンⅢで間隙水圧上昇が確認された。

表－２．１．１　長柄ダムの諸元

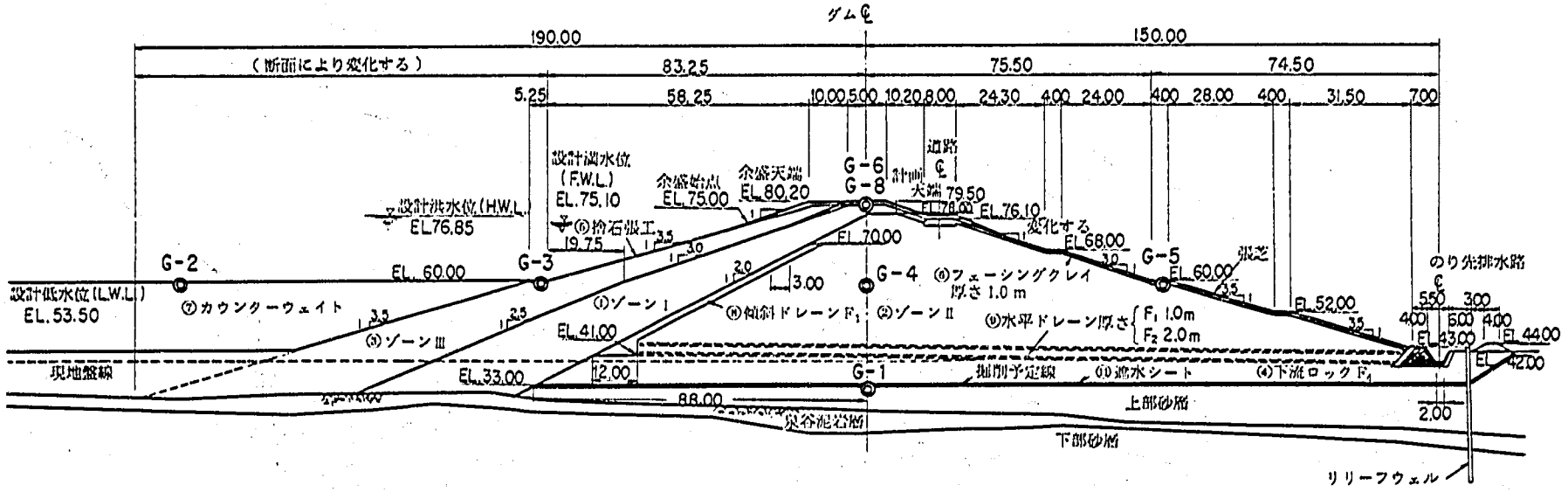
一般	河川名	村田川水系支川村田川
	所在地	千葉県長生郡長柄町山之郷および市原市犬成地内
貯水池	総貯水量	10,000,000 m³
	有効貯水量	9,600,000 m³
	堆砂量	200,000 m³
	設計満水位	EL 75.10 m
	設計洪水位	EL 76.85 m
	設計低水位	EL 53.50 m
	貯水面積	808,000 m²
	流域面積	3.4 ㎢
本堤	型式	ゾーン型アースダム（傾斜コア型）
	堤頂標高	EL 79.50 m
	堤高	52.00 m
	堤頂長	250.00 m
	堤頂幅	20.00 m
	堤体積	1,455,000 m³
左岸副堤	堤頂長	480.00 m
	堤頂幅	10.00 m
	堤体積	914,000 m³
右岸副堤	堤頂長	305.00 m
	堤頂幅	20.00～10.00 m
	堤体積	732,000 m³
洪水吐き	設計洪水量	185 m³/s
	越流頂標高	75.10 m
	設計越流水深	1.75 m
	減勢工型式	静水池型



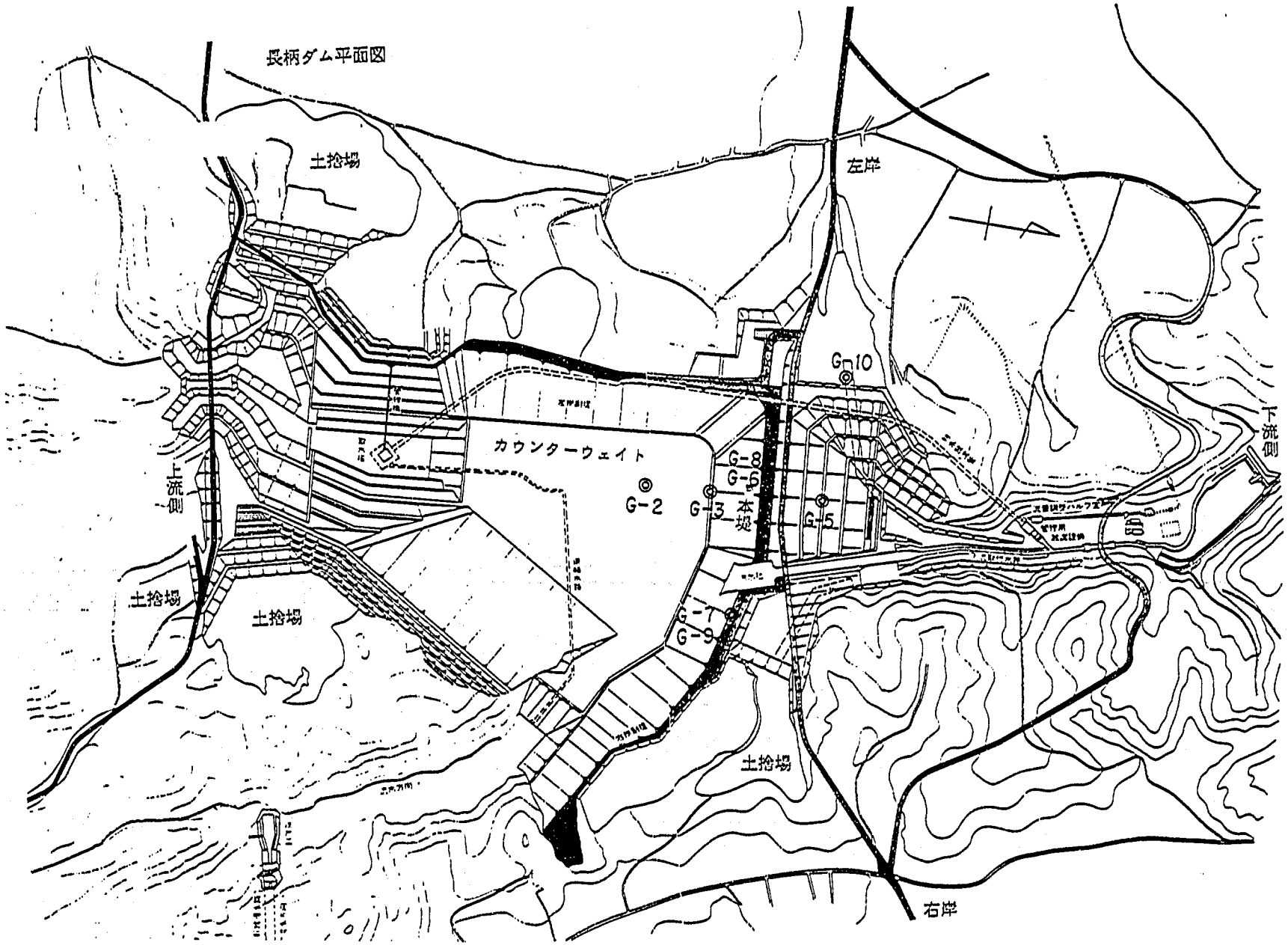
図－２．１．１　長柄ダム平面図



図－２．１．２　長柄ダム断面図



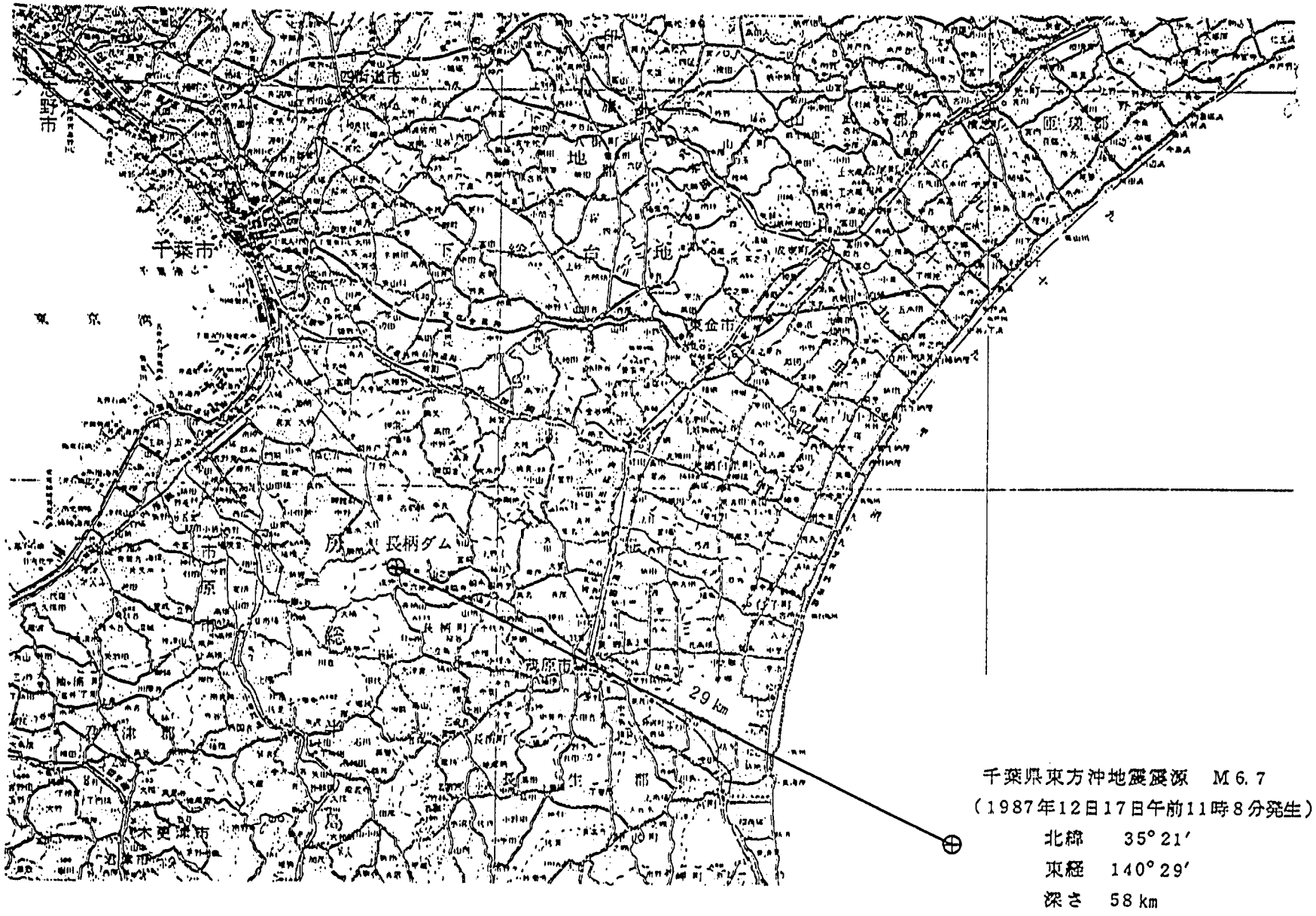
図－２．１．３　強震計配置図（断面図）



図－２．１．４　強震計配置図（平面図）

表－２．１．２　強震計設置位置

計器番号	測　　点	ダム軸からの距離	標　　高	強震計機種
G－1	H. STA. 1＋40	℄　0 m	EL. 32 m	電磁式強震計
〃 2	〃 1＋40	U 180	〃 59	〃
〃 3	〃 1＋40	U 86.5	〃 59	〃
〃 4	〃 1＋40	℄　0	〃 59	〃
〃 5	〃 1＋40	D 76	〃 59	〃
〃 6	〃 1＋40	℄　0	〃 79.5	〃
〃 7	R. STA. 3＋30	℄　0	〃 70	〃
〃 8	H. STA. 1＋37.5	℄　0	〃 80.2	普及型強震計
〃 9	R. STA. 3＋30	℄　0	〃 79.7	〃
〃 10	集　水　工	D 104	〃 47	〃



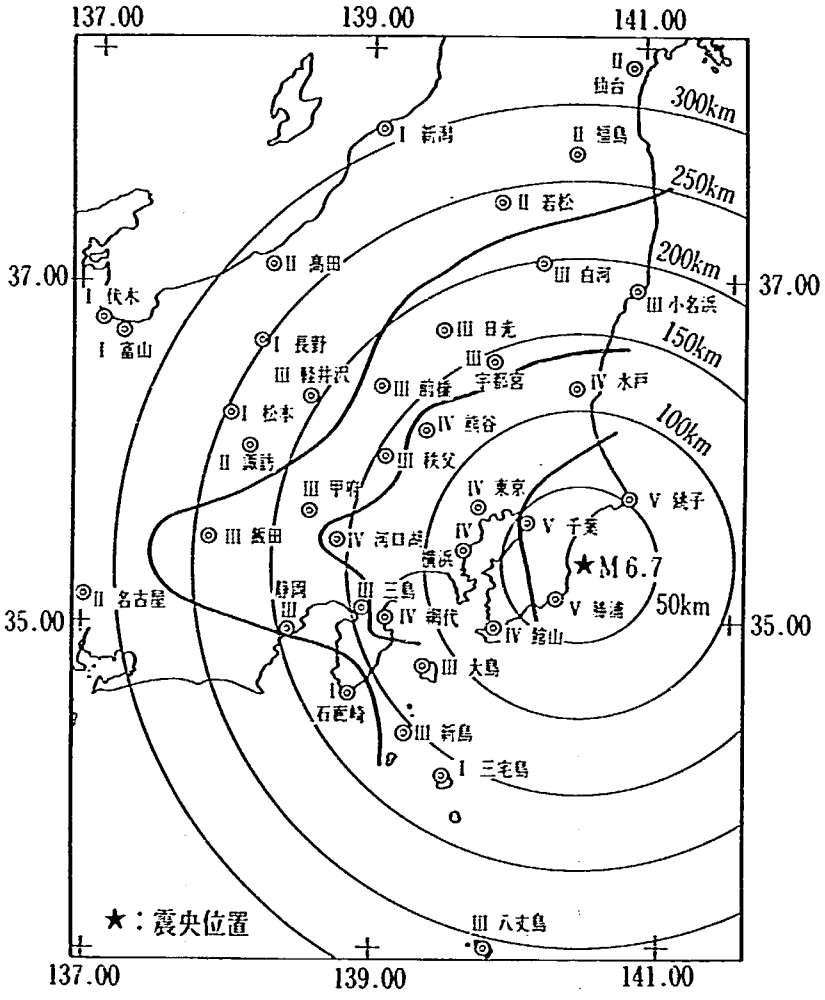
図－２．１．５　長柄ダムと千葉県東方沖地震震源の位置

2．2　観測記録の概要

2．2．1　地震の概要

昭和62年12月17日午前11時8分頃、千葉県東方沖を震源とするマグニチュード6.7の地震が発生した。気象庁の発表[7]によれば、この地震の震央位置は北緯35° 21′，東経140° 29′ 震源深さ58kmである。図-2.2.1に各地の震度を示す。

発震機構（メカニズム解）に関する検討結果から溝上[8]は、この地震がフィリピン海プレート内で生じたP軸（最大主応力軸）が北東－南西方向の横ずれ型の断層によるものであったことを報告している。節面（潜在的なせん断面）の一つはほぼ南北方向にむかい余震域の分布方向を向いている。



図－2．2．1　千葉県東方沖地震による各地の震度

２．２．２　加速度記録の概要

ダムの各部で観測された最大加速度を表-2.2.1に示す。

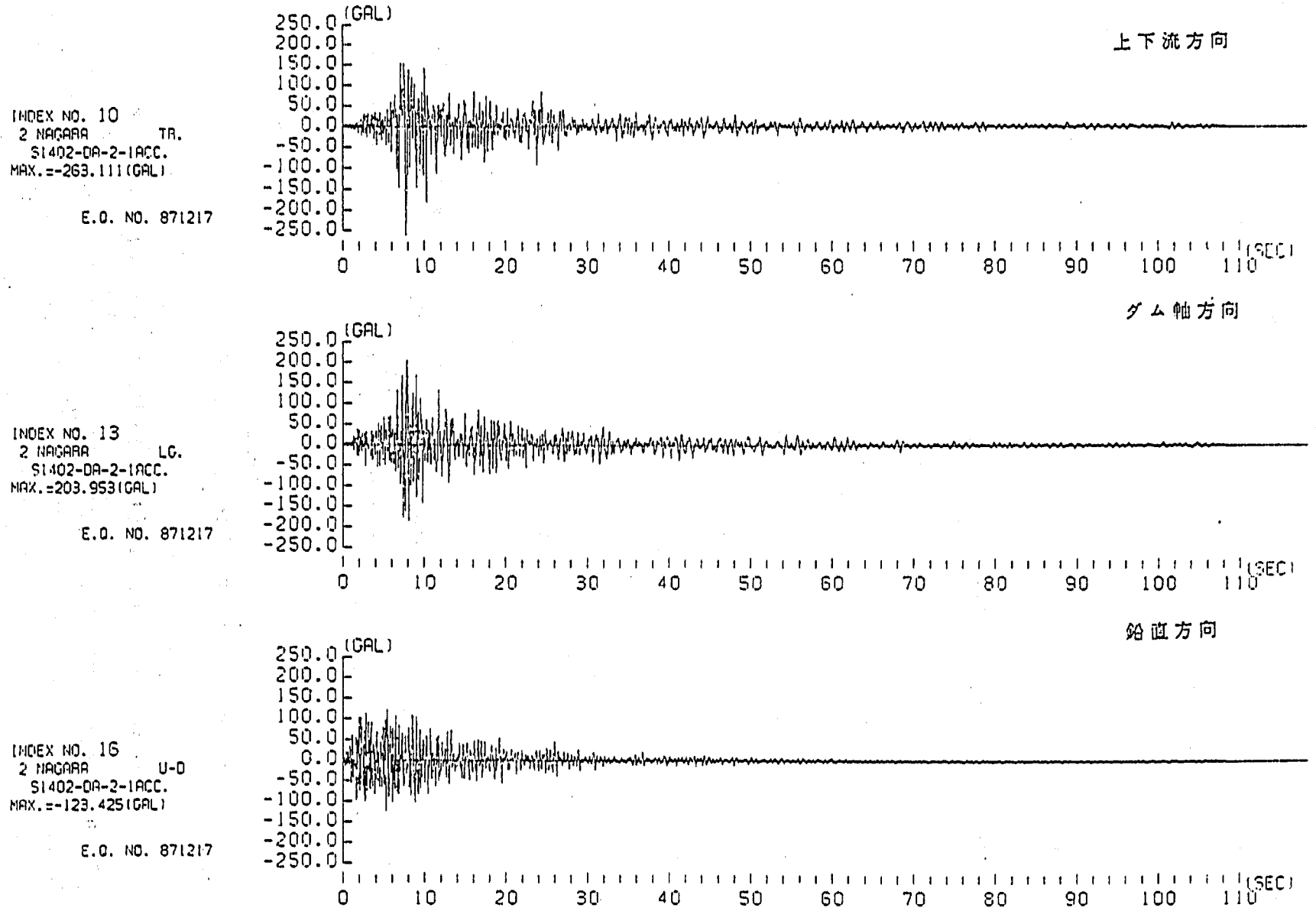
堤体直下の基盤面（Ｇ－１）では上下流方向262gal、堤軸方向138galを記録し、ダム天端（Ｇ－６）では、上下流方向369gal、堤軸方向354galの記録が得られている。上下流方向の水平加速度は、約1.4倍に増幅されている。

間隙水圧の上昇が認められたゾーンⅢ及びカウンターウェイト部での加速度波形（Ｇ－２）を図-2.2.2に示す。なお、本記録は、計器補正及び時刻合わせを行ったものである。詳細については、土研資料第2702号[9]を参照していただきたい。

表－２．２．１　長柄ダムで得られた最大加速度記録

計器記号	測定方向記号	最大加速度(gal)
G－1	X	262
G－1	Y	138
G－1	Z	86
G－2	X	270
G－2	Y	208
G－2	Z	124
G－3	X	353
G－3	Y	288
G－3	Z	124
G－4	X	180
G－4	Y	151
G－4	Z	139
G－5	X	382
G－5	Y	298
G－5	Z	180
G－6	X	369
G－6	Y	354
G－6	Z	324
G－7	X	262
G－7	Y	294
G－7	Z	177
G－8	X	497
G－8	Y	386
G－8	Z	328
G－10	X	281
G－10	Y	148
G－10	Z	111

※測定方向記号
X：上下流方向
Y：ダム軸方向
Z：鉛直方向



図－２．２．２　カウンターウエイト上部での加速度波形（Ｇ－２）

2．3　重複反射理論によるせん断ひずみの算出

2．3．1　重複反射理論によるせん断ひずみの算出方法

1層系地盤内でのSH波伝播によるせん断ひずみγ（z,t）は以下のような誘導により地表速度（$v_{surf}(t)$）を用いて算出される。

任意深度・時刻における水平変位記録をU(z,t)とする。

表層での変位記録を式(2.3.1)と定義すると

$$U(o,t)=Us(t) \tag{2.3.1}$$

重複反射現象より、任意深度・時刻での変位は、次式となる。

$$U(z,t)=\frac{1}{2}\left\{Us\left(t+\frac{z}{vs}\right)+Us\left(t-\frac{z}{vs}\right)\right\} \tag{2.3.2}$$

深度zにおけるセン断歪（γ(z,t)）は、次式となる。

$$\gamma(z,t)=\frac{\partial U(z,t)}{\partial z}$$

$$=\lim_{\Delta z\to 0}\frac{U(z+\Delta z,t)-U(z,t)}{\Delta z}$$

$$=\frac{1}{2}\lim_{\Delta z\to 0}\frac{Us\left(t+\frac{z}{vs}+\frac{\Delta z}{vs}\right)+Us\left(t-\frac{z}{vs}-\frac{\Delta z}{vs}\right)-Us\left(t+\frac{z}{vs}\right)-Us\left(t-\frac{z}{vs}\right)}{\Delta z} \tag{2.3.3}$$

$\Delta t=\frac{\Delta z}{vs}$　とおくと　　$\Delta z\to 0$ のとき　　$\Delta t\to 0$

$$=\frac{1}{2}\lim_{\Delta t\to 0}\frac{Us\left(t+\frac{z}{vs}+\Delta t\right)-Us\left(t+\frac{z}{vs}\right)+Us\left(t-\frac{z}{vs}-\Delta t\right)-Us\left(t-\frac{z}{vs}\right)}{\Delta t\cdot VS}$$

$$= \frac{1}{2\,Vs}\left\{\lim_{\Delta t\to 0}\frac{Us\left(t+\frac{z}{Vs}+\Delta t\right)-Us\left(t+\frac{z}{Vs}\right)}{\Delta t}\right.$$

$$\left.-\lim_{\Delta t\to 0}\frac{Us\left(t-\frac{z}{Vs}-\Delta t\right)-Us\left(t-\frac{z}{Vs}\right)}{-\Delta t}\right\}$$

$$= \frac{1}{2\,Vs}\left\{\frac{\partial Us\left(t+\frac{z}{Vs}\right)}{\partial t}-\frac{\partial Us\left(t-\frac{z}{Vs}\right)}{\partial t}\right\}$$

$$= \frac{1}{2\,Vs}\left\{\upsilon_{surf}\left(t+\frac{z}{Vs}\right)-\upsilon_{surf}\left(t-\frac{z}{Vs}\right)\right\} \qquad (2.3.4)$$

ここに、$\upsilon_{surf}(t)$：地表での水平速度記録

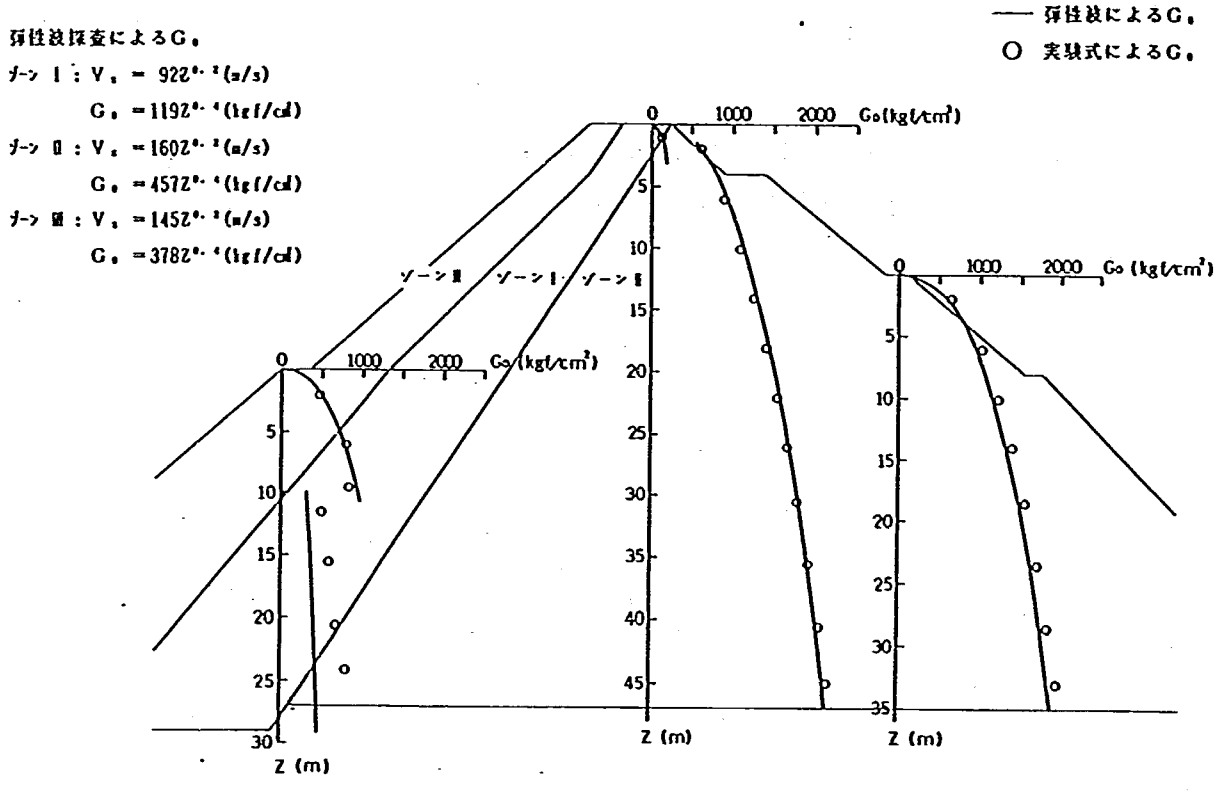
$Vs(t)$　：地盤のせん断波速度

2．3．2　地盤のせん断波速度

前項で述べた手法で、地盤内でのせん断ひずみを算出する際には、ＳＨ波の伝播速度が必要である。地震後に実施した弾性波探査及び室内試験では、間隙水圧上昇が確認されたカウンターウェイト部中間での、微小ひずみレベルにおけるせん断弾性波速度は、約200m/sと推定される（図-2.3.1）。

しかし、今回の地震記録からの逆解析では、地震最大応答時の伝播速度は、約120m/s～130m/sであったと報告されている[9]。36%～42%程度のせん断剛性の低下が発生したものと考えられる。

本検討においてせん断ひずみを算出する際には、最大応答時の伝播速度であるＶｓ＝120m/sを使用する。



図－２．３．１　長柄ダムの初期せん断剛性分布図

2．4　累積せん断ひずみから算出した間隙水圧比

図-2.4.1に重複反射理論により求めたカウンターウェイト内のせん断ひずみを示す。カウンターウェイト部分は、ダム内部ほど十分な締固めは行われていないため、地震動の作用により間隙水圧が上昇したものと考えられる。

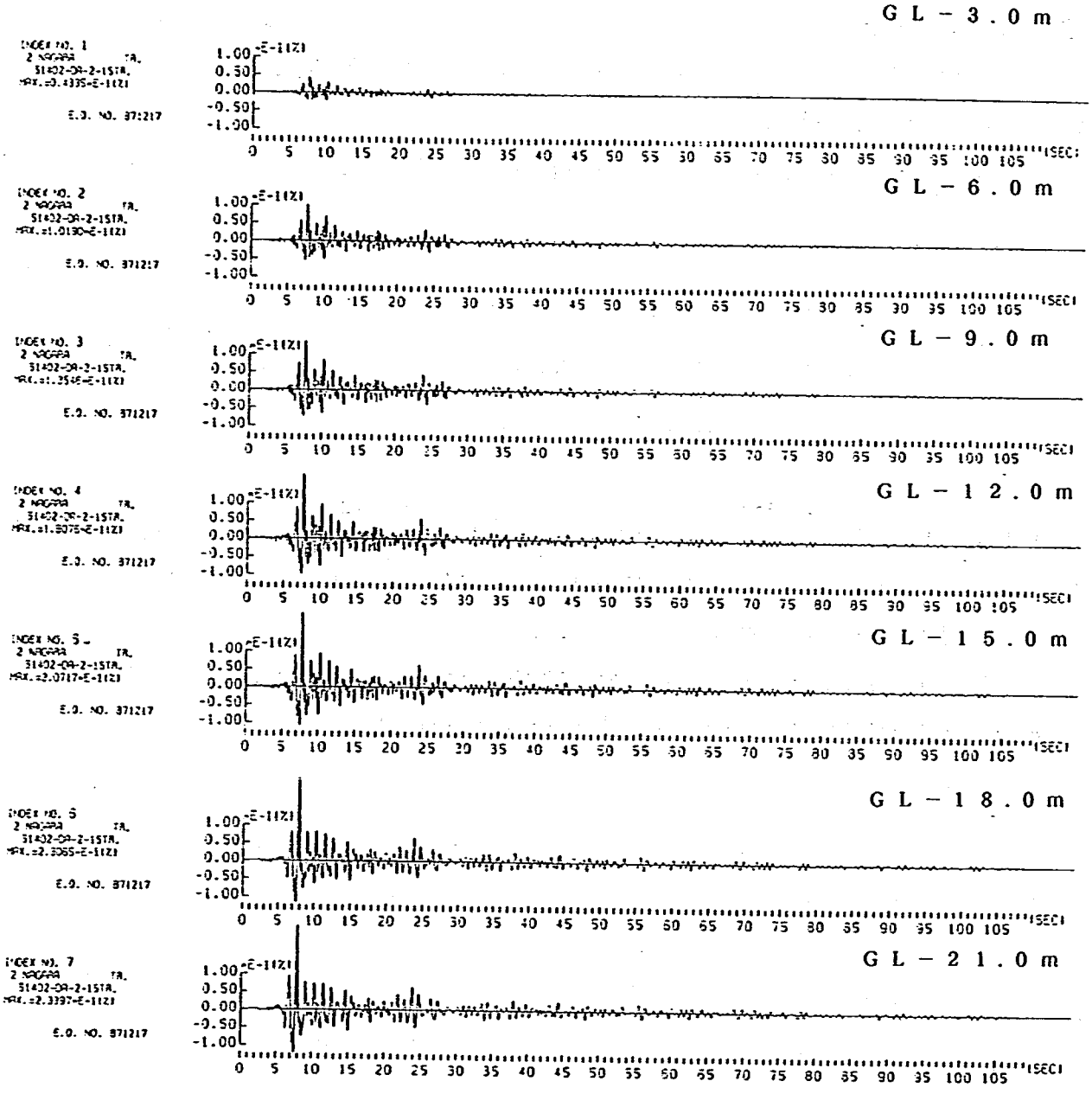
したがって、第Ⅰ編で検討した間隙水圧発生特性モデルを適用し、間隙水圧の概略検討を実施する。

$$U/\sigma_{v0}' = \frac{\Sigma\ (\gamma - 0.05)}{1.076 \times \Sigma\ (\gamma - 0.05) + 0.633} \qquad (2.4.1)$$

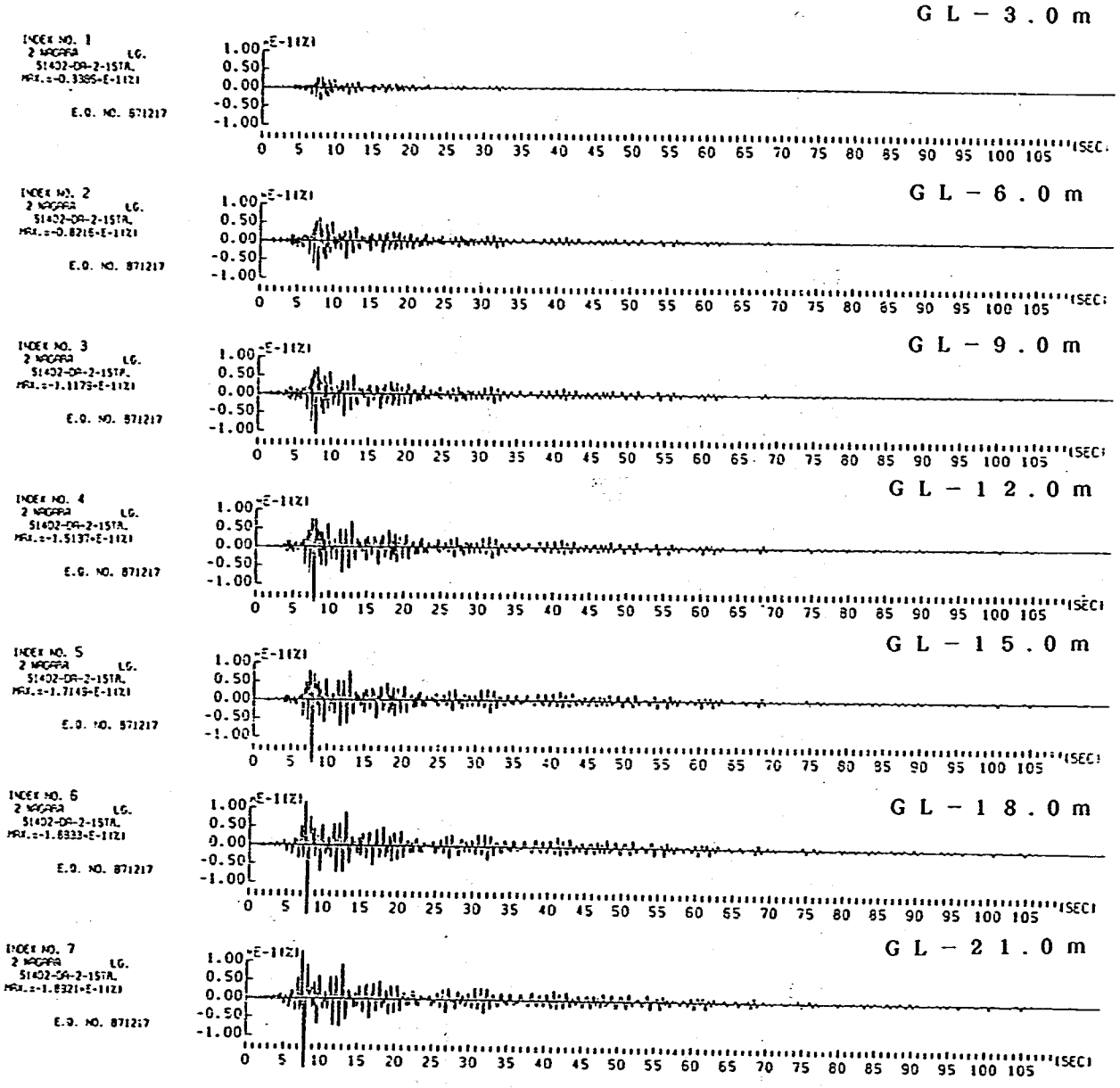
ここに、γ：せん断ひずみ振幅（%）

カウンター内部に発生したであろうせん断ひずみの時刻歴波形とThreshold Strainレベルを図-2.4.2に示す。また、上述の間隙水圧発生モデルを適用し、カウンターウェイト内の間隙水圧比を求めると図-2.4.3のようになる。

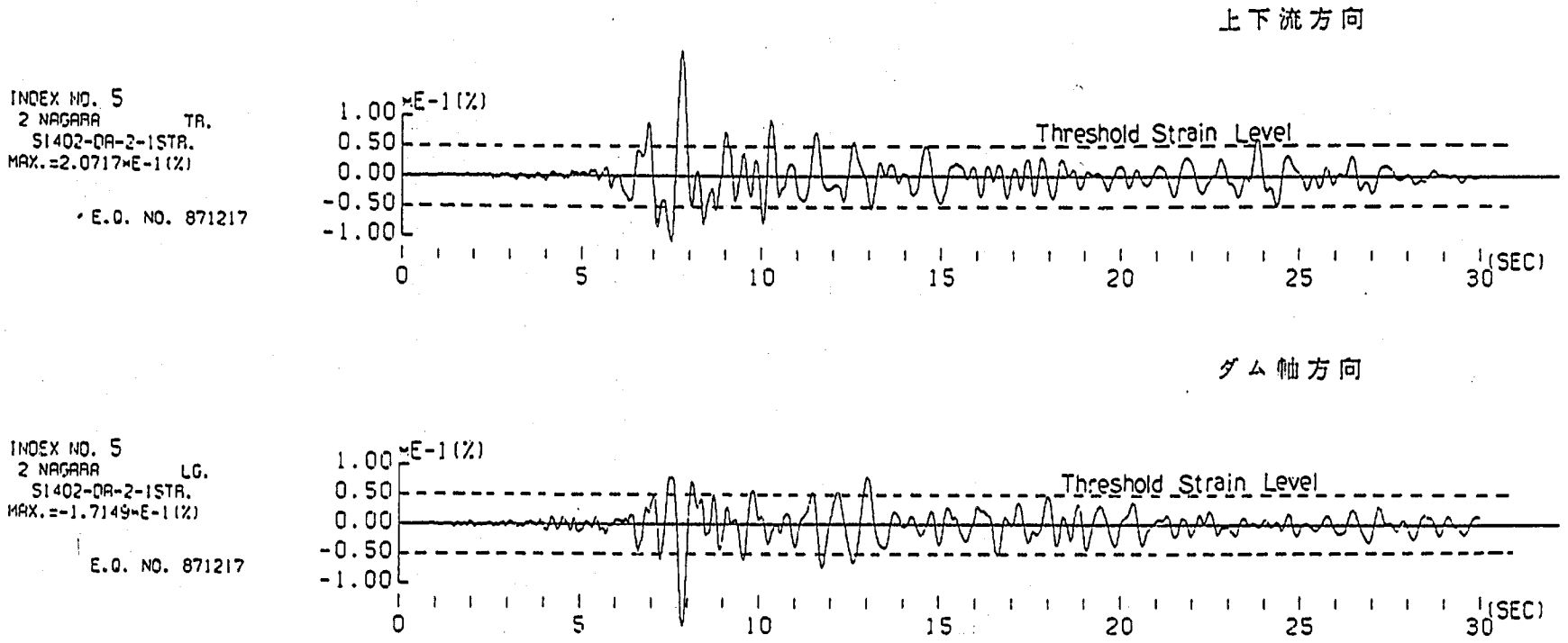
この結果より、カウンターウェイト内では深さ約15mで0.17～0.25程度の間隙水圧比となり、0.20kgf/cm^2 程度の間隙水圧が発生する可能性があることがわかる。



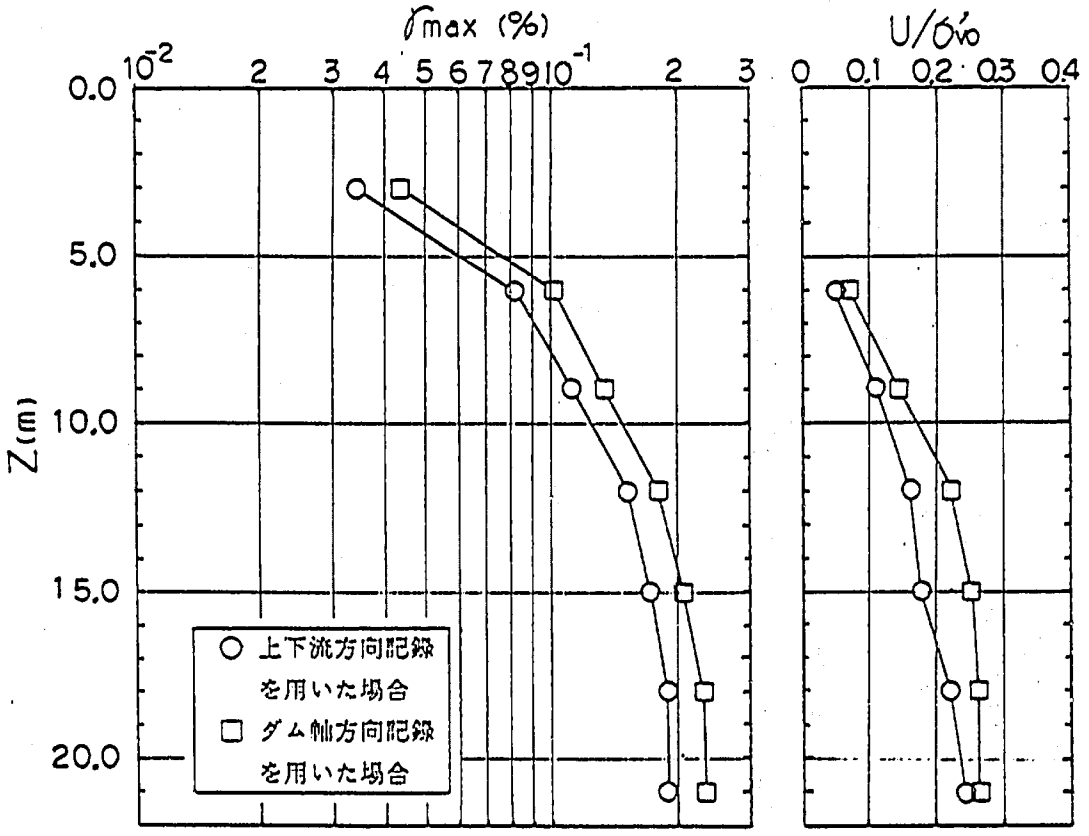
図－２．４．１（ａ）　カウンターウエイト内のせん断ひずみ波形（上下流方向）



図－２．４．１（ｂ）　カウンターウエイト内のせん断ひずみ波形（ダム軸方向）



図－２．４．２　せん断ひずみ波形例（ＧＬ－１５．０ｍ）



図－２．４．３　最大せん断ひずみと間隙水圧分布

３．第Ⅲ編のまとめ

実地盤で地震時に観測された間隙水圧のデータと加速度記録を用いて、発生した間隙水圧の大きさを地盤内に生じたせん断ひずみによって説明することを試みた。しかし、発生間隙水圧が低レベルということ、また間隙水圧が初期の衝撃的振動により、もたされている等の理由により、第Ⅰ，Ⅱ編での発生間隙水圧比と累積せん断ひずみの関係を検証するには至らなかった。この検討により以下の事項が指摘される。

（１）大井埋立地で実施した地盤応答計算により求めた、せん断ひずみと間隙水圧データより、0.01%のThreshold Strain が確認され、第Ⅰ，Ⅱ編で検討した0.05%のThreshold Strainを、実地盤に適用するには今後、検討を必要とする。

（２）長柄ダムカウンターウェイト内のせん断ひずみを重複反射理論より求め、第Ⅰ編の間隙水圧発生モデルを適用した場合、カウンターウェイト深層部で若干の間隙水圧の発生が予測された。これは、地震時に間隙水圧の上昇があったという報告を裏付けるものである。

4．第III編の参考文献

1）Ishihara, K., Shimizu, K. and Yamada, Y. (1981): " Pore water pressure measured in sand deposits during an earthquake," Soils and Foundations, Vol. 21, No. 4, PP. 85～100.

2）Ishihara, K., Anazawa, Y. and Kuwano, J. (1987): " Pore Water pressures and ground motions monitored during The 1985 Chibe-Ibaragi Earthquake," Soils and Foundationas, Vol. 27, No. 3, pp. 13～30.

3）Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B. (1972):" SHAKE, A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sistes," Report No, EERC 72-12, University of California.

4）横田耕一郎、今野政志、吉田一郎（1983）、繰り返しせん断歪を用いた液状化ポテンシャルの評価：第18回土質工学研究発表会（郡山）

5）瀬戸育二、柏木順、斉藤明朗、青木美樹、向後和広：1987年12月17日千葉県東方沖地震長柄ダム観測記録、水資源公団試験所、第一試験課フィルダム材料試験室報告第8704号、昭和63年1月(1988.1)

6）木本悦朗、山崎晃、福島玲、瀬戸育二、田中博良：千葉県東方沖地震における房総導水路長柄ダムの状況について、水と土、第73号、農業土木研究会 pp. 89～95、（1988.6）

7）気象庁地震火山部：1987年12月地震火山概況（1988）

8）溝上恵：千葉県東方沖地震の概要、日本地質学会関東支部シンポジウム講演要旨集 pp. 1～8 (1988)

9）建設省土木研究所：千葉県東方沖地震の加速度記録から推定した長柄ダム堤体の動的物性、土木研究所資料、第2702号、平成元年1月

付　属　資　料

1．砕石ドレーンの実験データ

付 属 資 料 目 次

Ⅰ．振動台実験データの整理結果 …… 1

1．模型－2（5Hz，200gal，60秒加振）のデータ整理結果 …… 1

加速度計データの整理結果 …… 2

変位計データの整理結果 …… 5

間隙水圧計データの整理結果 …… 6

せん断応力の計算結果 …… 11

過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 13

2．模型－3（5Hz，200gal，60秒加振）のデータ整理結果 …… 18

加速度計データの整理結果 …… 19

変位計データの整理結果 …… 22

間隙水圧計データの整理結果 …… 23

せん断応力の計算結果 …… 28

過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 30

3．模型－4（5Hz，200gal，60秒加振）のデータ整理結果 …… 35

加速度計データの整理結果 …… 36

変位計データの整理結果 …… 39

間隙水圧計データの整理結果 …… 40

せん断応力の計算結果 …… 45

過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 47

4．模型－5（5Hz，200gal，60秒加振）のデータ整理結果 …… 52

加速度計データの整理結果 …… 53

変位計データの整理結果 …… 56

間隙水圧計データの整理結果 …… 57

せん断応力の計算結果 …… 62

過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 64

5．模型－6（5Hz，200gal，60秒加振）のデータ整理結果 …… 69

加速度計データの整理結果 …… 70

間隙水圧計データの整理結果 …… 74

せん断応力の計算結果 …… 79

過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 81

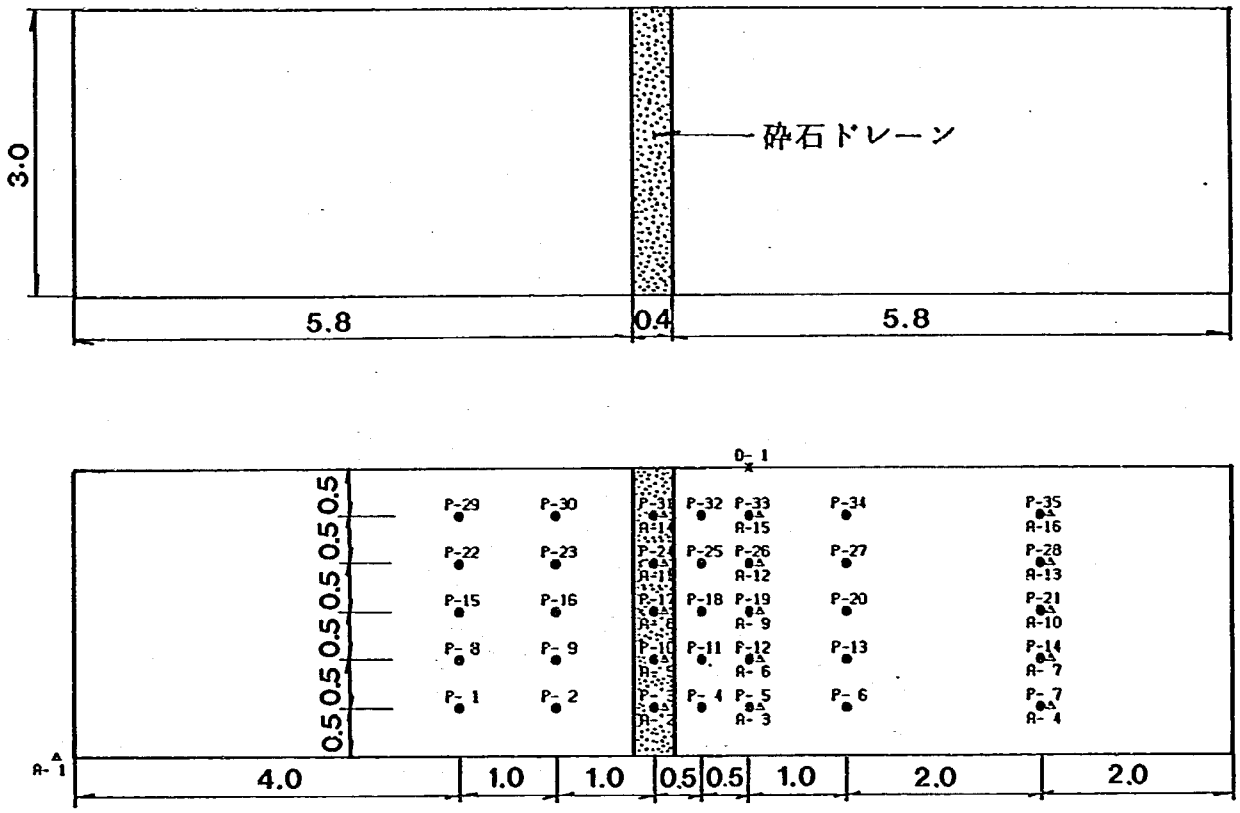
6．模型－7（2Hz，150gal，30秒加振）のデータ整理結果 …… 86

加速度計データの整理結果 …… 87

変位計データの整理結果 …… 90
間隙水圧計データの整理結果 …… 91
せん断応力の計算結果 …… 96
過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 98
7．模型－8（2Hz，150gal，30秒加振）のデータ整理結果 …… 103
加速度計データの整理結果 …… 104
変位計データの整理結果 …… 107
間隙水圧計データの整理結果 …… 108
せん断応力の計算結果 …… 113
土圧計データの整理結果 …… 113
過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 115
8．模型－9（2Hz，150gal，30秒加振）のデータ整理結果 …… 120
加速度計データの整理結果 …… 121
変位計データの整理結果 …… 124
間隙水圧計データの整理結果 …… 125
せん断応力の計算結果 …… 130
土圧計データの整理結果 …… 130
過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 132
9．模型－10（2Hz，150gal，30秒加振）のデータ整理結果 …… 137
加速度計データの整理結果 …… 138
変位計データの整理結果 …… 141
間隙水圧計データの整理結果 …… 142
せん断応力の計算結果 …… 147
土圧計データの整理結果 …… 147
過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 149
10．模型－11（2Hz，150gal，30秒加振）のデータ整理結果 …… 154
加速度計データの整理結果 …… 155
変位計データの整理結果 …… 158
間隙水圧計データの整理結果 …… 159
せん断応力の計算結果 …… 164
土圧計データの整理結果 …… 164
過剰間隙水圧比とせん断ひずみ，せん断応力比の関係と応力－ひずみ関係 …… 166

II．磁気テープの保存形式 …… 171

模型 2

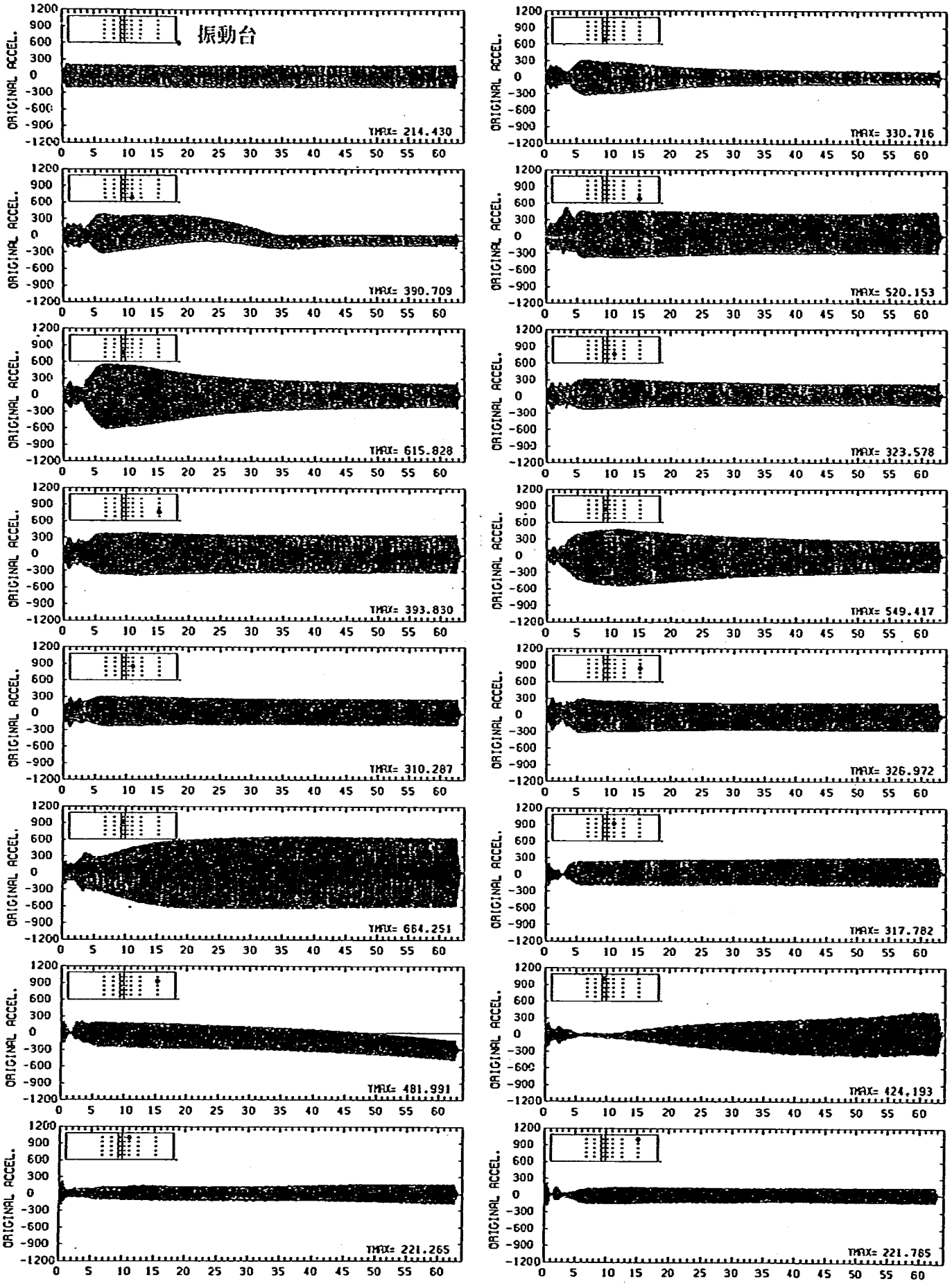


● P－ 間隙水圧計 （３５）
△ A－ 加速度計 （１６）
＊ D－ 変 位 計 （１）

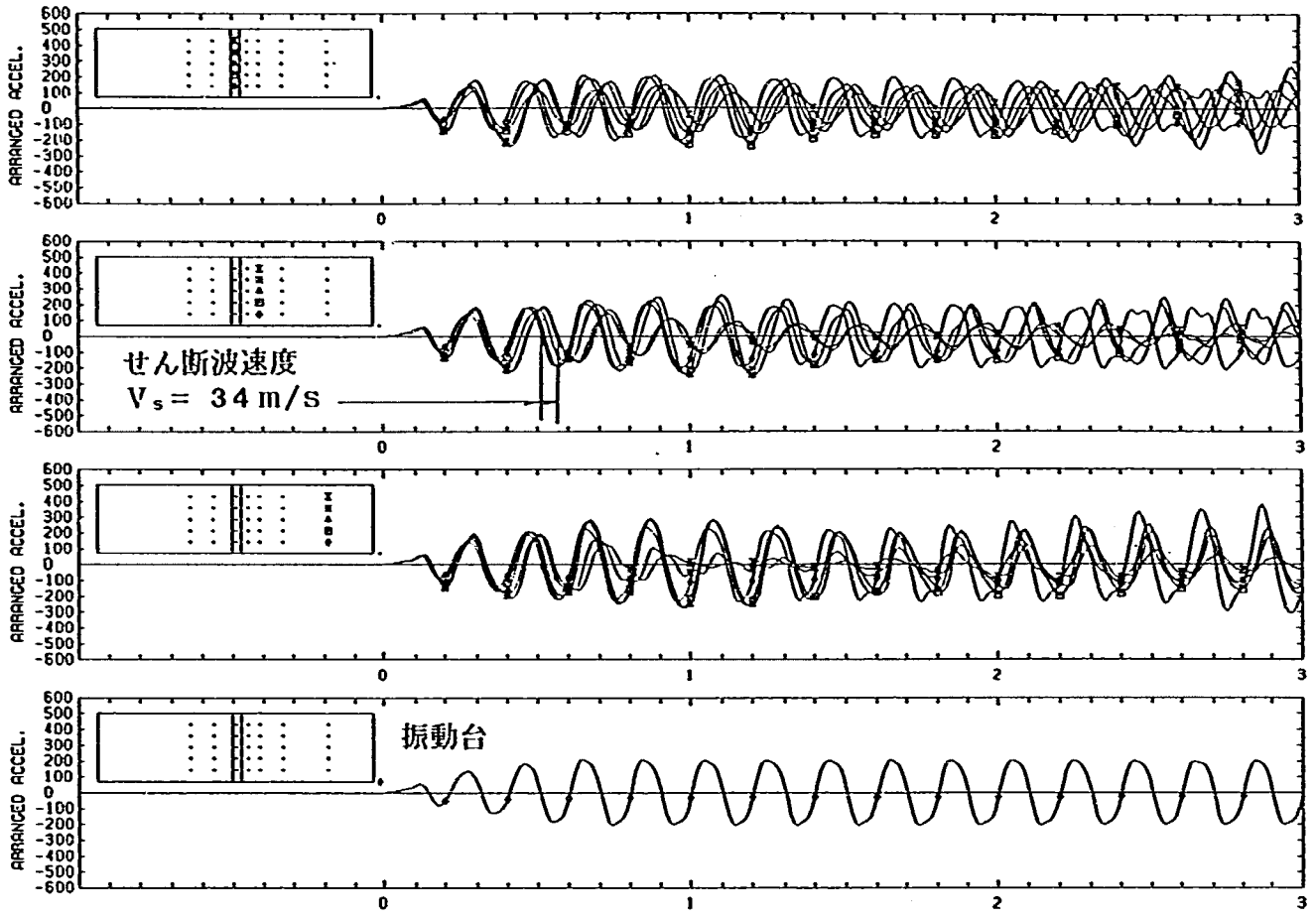
A－１は振動台加速度

P－２２は欠測

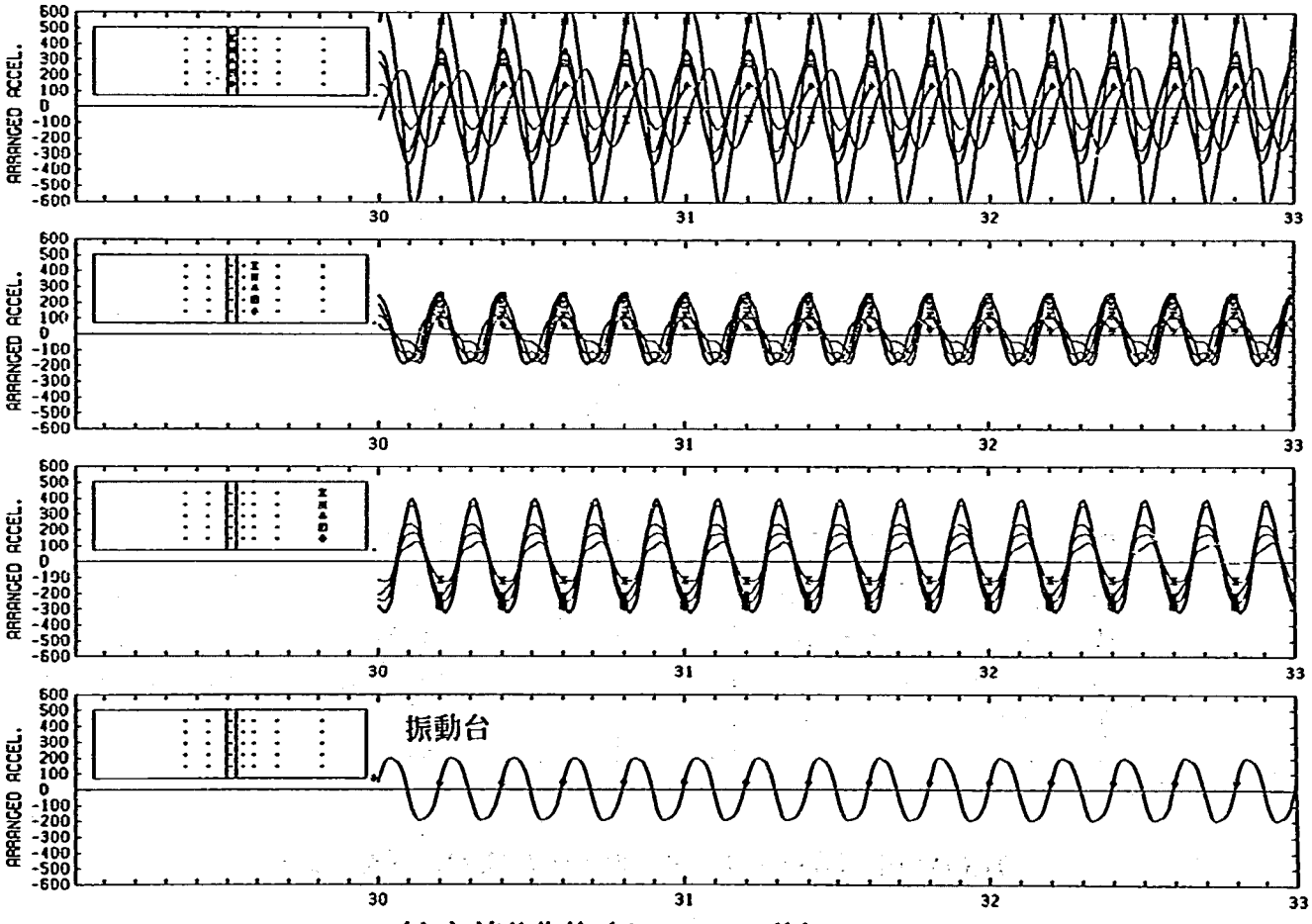
付図－１・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－２）



付図－１・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－２）

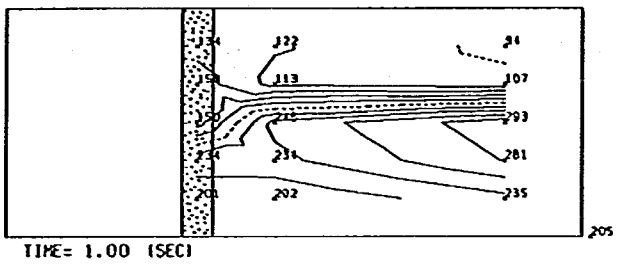


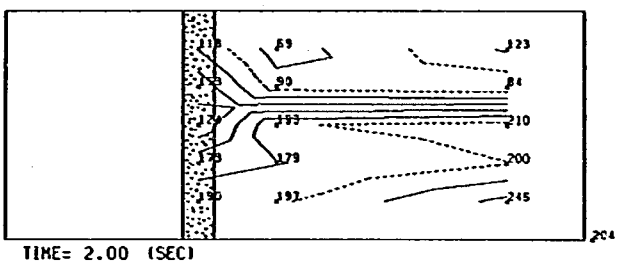
（ａ）加振開始直後（０～３秒）

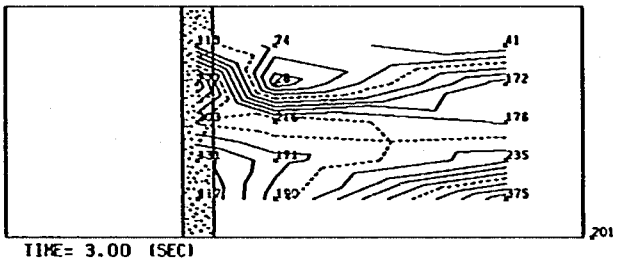


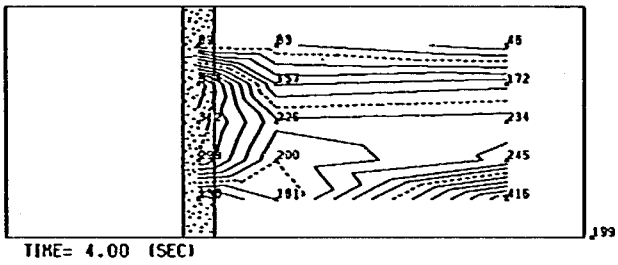
（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

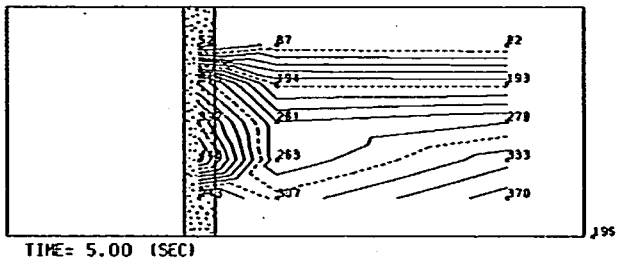
付図－１・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－２）

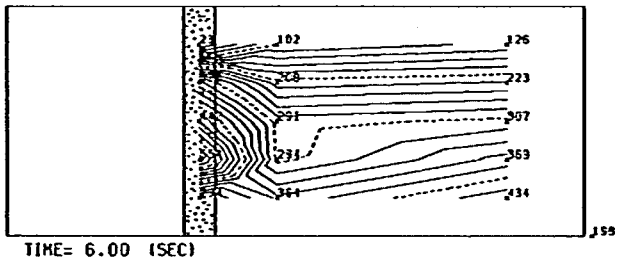


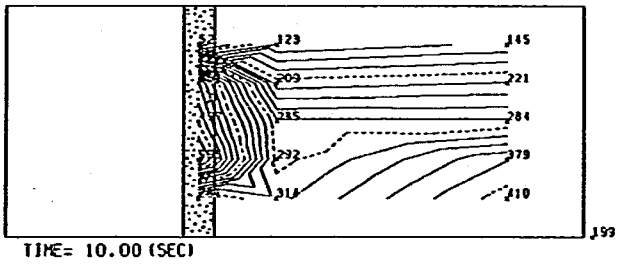


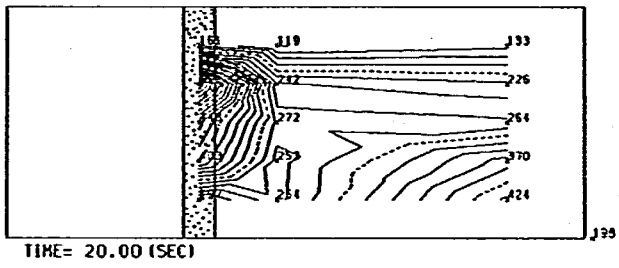


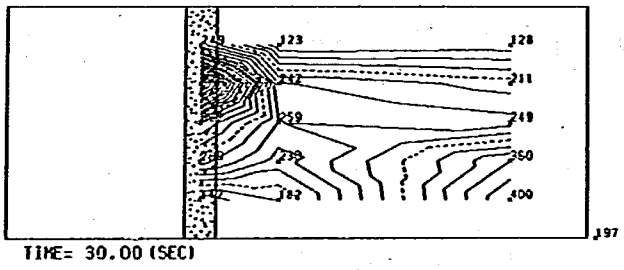


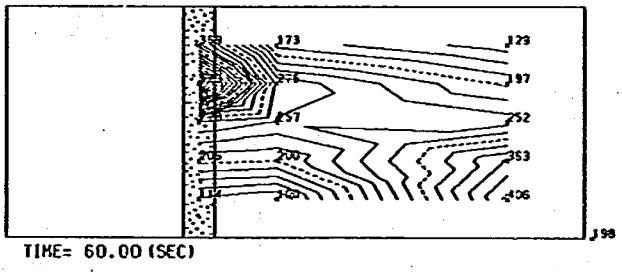




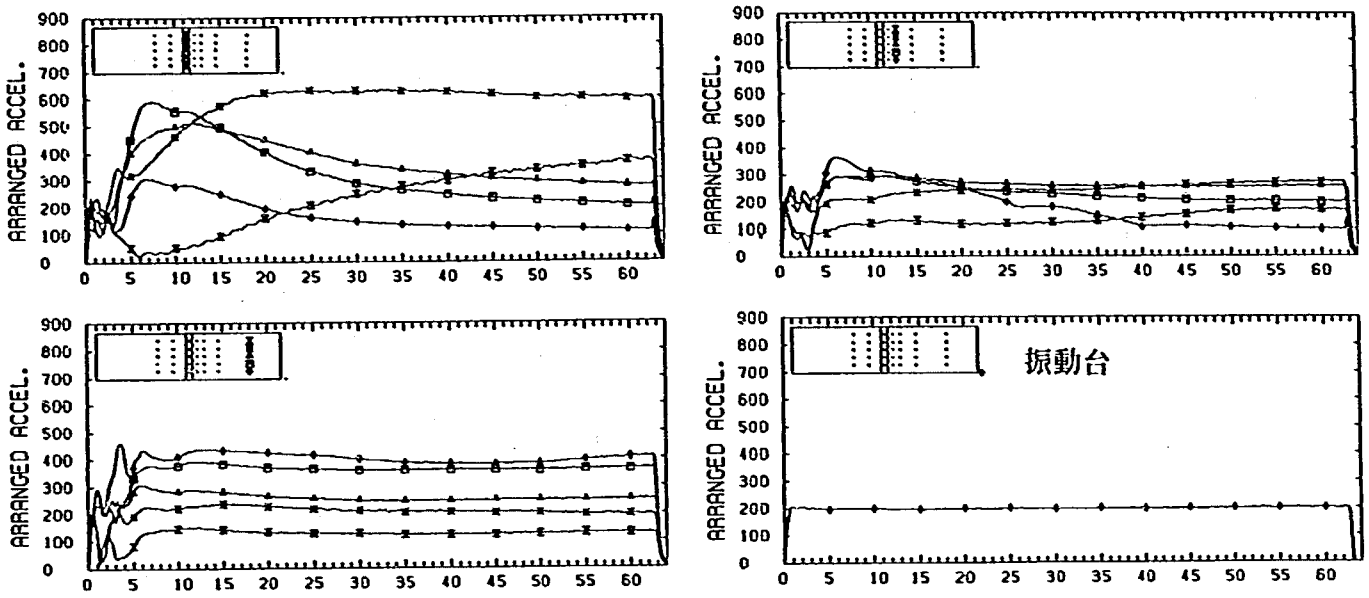




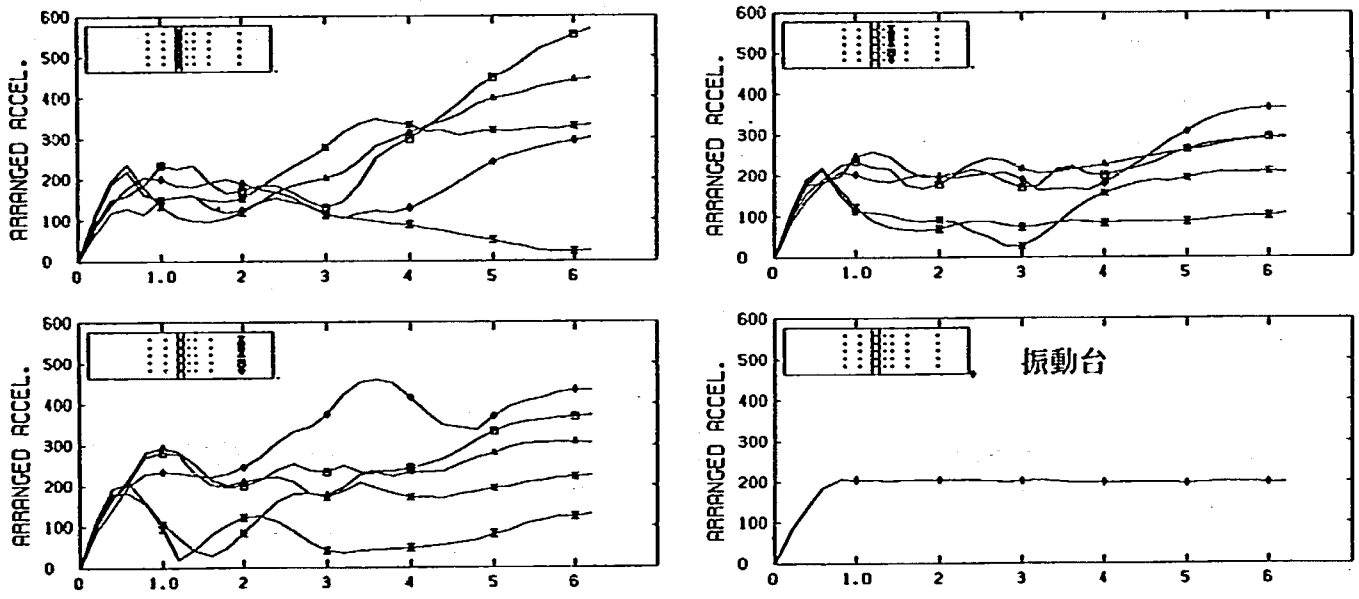




付図－１・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal、模型－２）

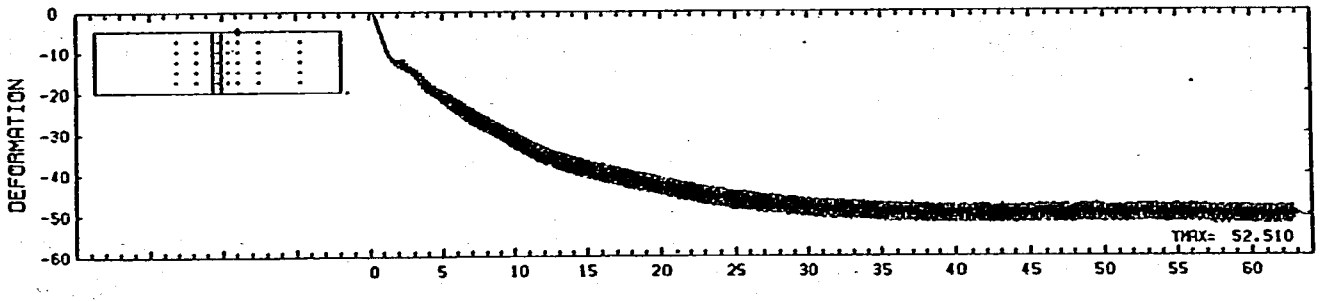


（ａ）全時間領域

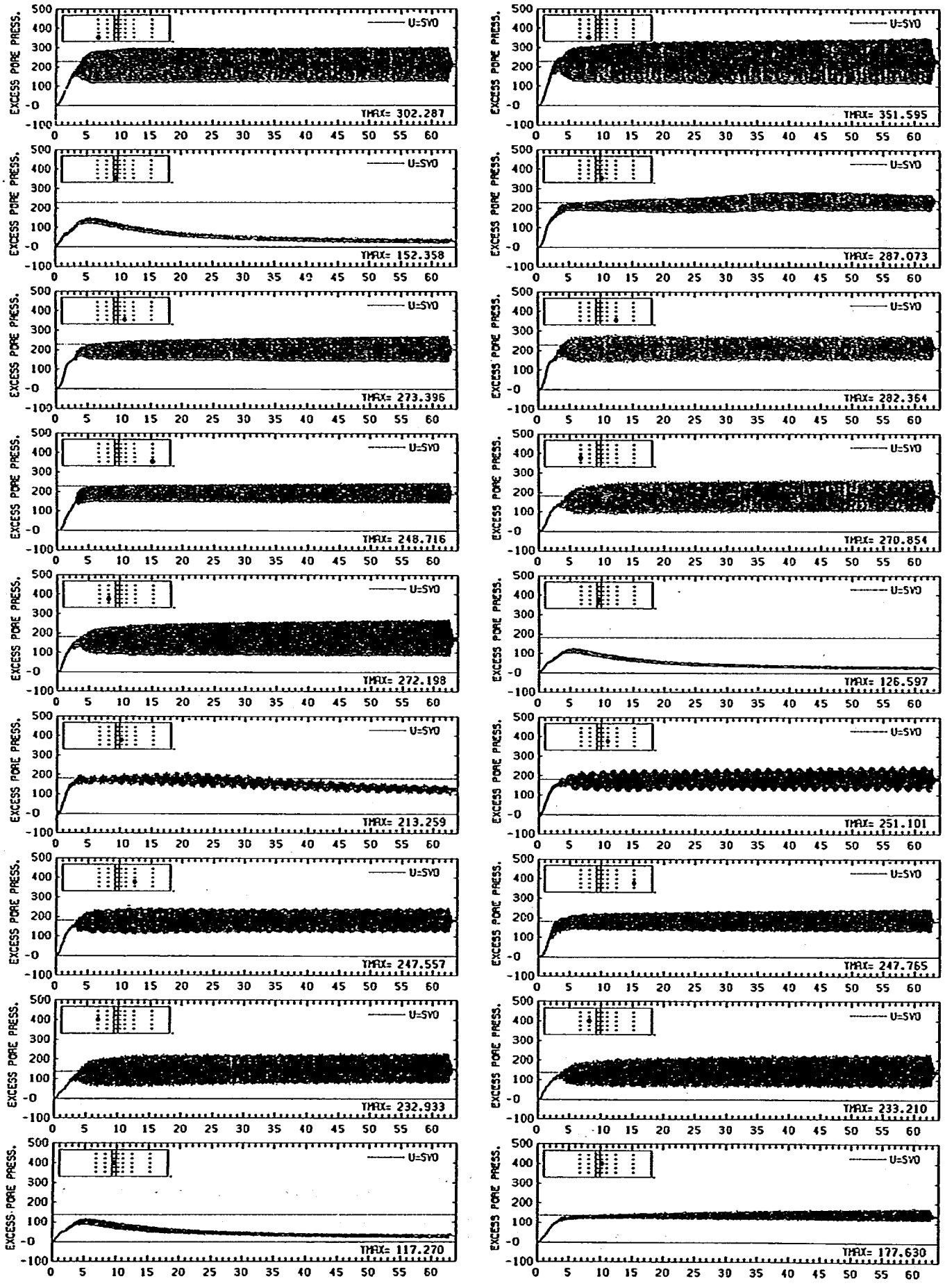


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

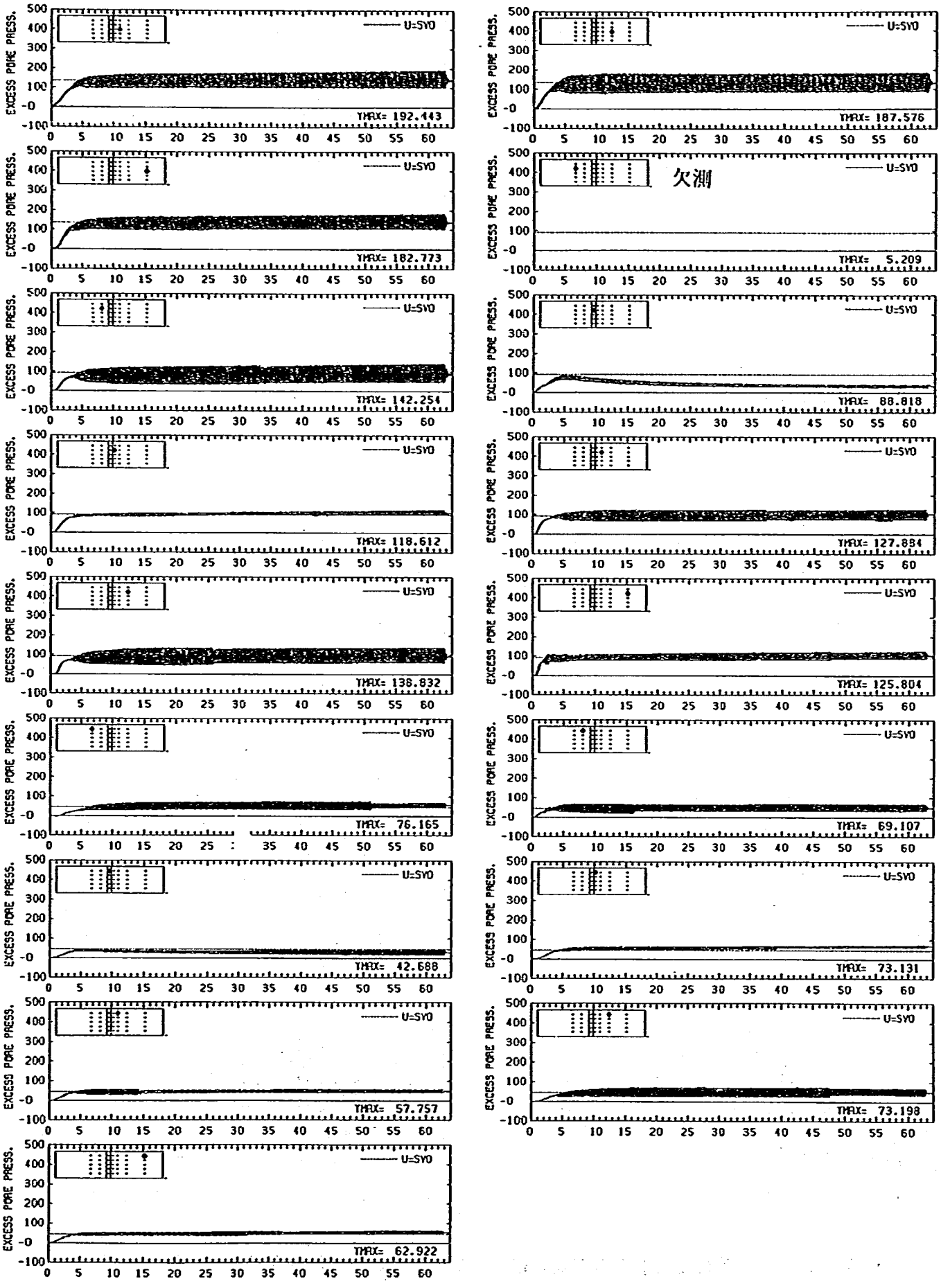
付図－１・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－２）



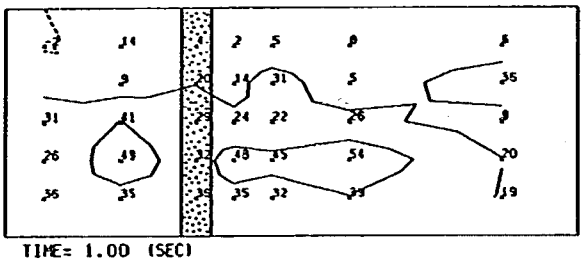
付図－１・６　変位計による地表面沈下の測定結果（単位：㎜、模型－２）

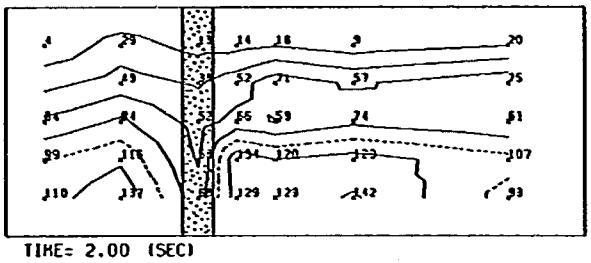


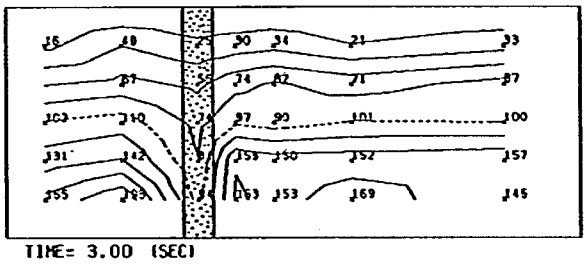
付図－１・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－２）

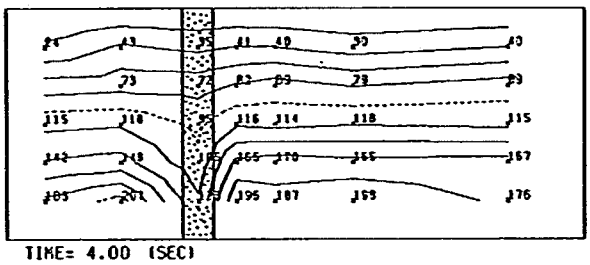


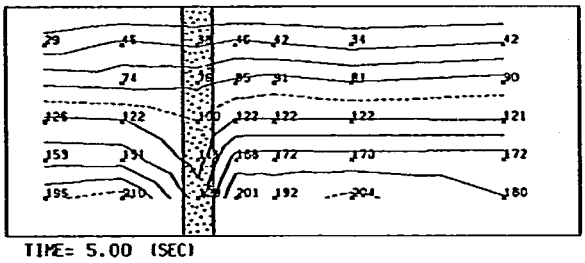
付図－１・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－２）

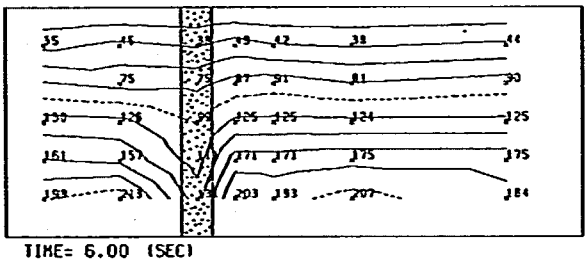


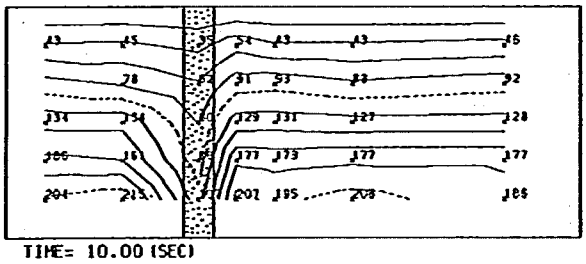


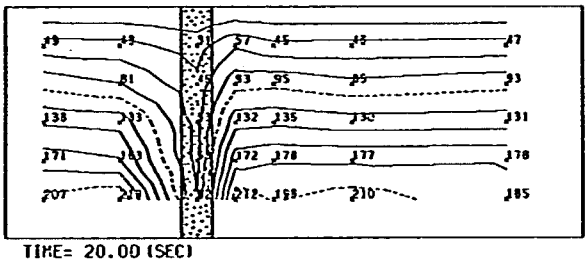


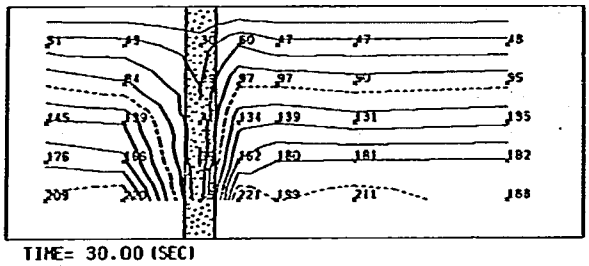


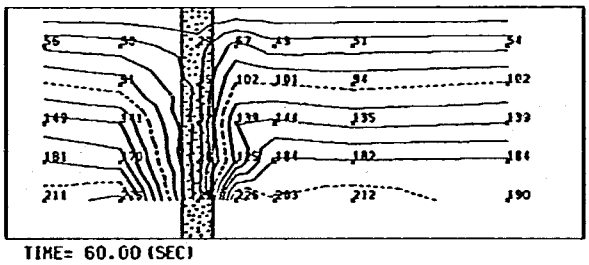




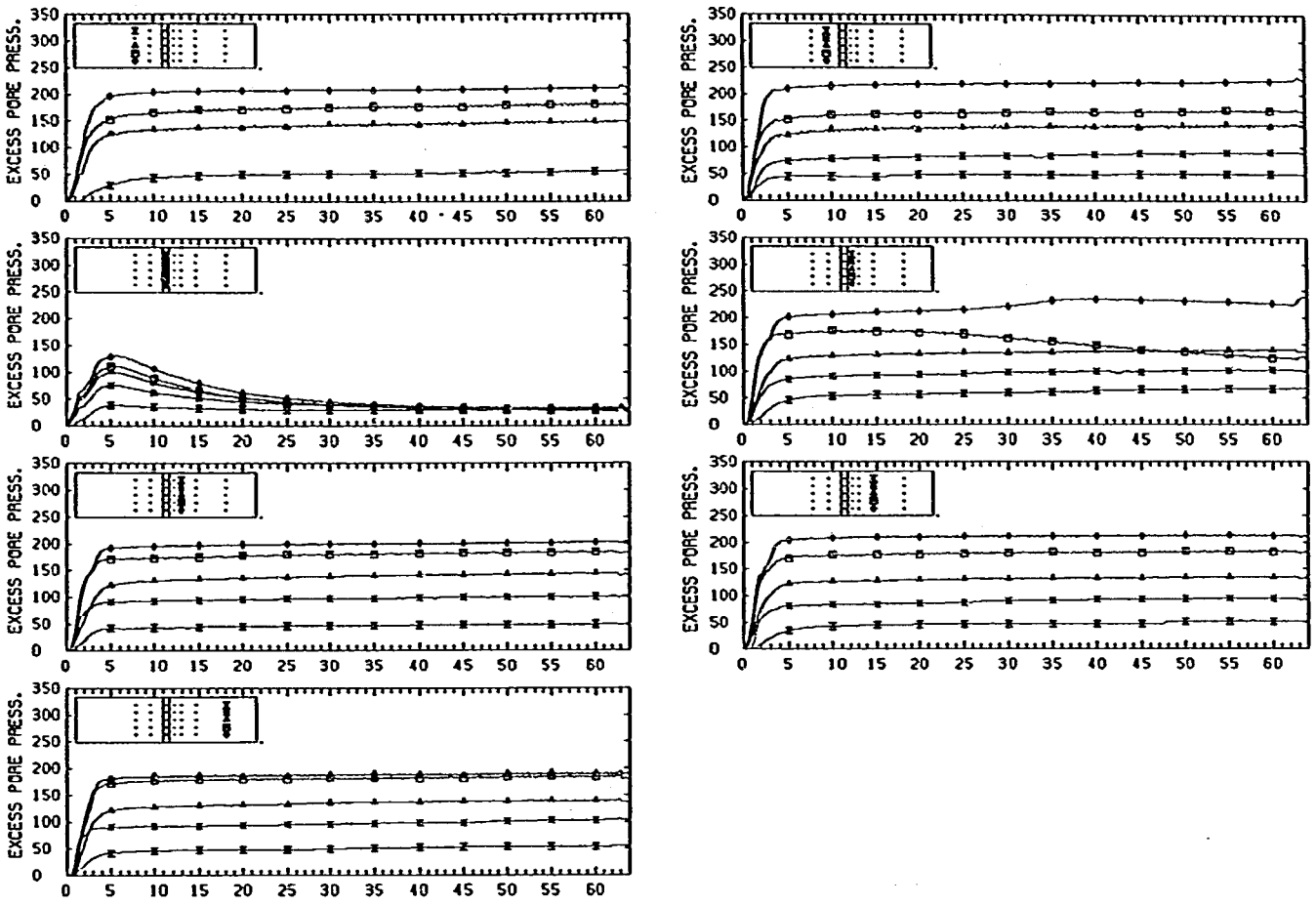




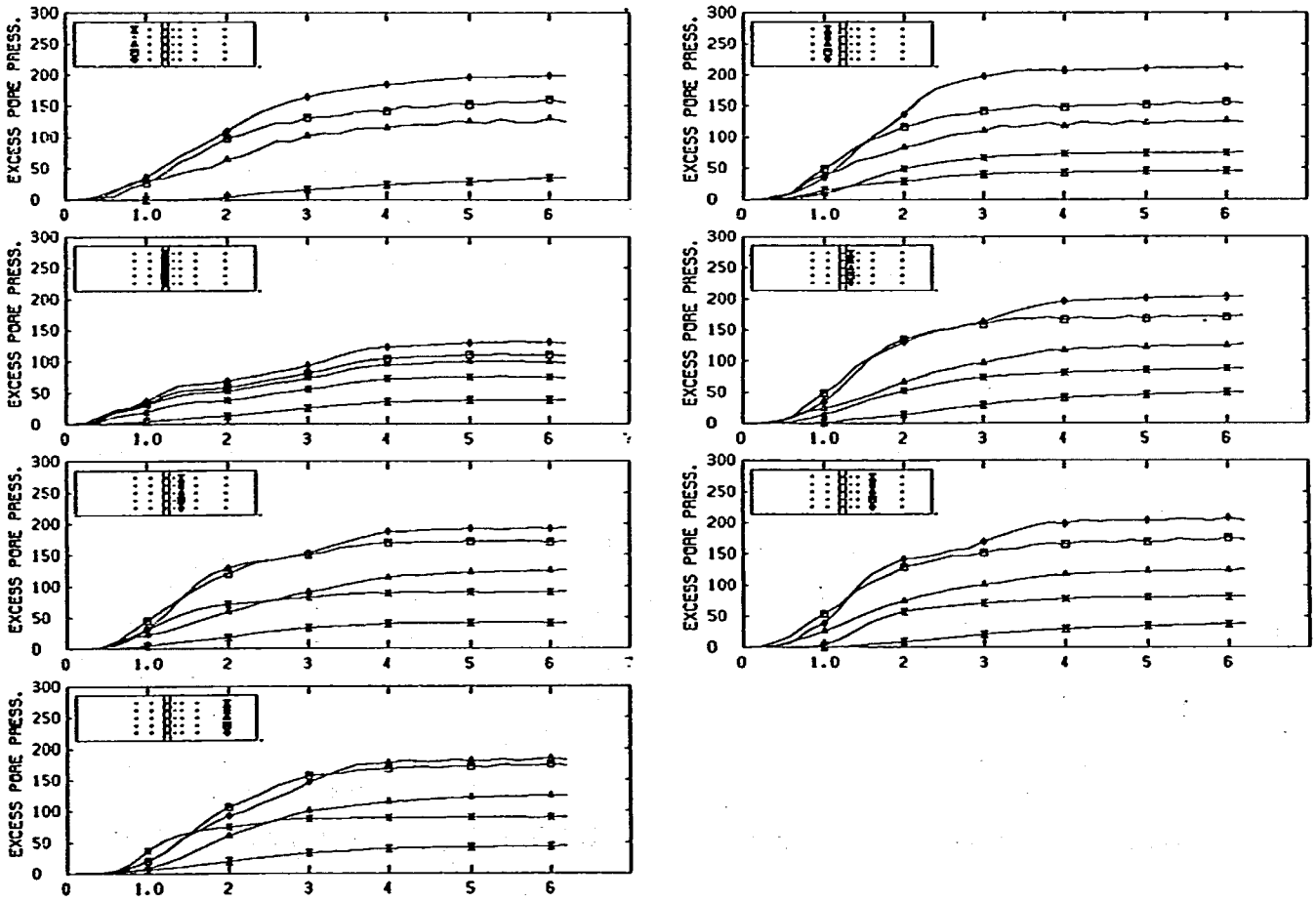




付図－１・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－２）

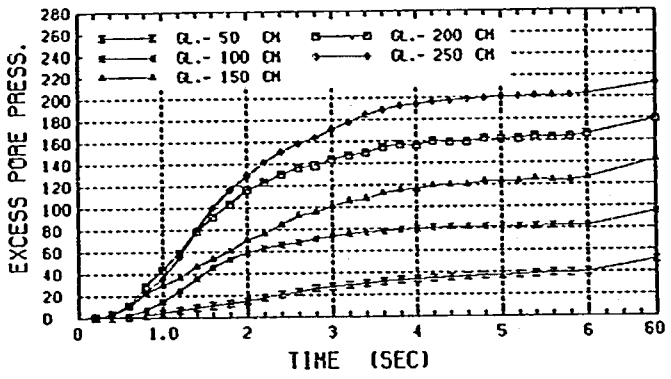


（ａ）全時間領域

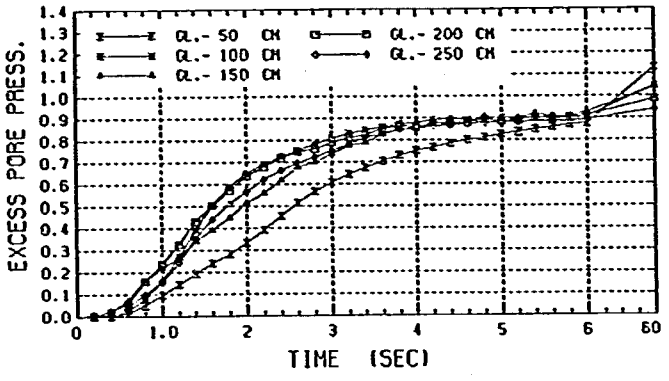


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

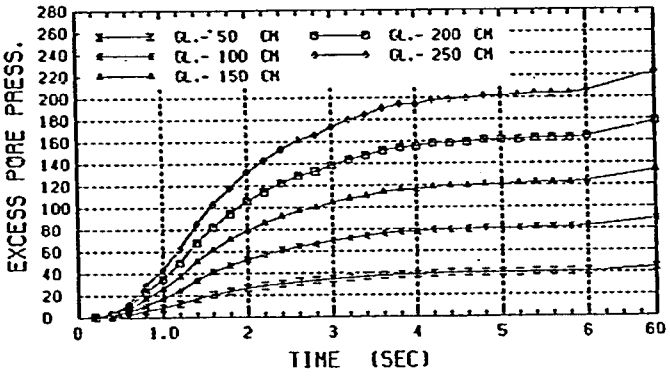
付図－１・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－２）



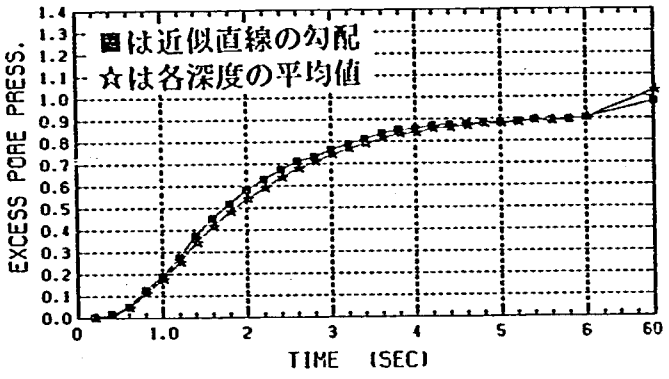
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



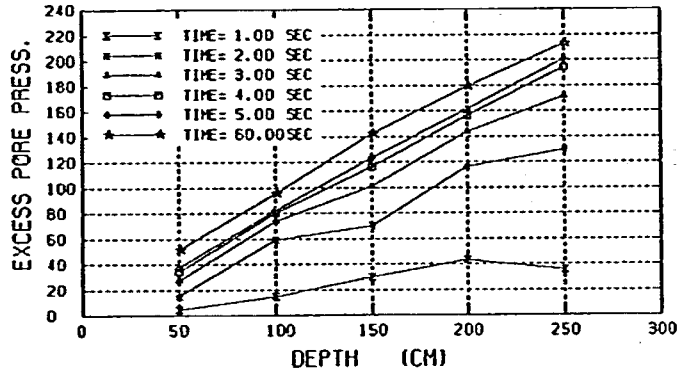
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



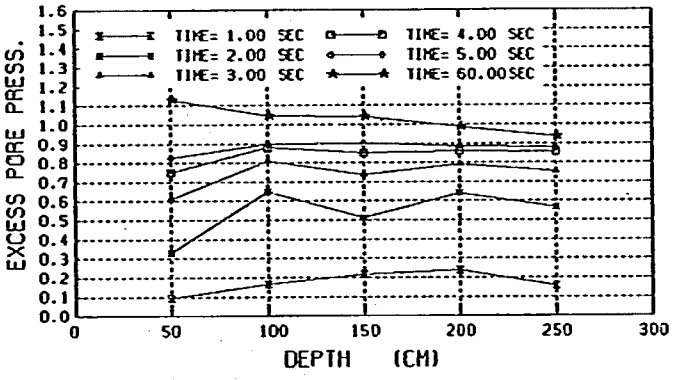
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



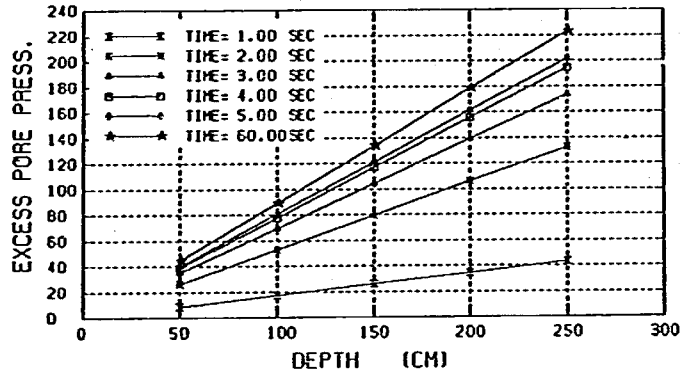
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



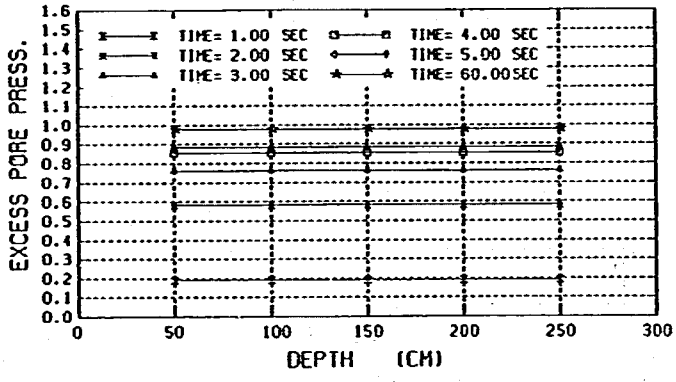
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

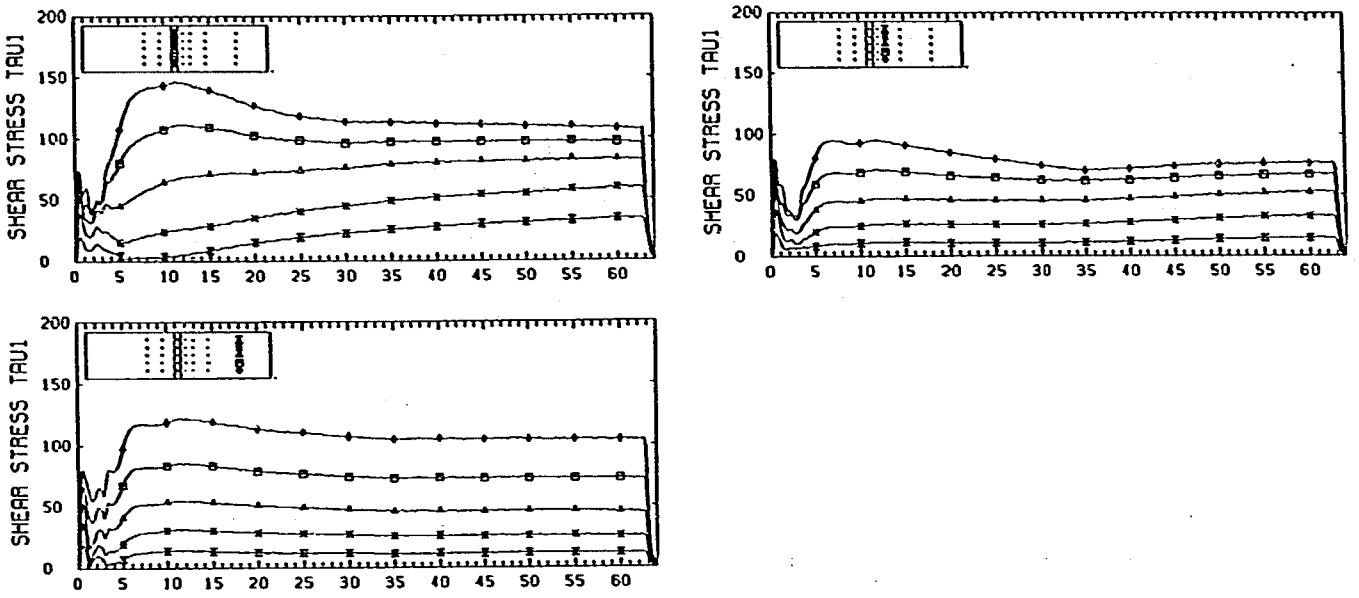


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

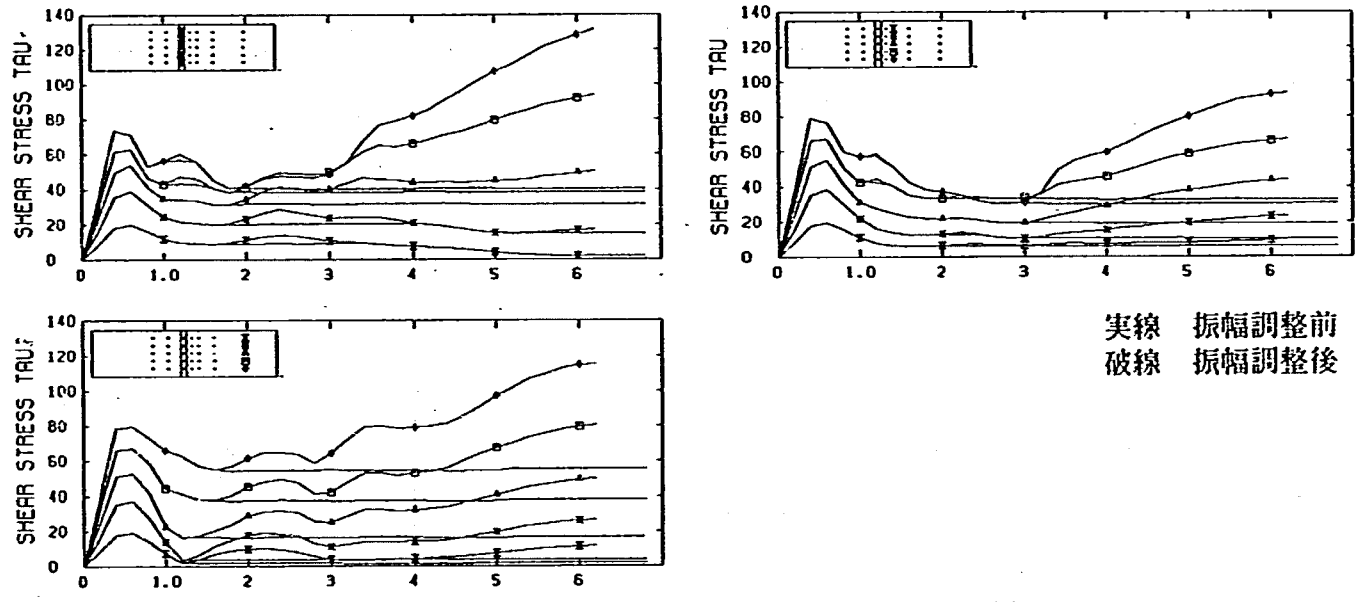


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

付図－１・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－２）

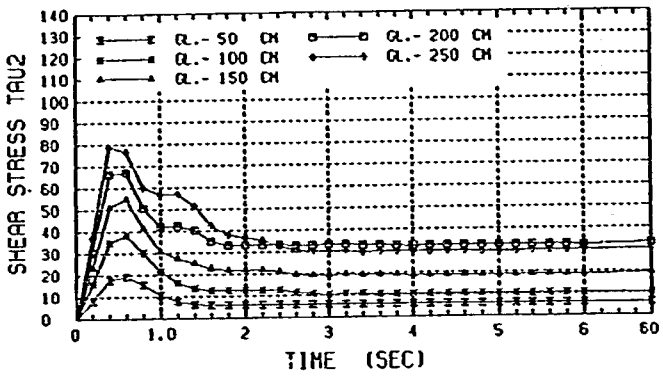


（ａ）全時間領域

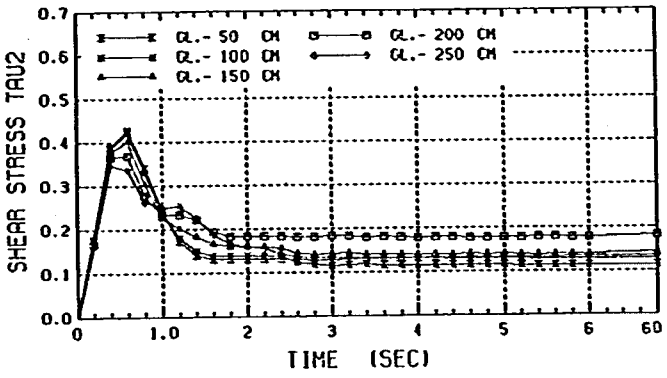


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

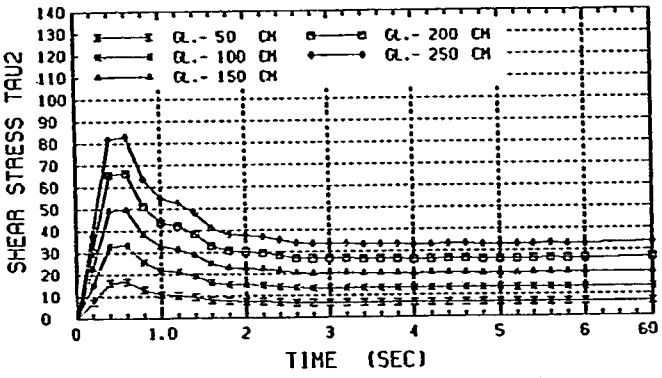
付図－１・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－２）



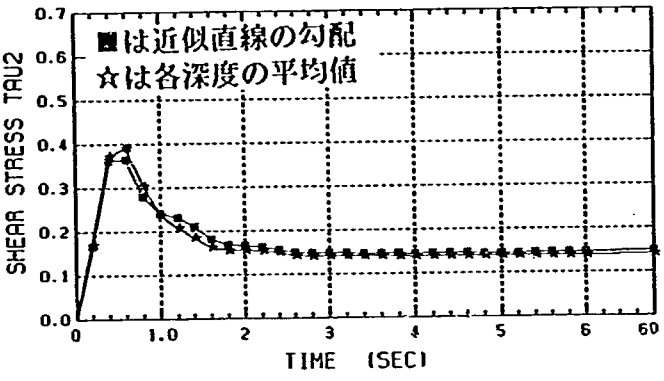
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



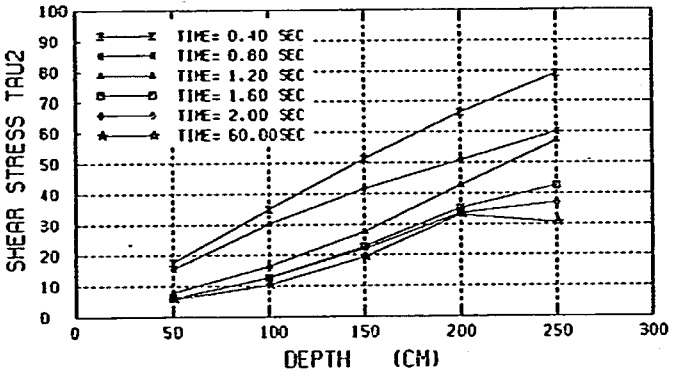
（ｂ）同左のせん断応力比



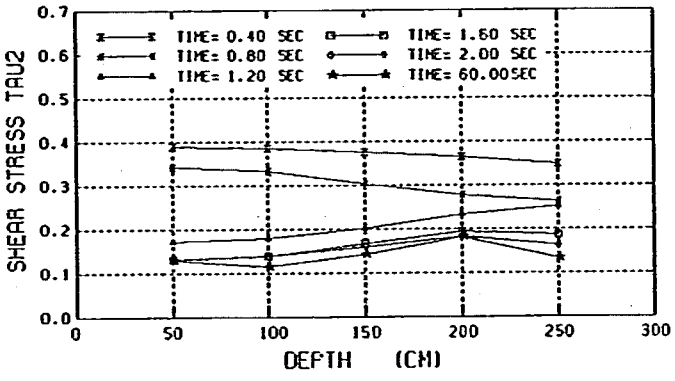
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



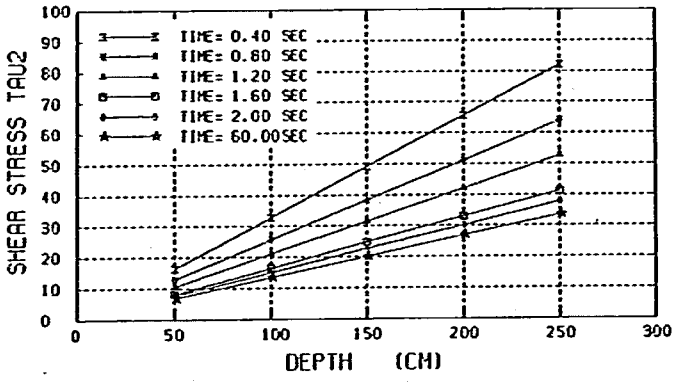
（ｄ）同左のせん断応力比



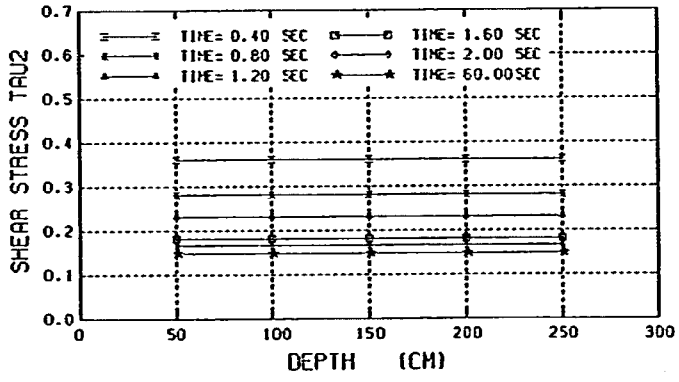
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

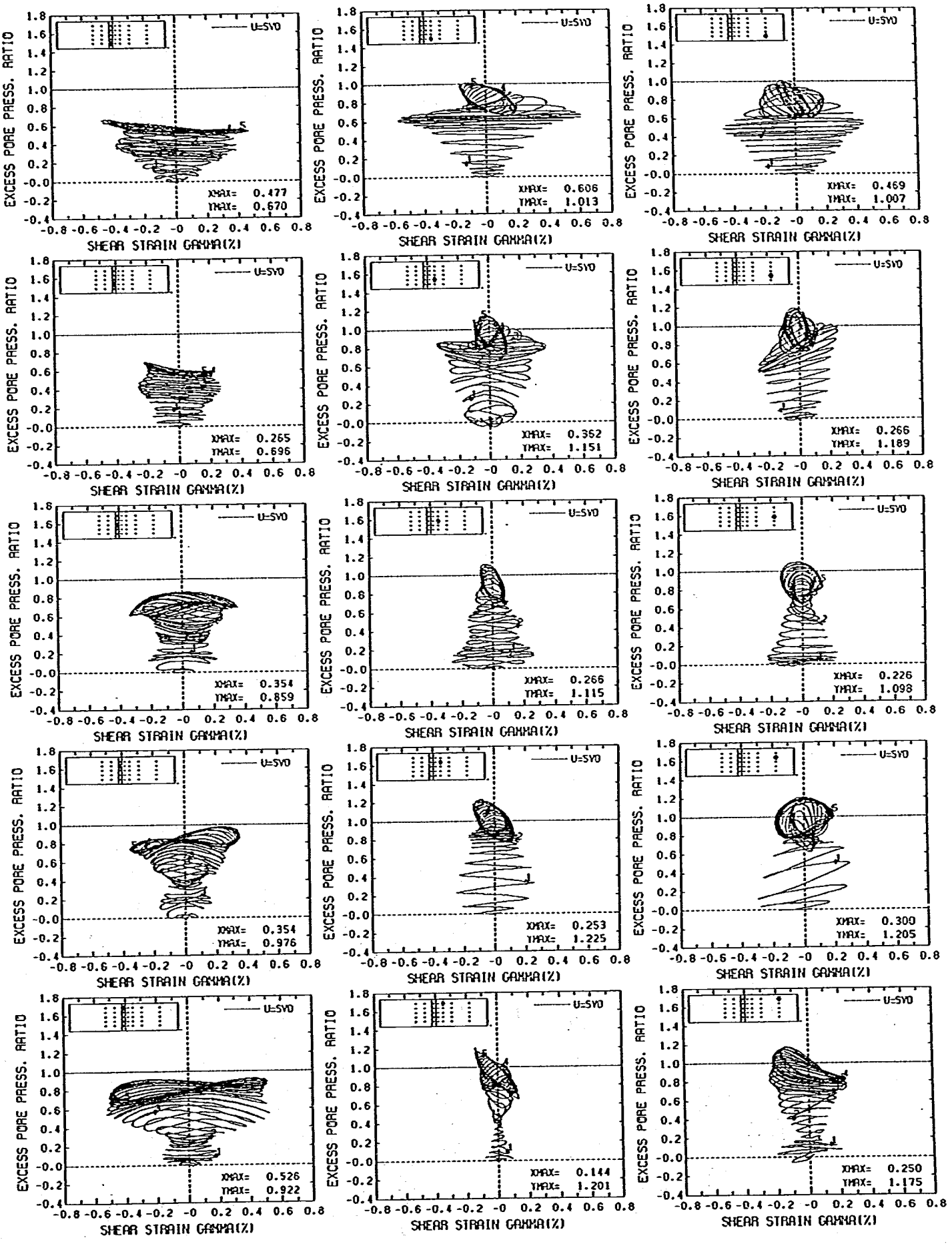


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

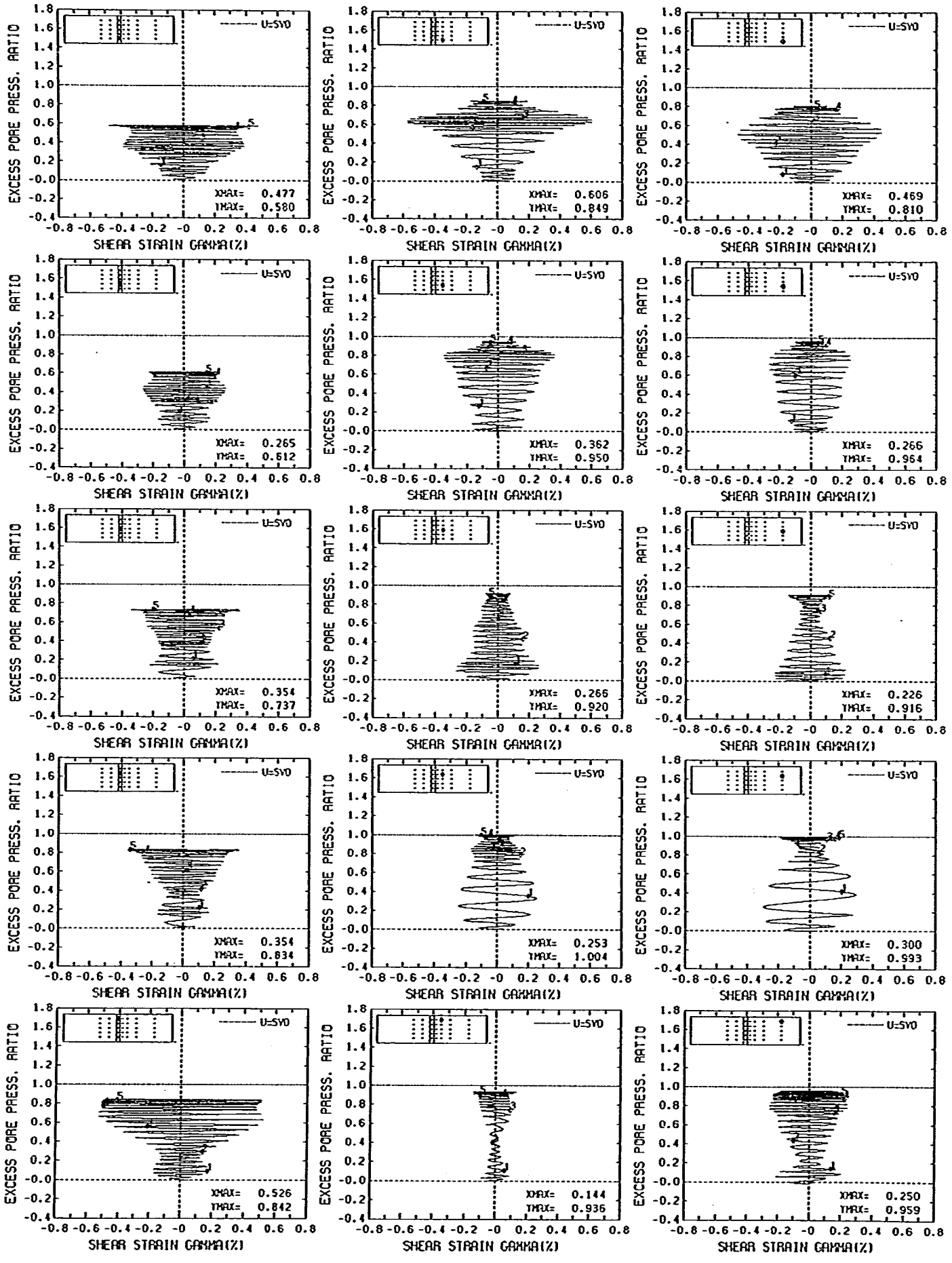


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

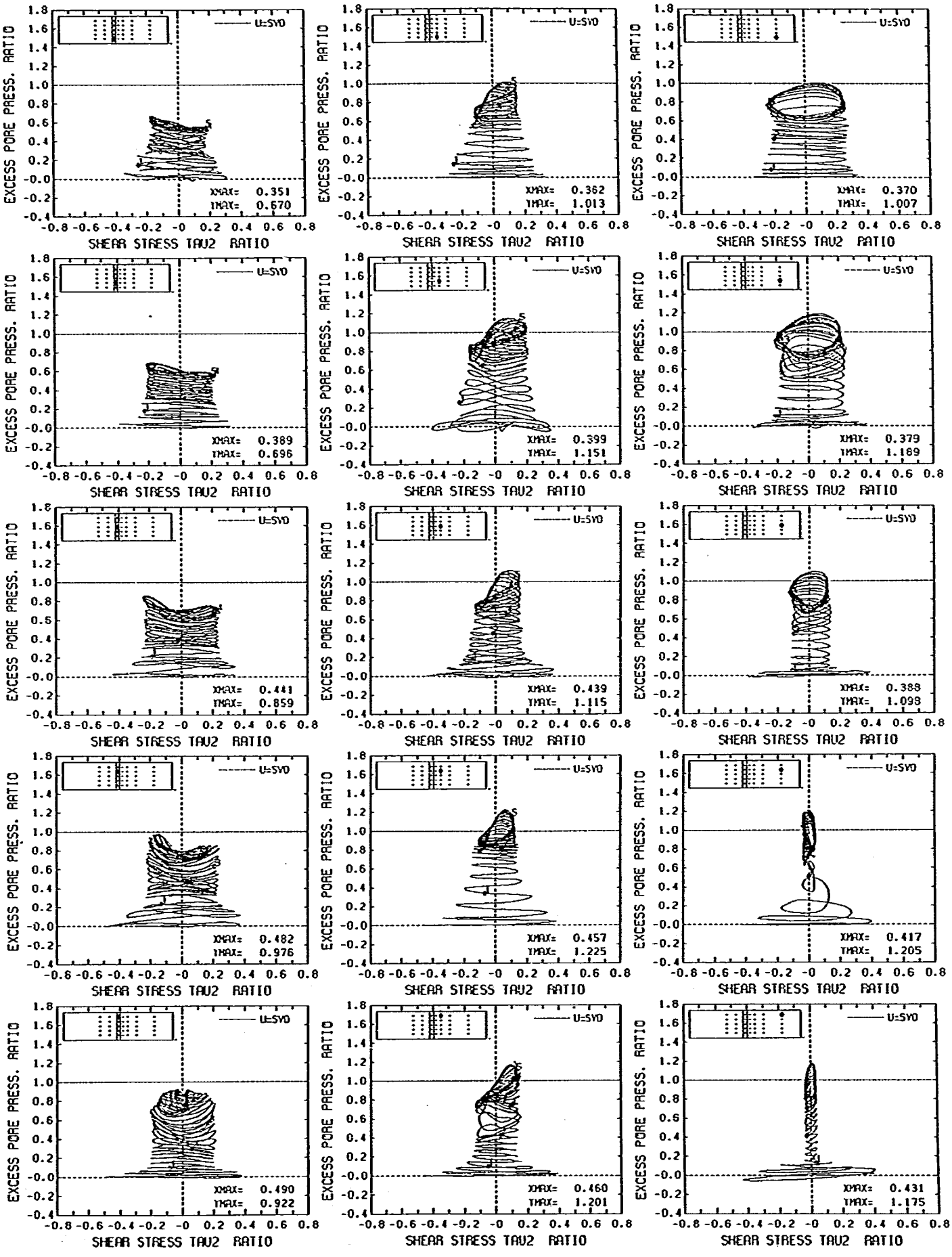
付図－１・13　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－２）



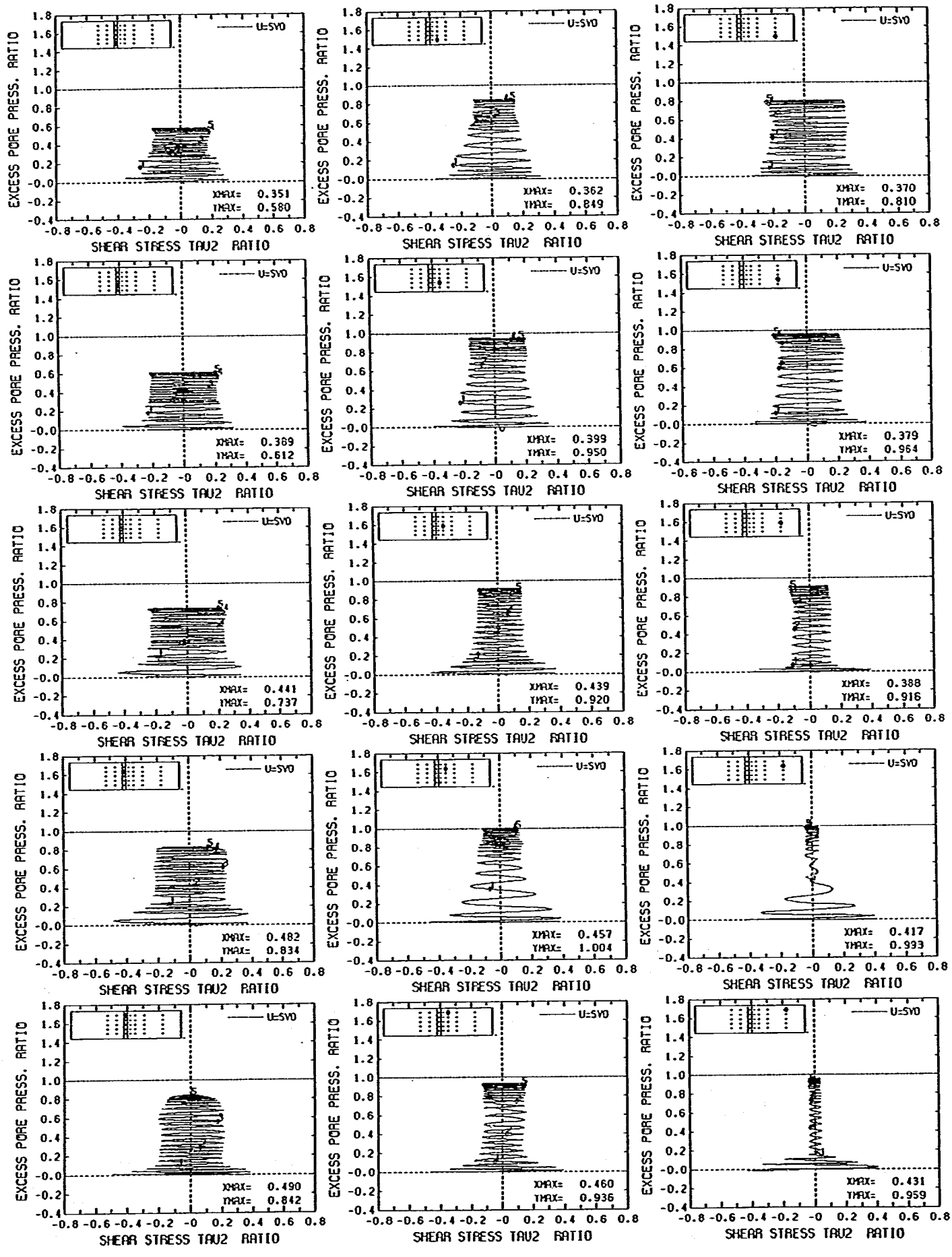
付図－1・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－2）



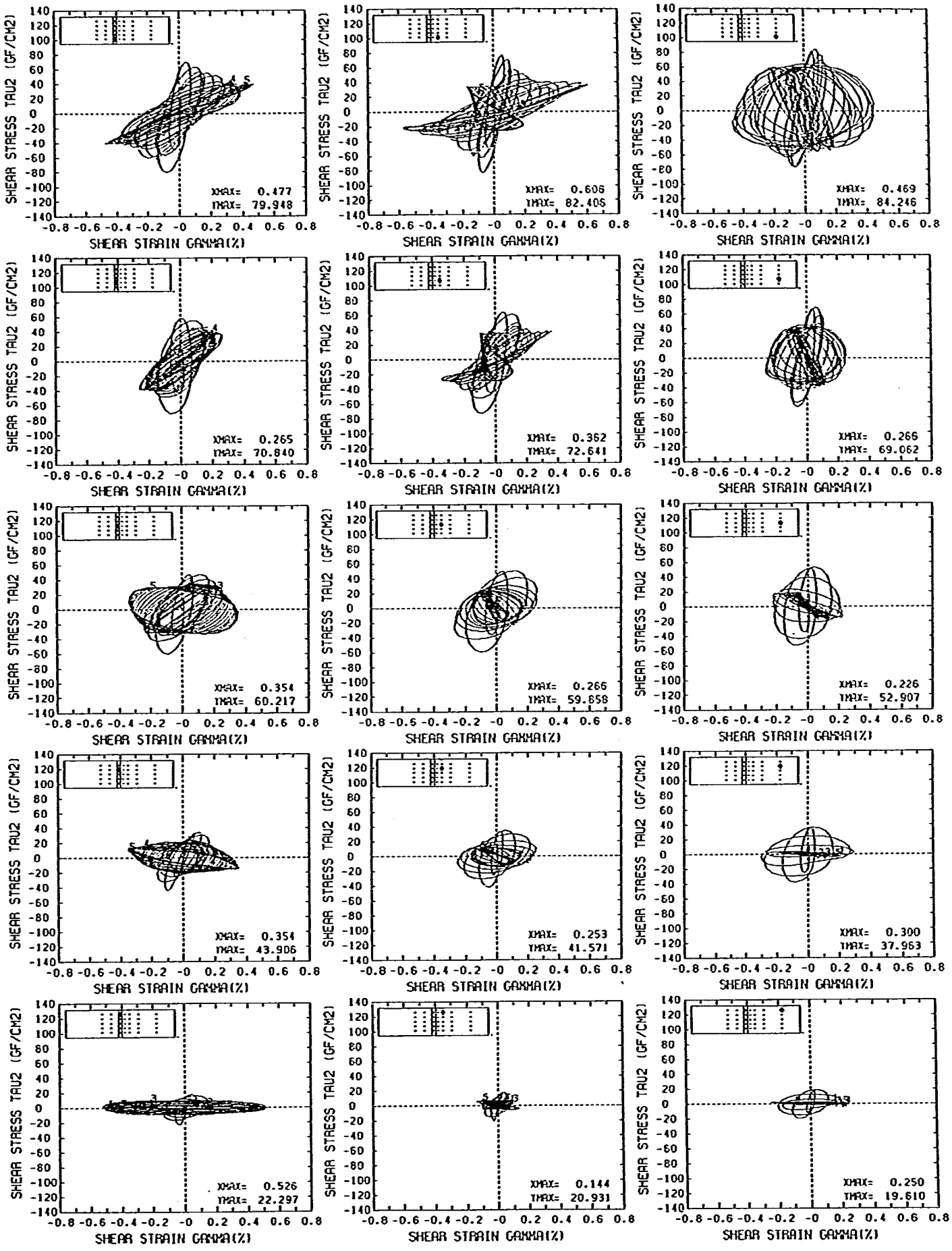
付図－１・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－２）



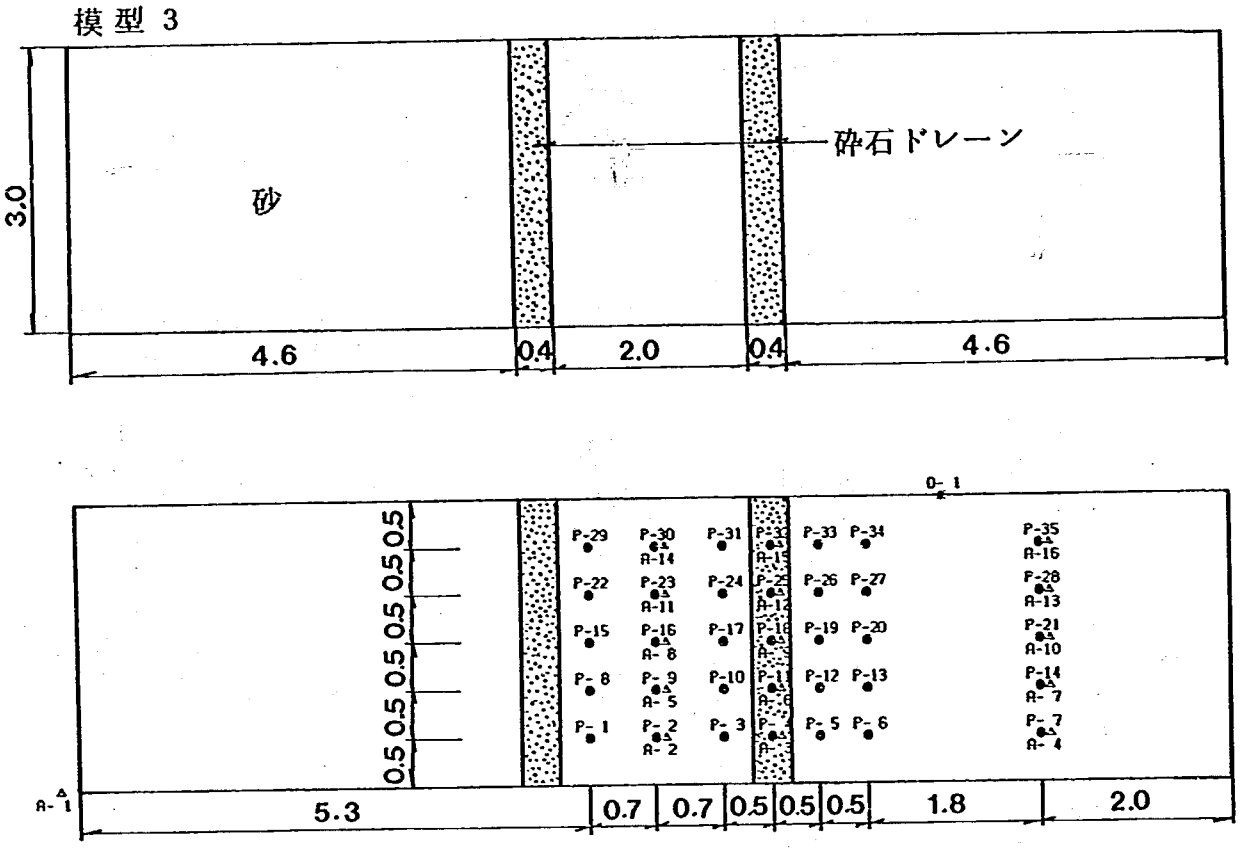
付図－１・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－２）



付図－１・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－２）



付図－１・18　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－２）

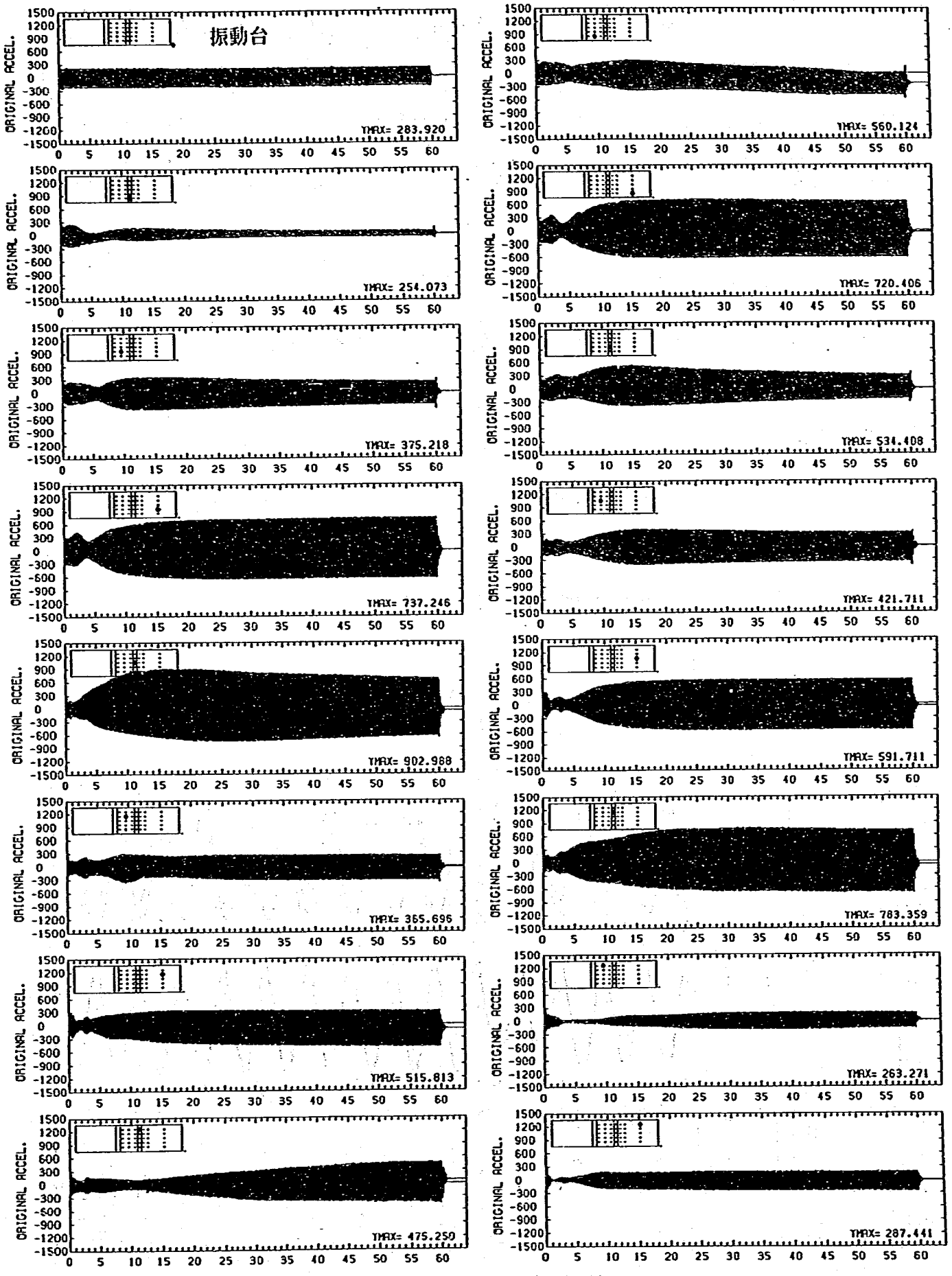


● P－ 間隙水圧計 （３５）
△ A－ 加速度計 （１６）
＊ D－ 変 位 計 （１）

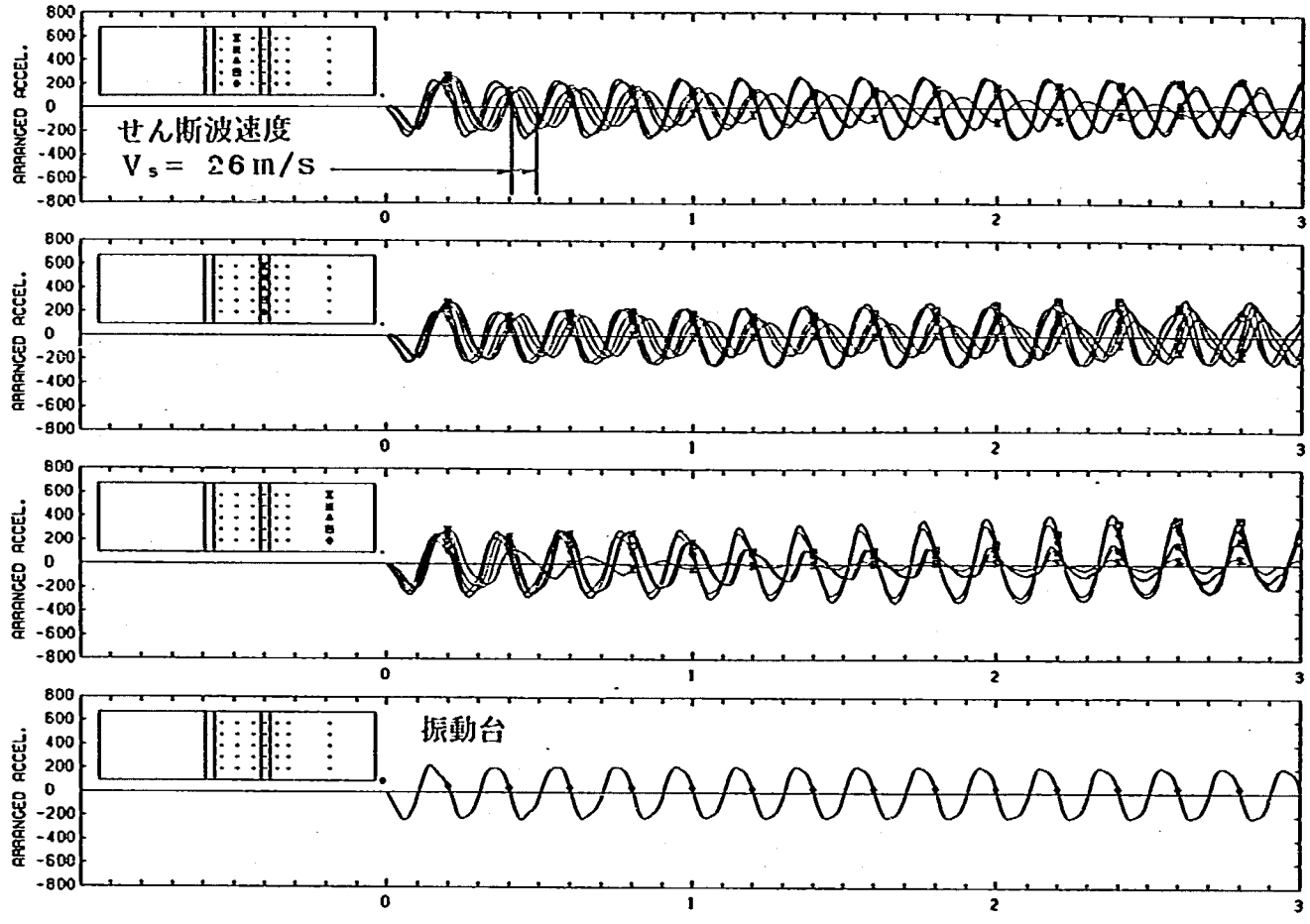
A－１は振動台加速度

P－１８，P－２２は欠測

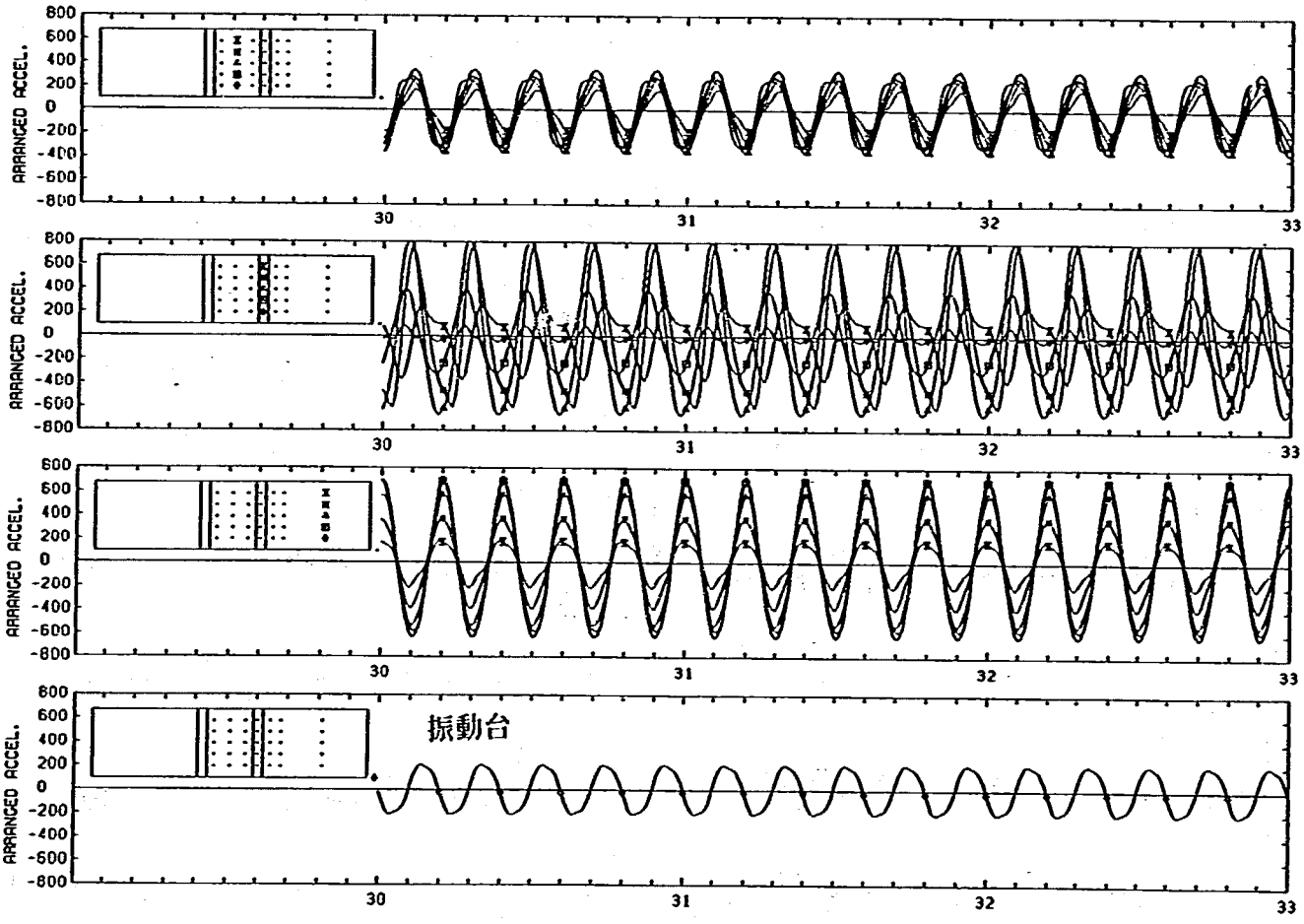
付図－２・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－３）



付図－２・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－３）

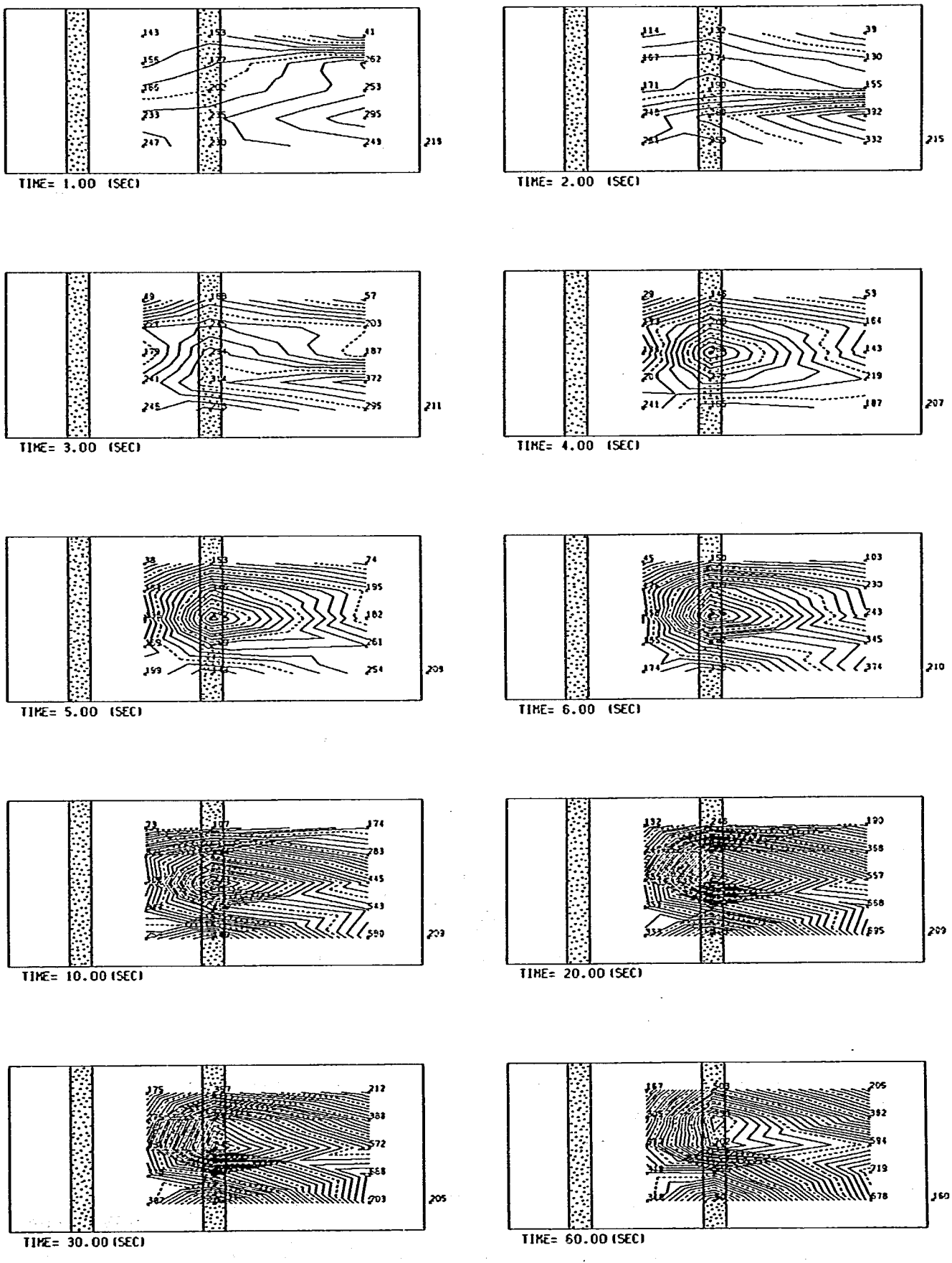


（ａ）加振開始直後（０～３秒）

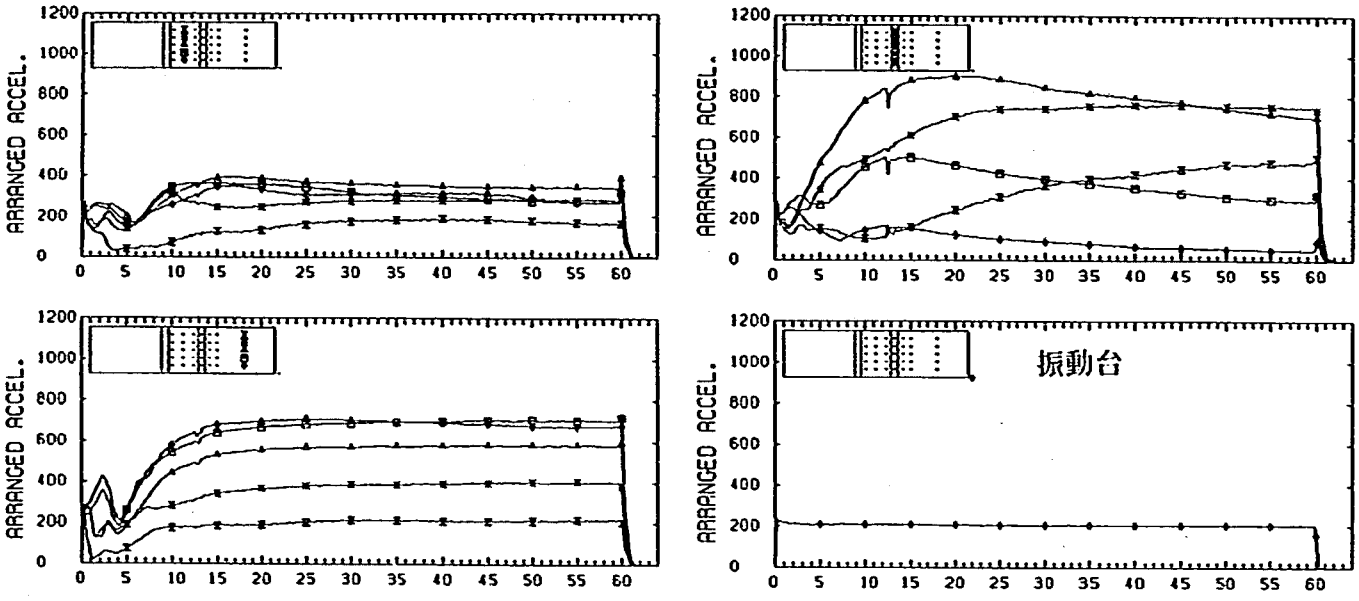


（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

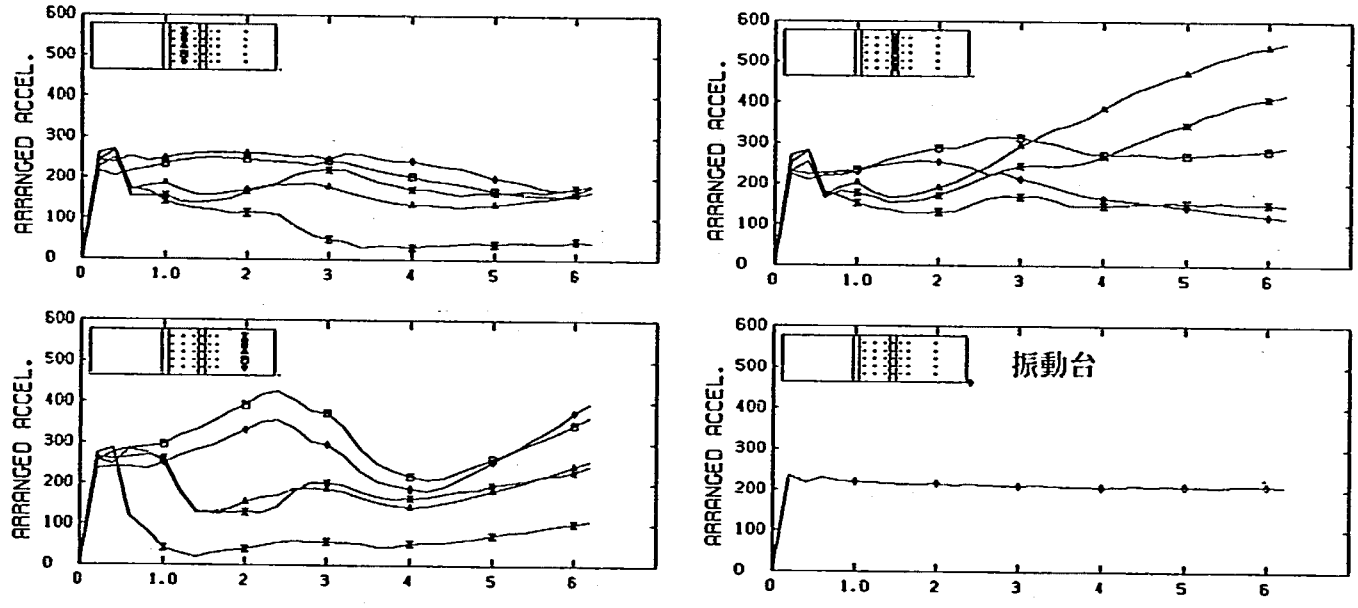
付図－２・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－３）



付図－２・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal、模型－３）

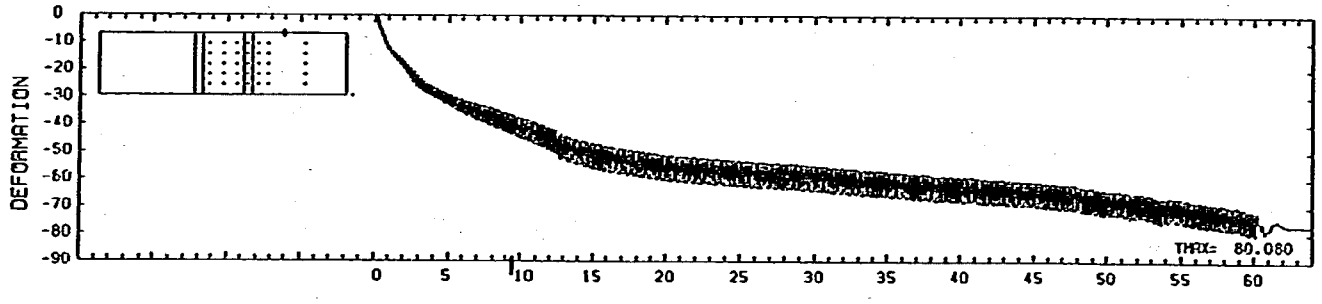


（ａ）全時間領域

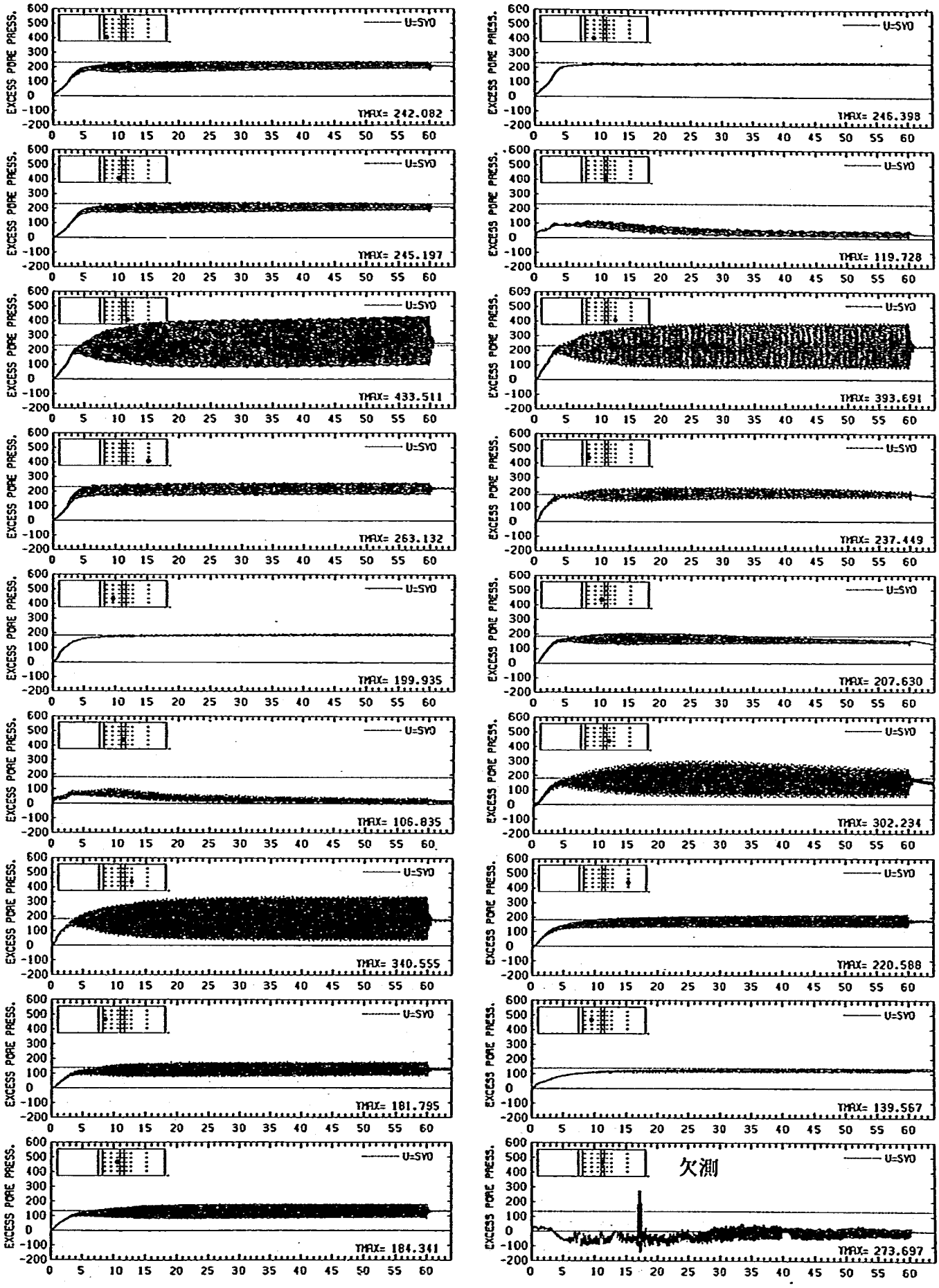


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

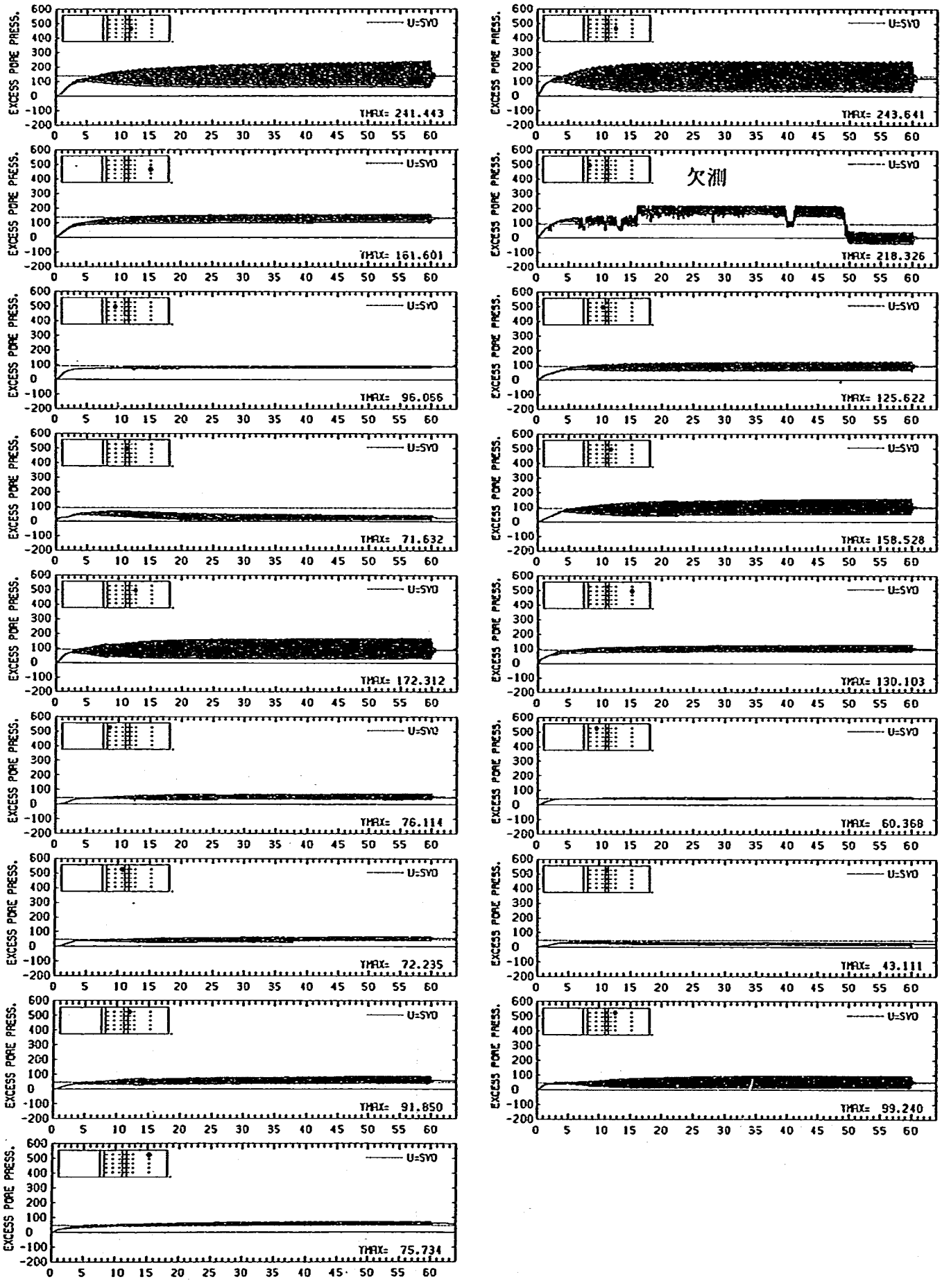
付図－２・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－３）



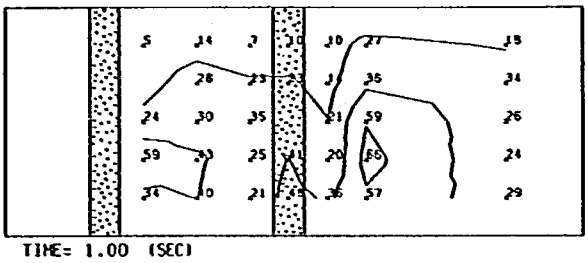
付図－２・６　変位計による地表面沈下の測定結果（単位：㎜、模型－３）

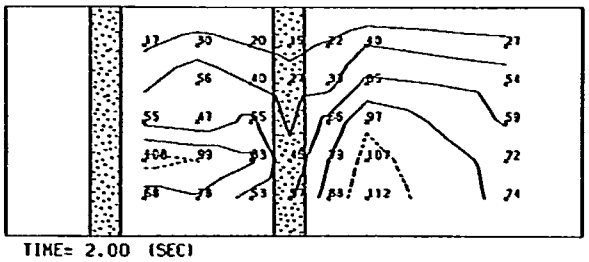


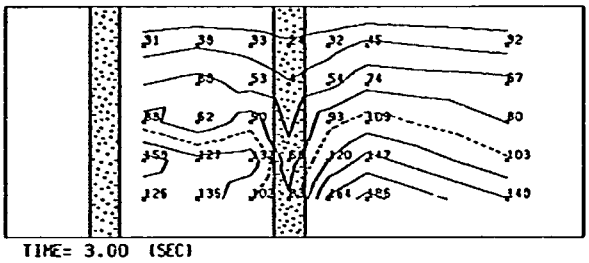
付図－２・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－３）

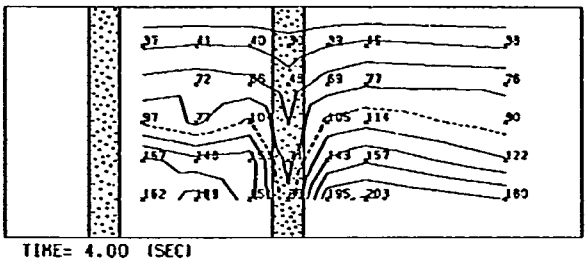


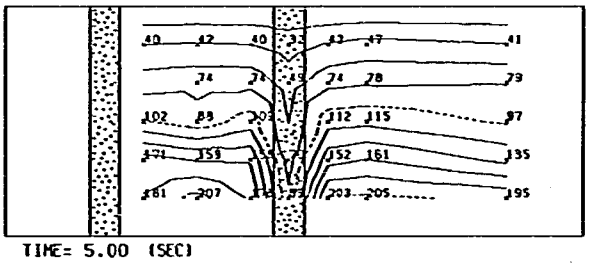
付図－２・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－３）

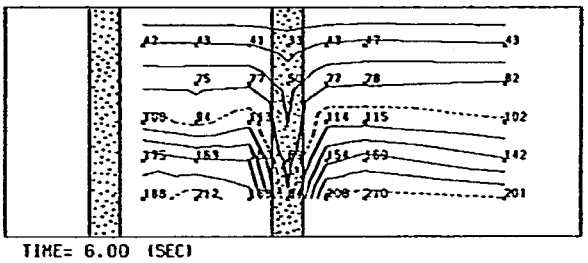


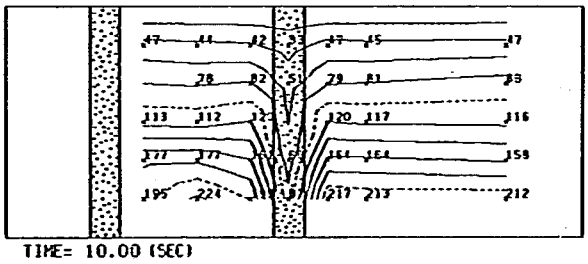


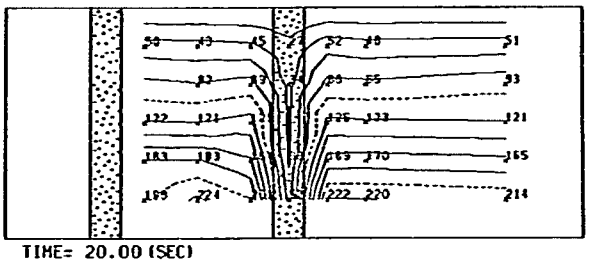


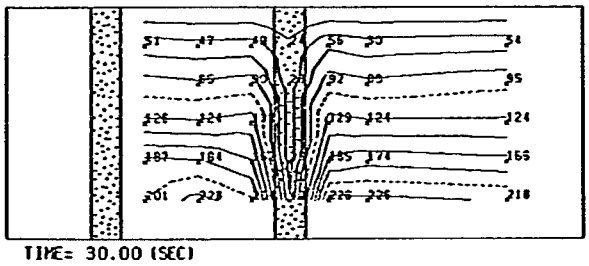


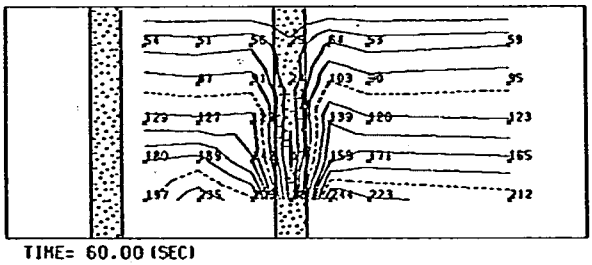




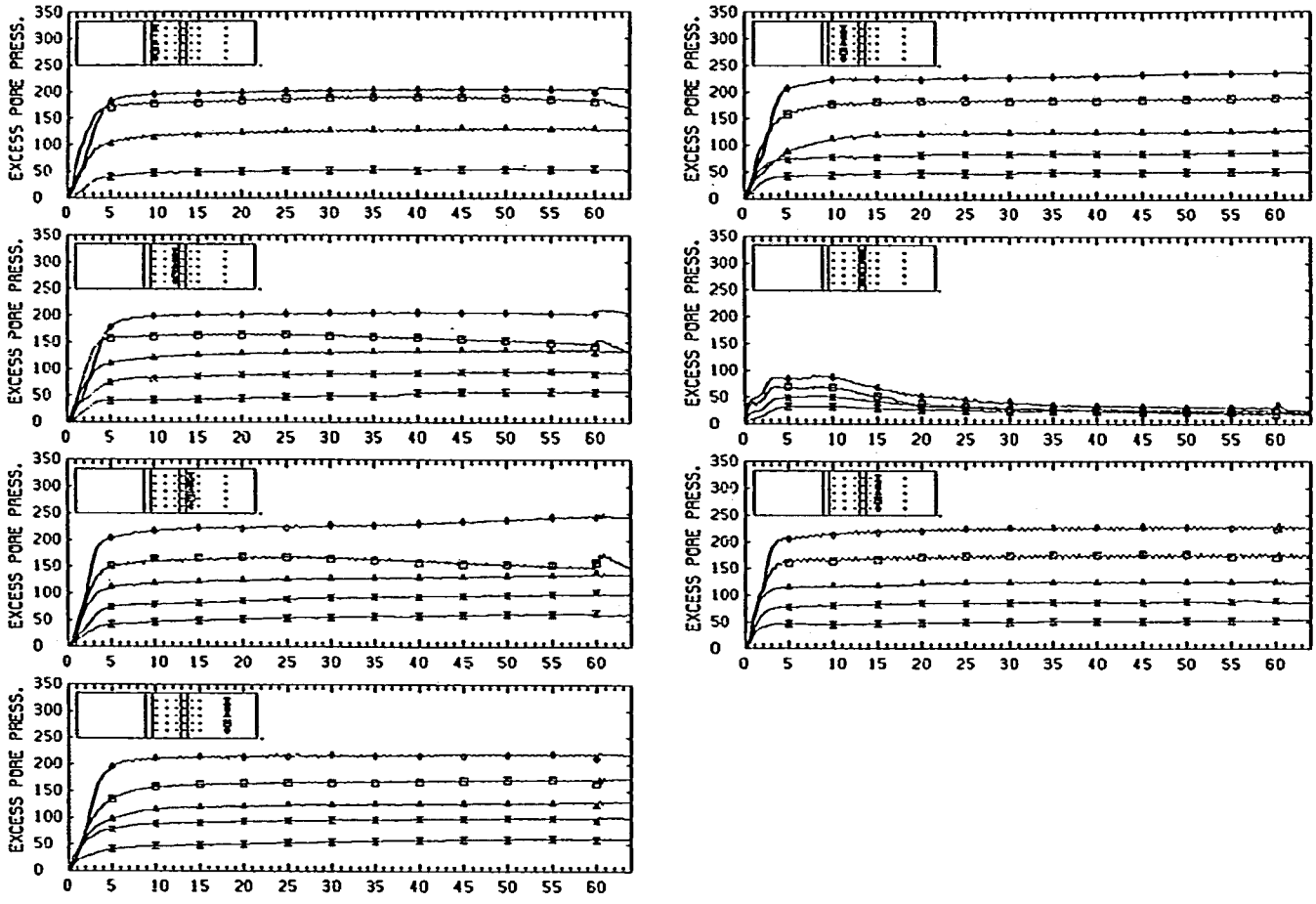




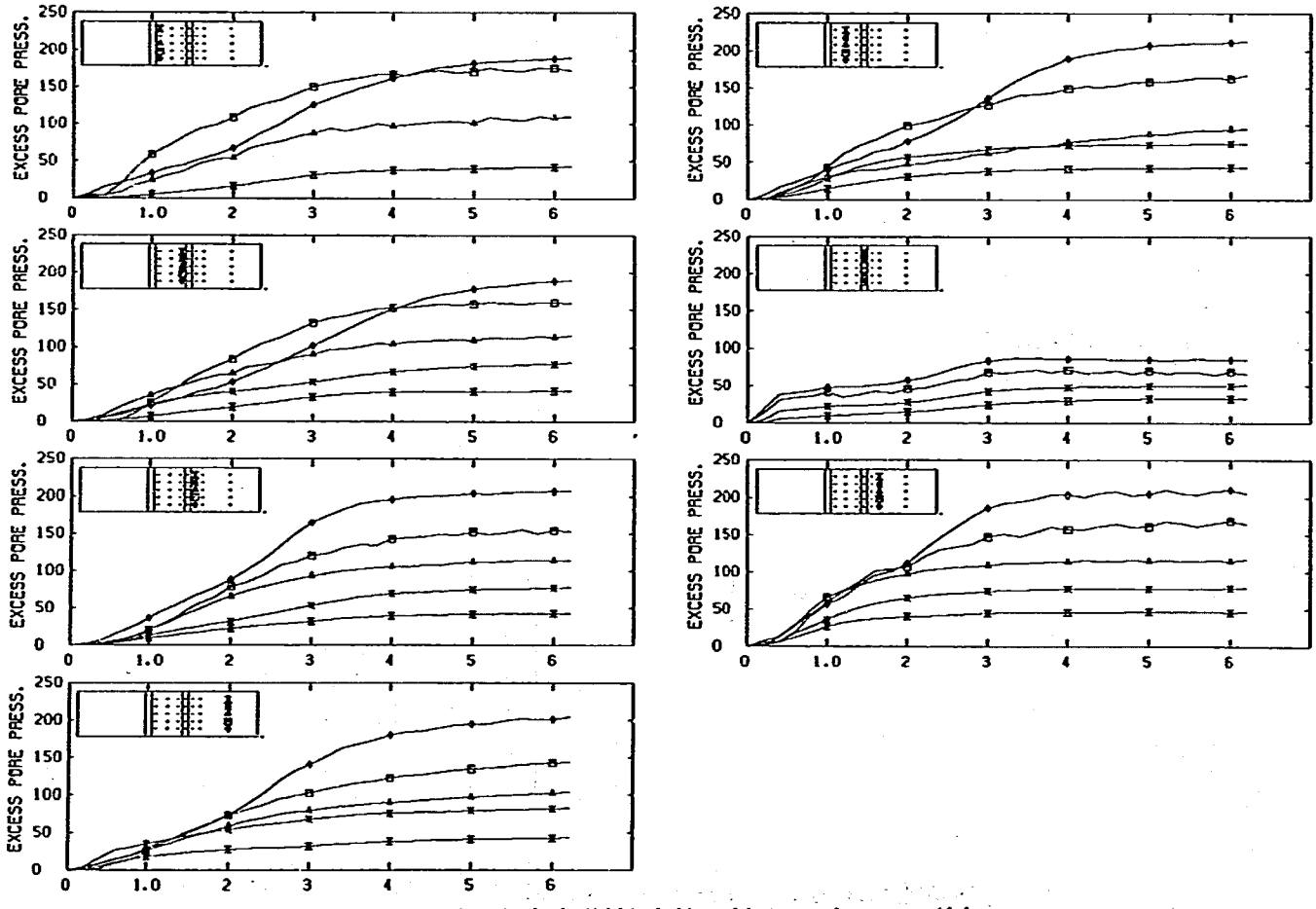




付図－２・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm²、模型－３）

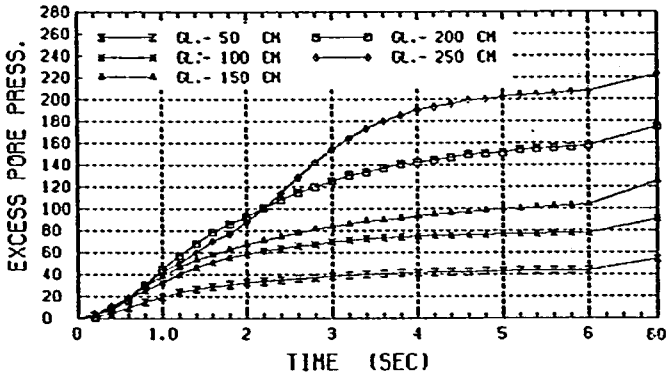


（ａ）全時間領域

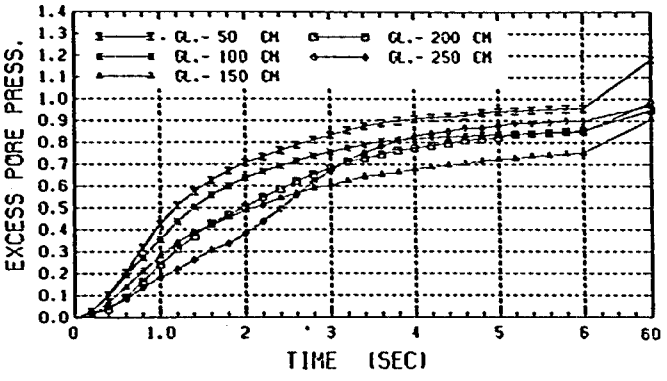


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

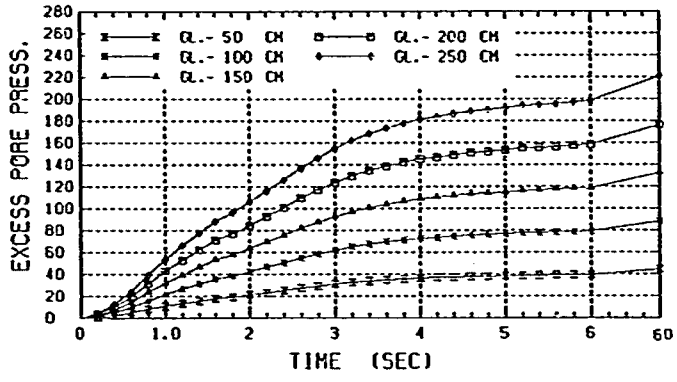
付図－２・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－３）



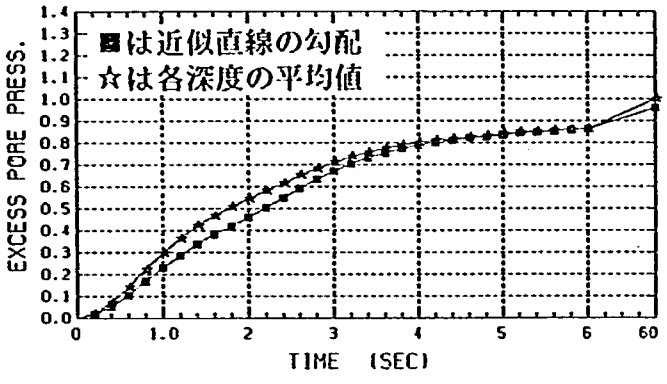
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



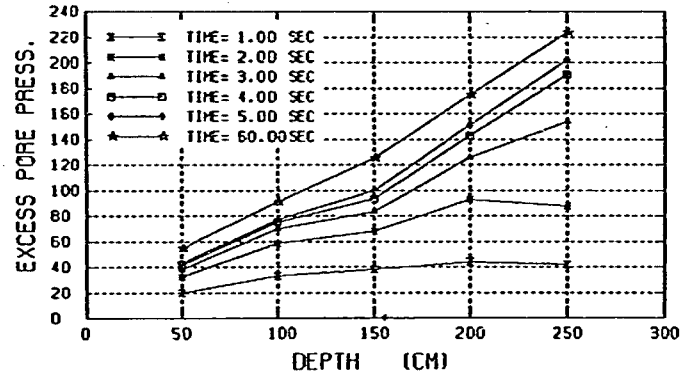
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



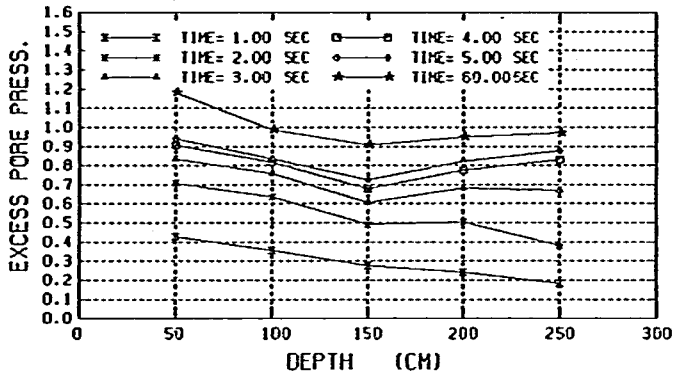
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



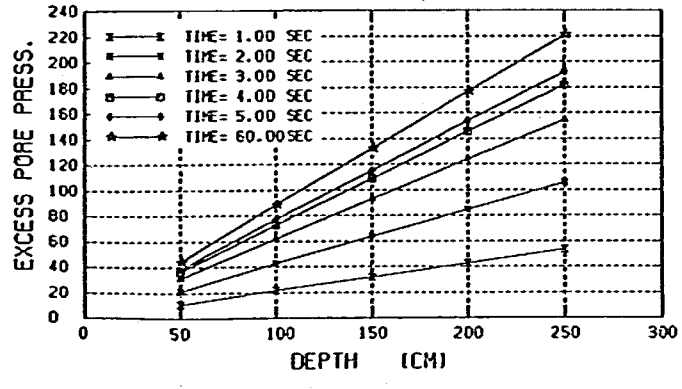
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



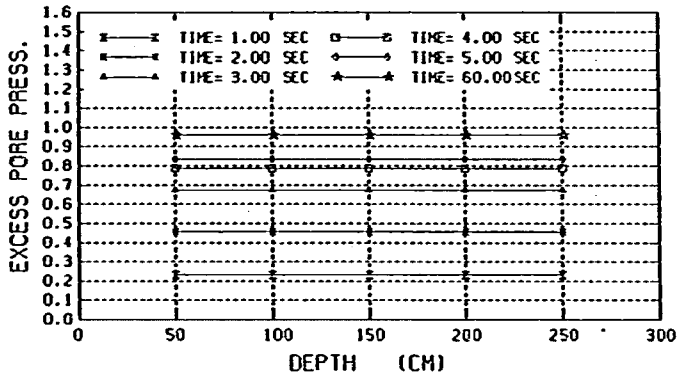
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

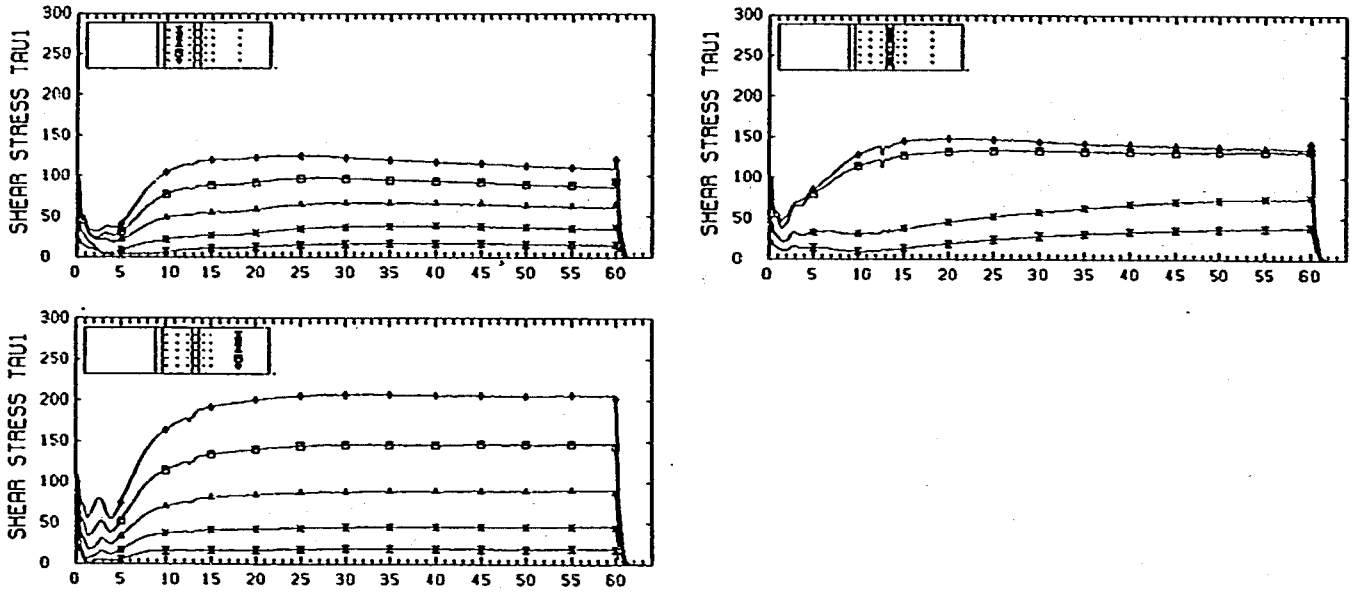


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

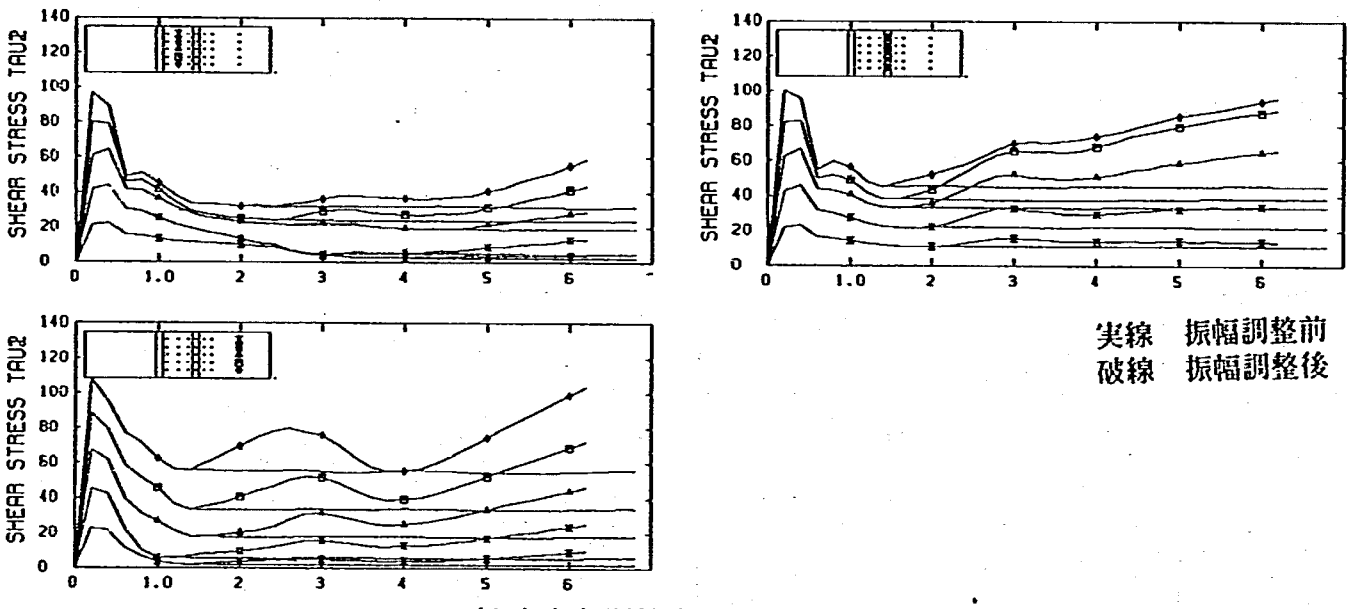


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

付図－２・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－３）

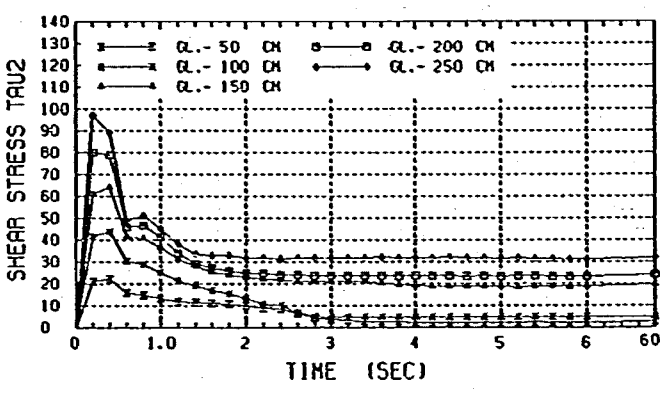


（ａ）全時間領域

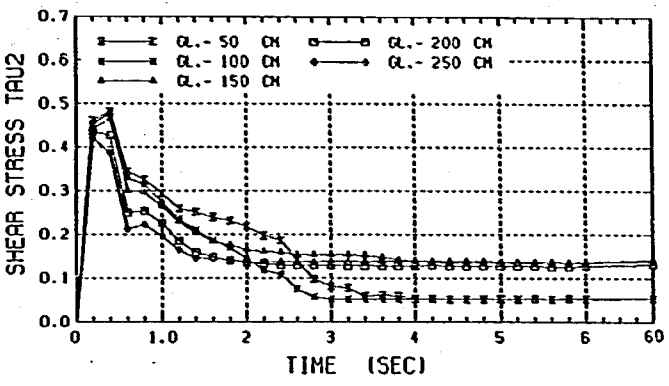


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

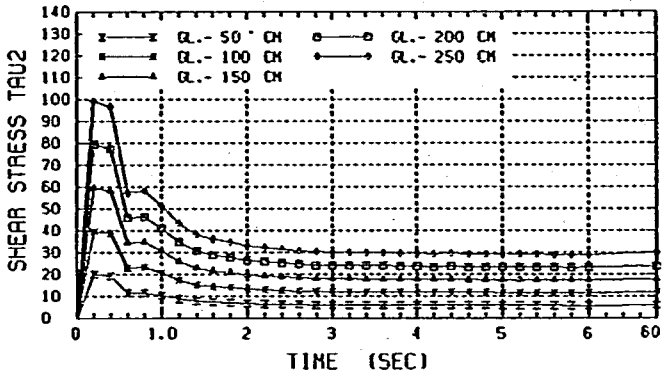
付図－２・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－３）



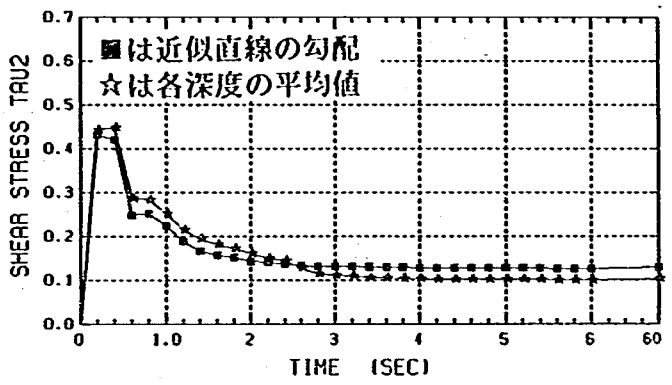
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



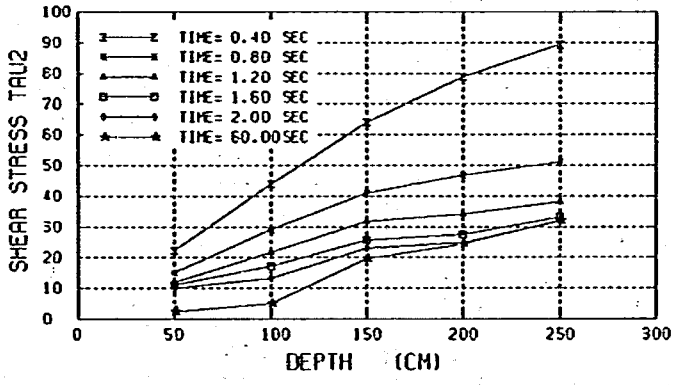
（ｂ）同左のせん断応力比



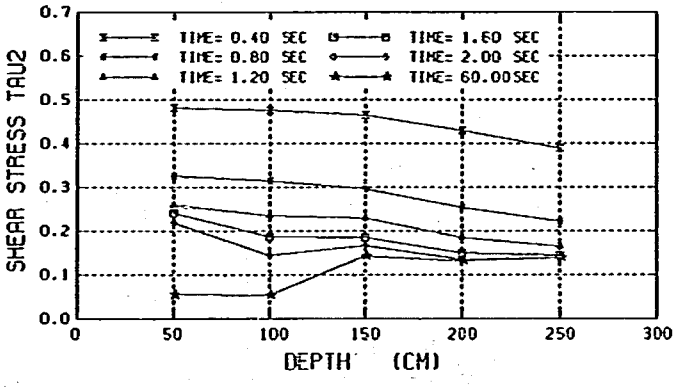
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



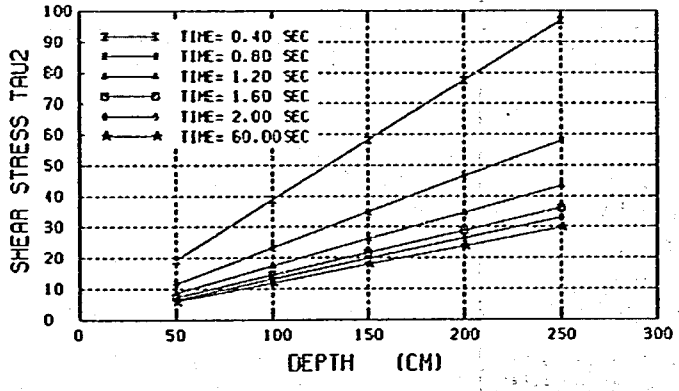
（ｄ）同左のせん断応力比



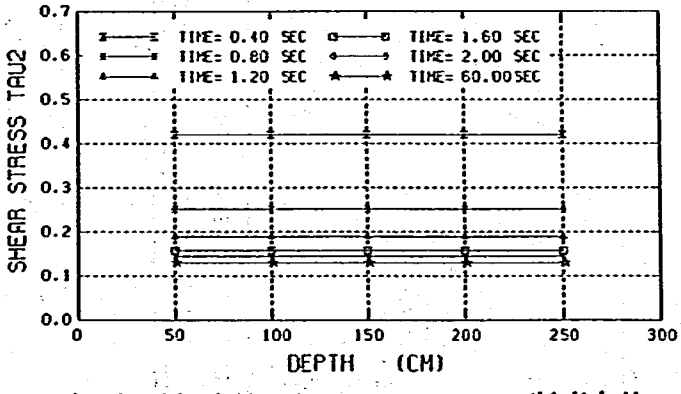
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

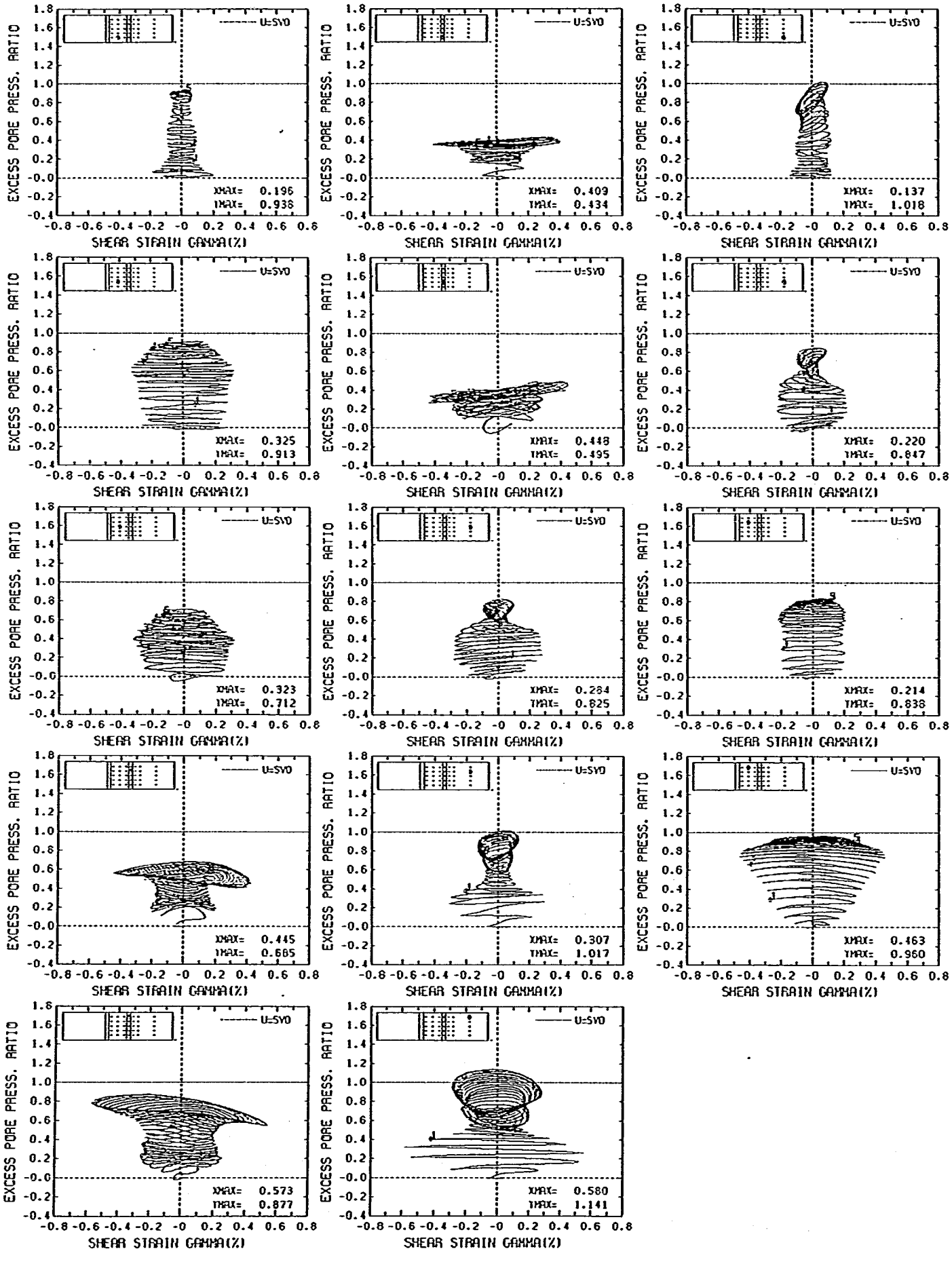


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

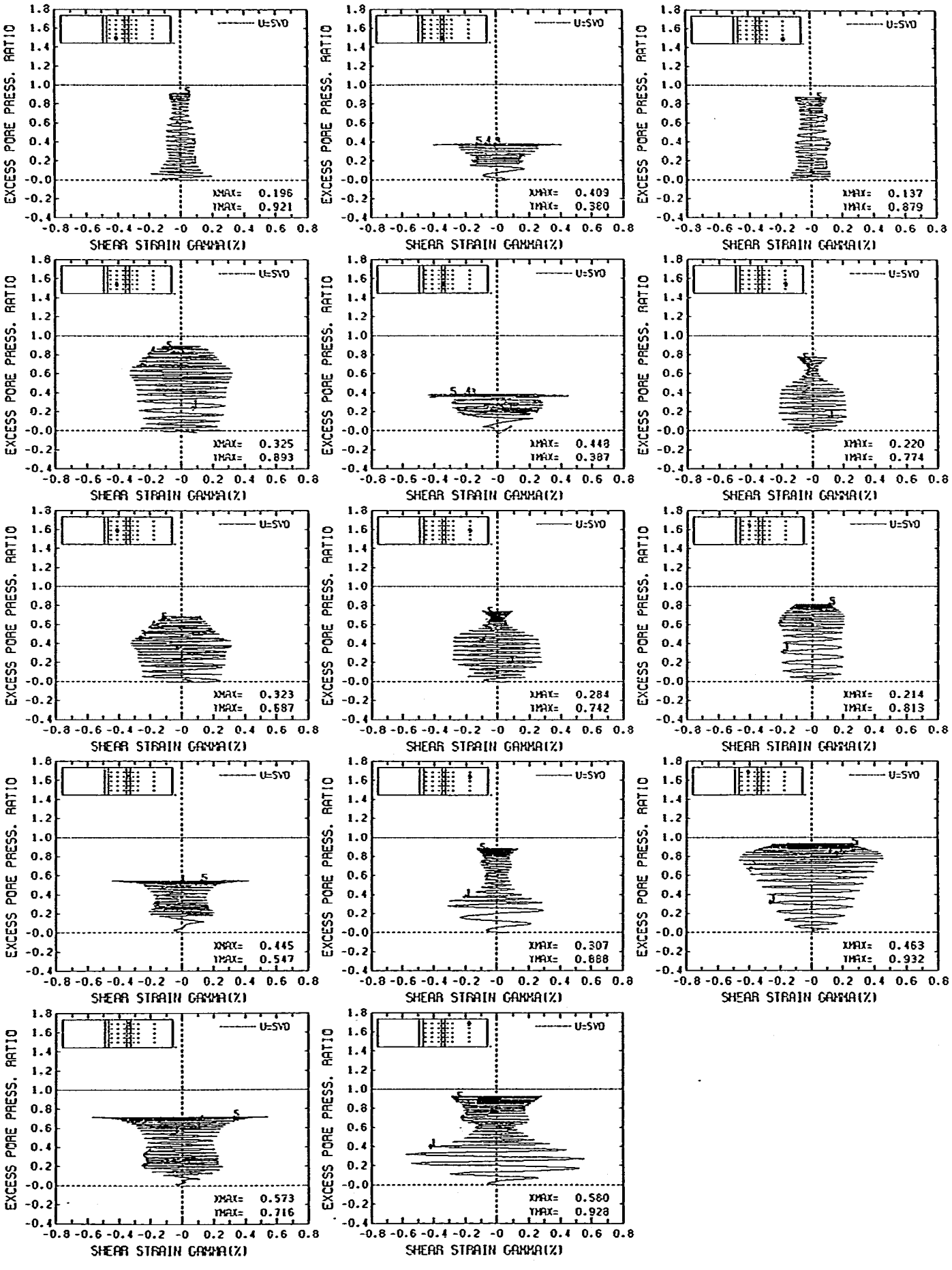


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

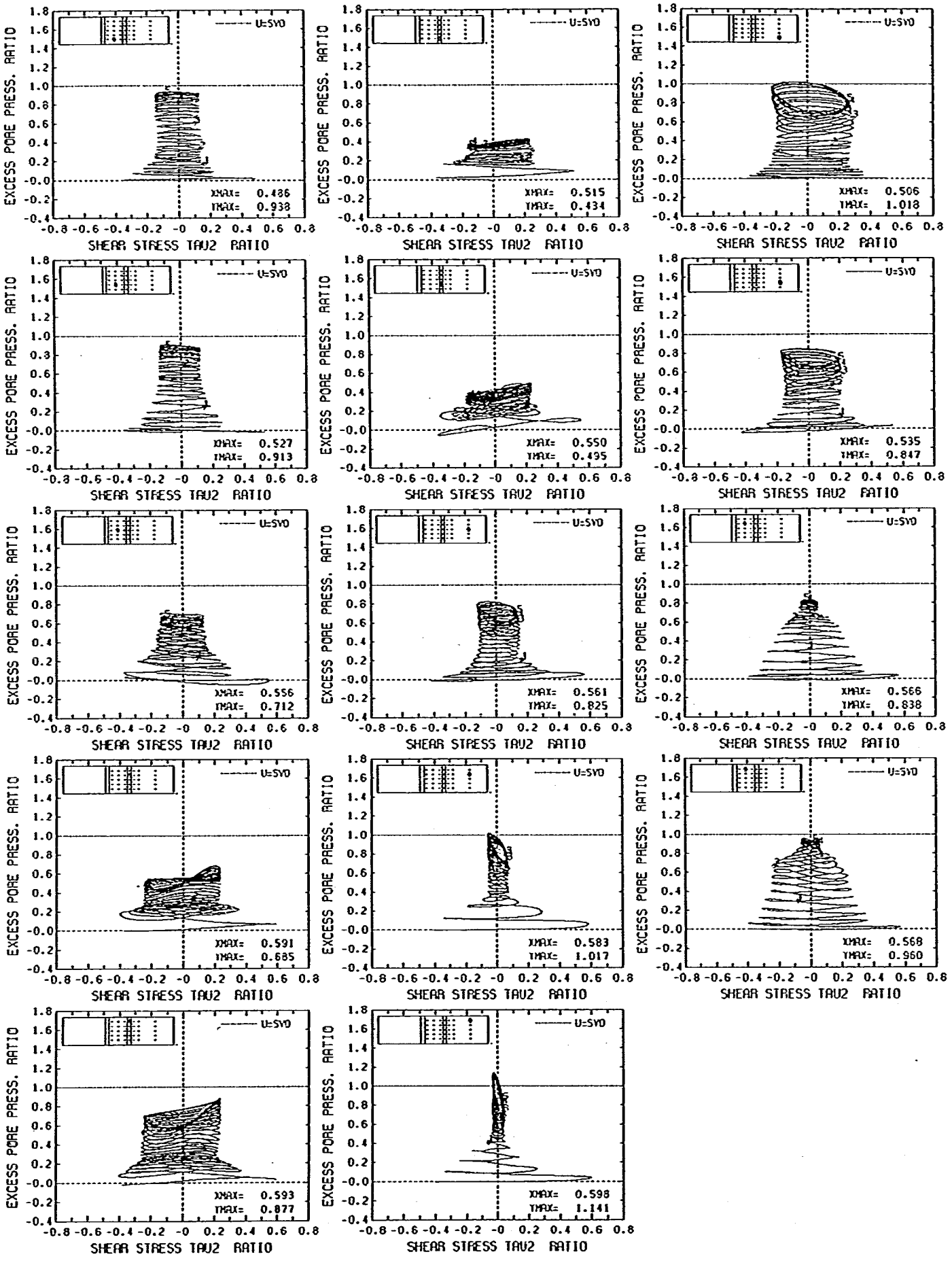
付図－２・13　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－３）



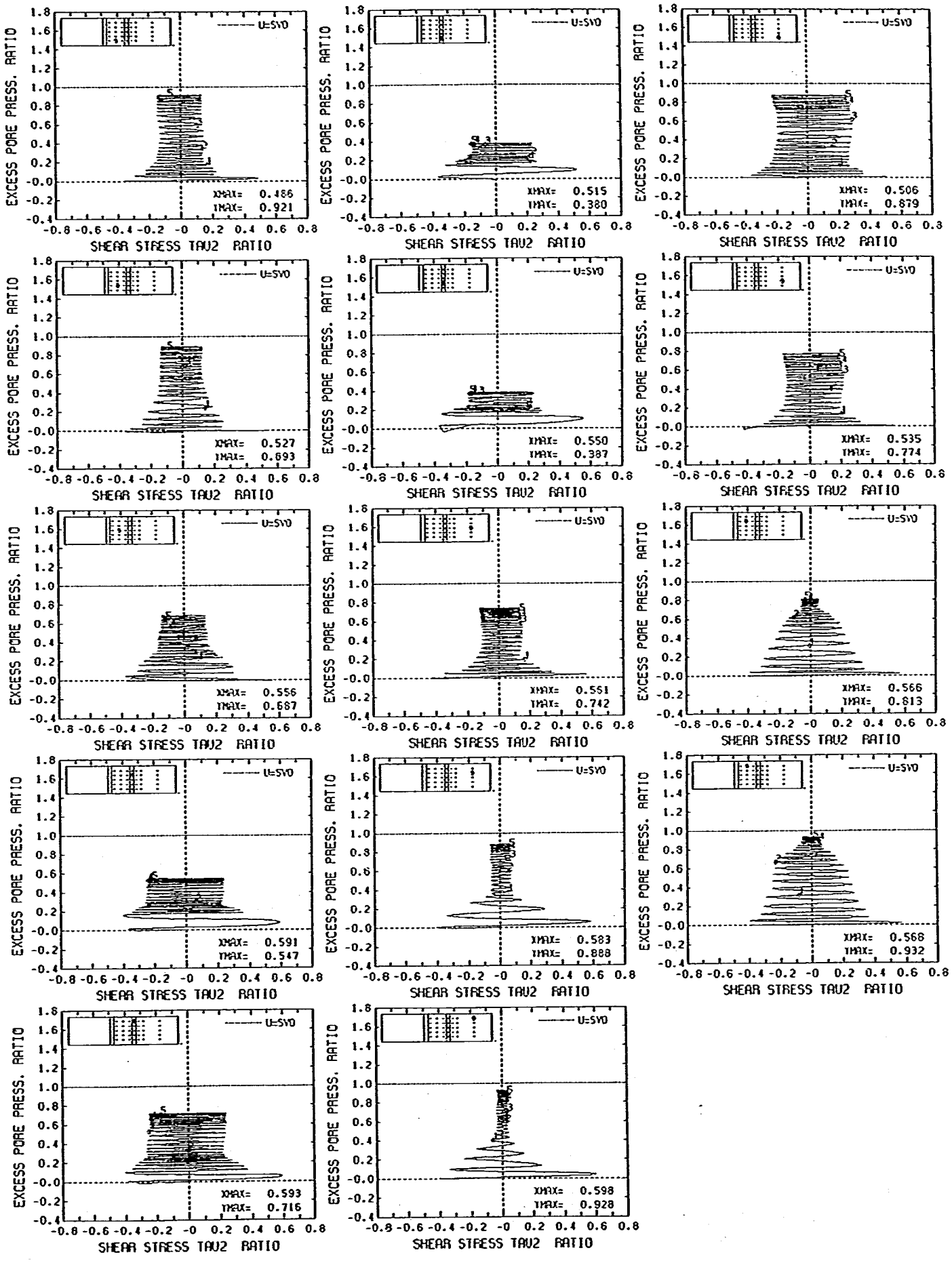
付図－２・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－３）



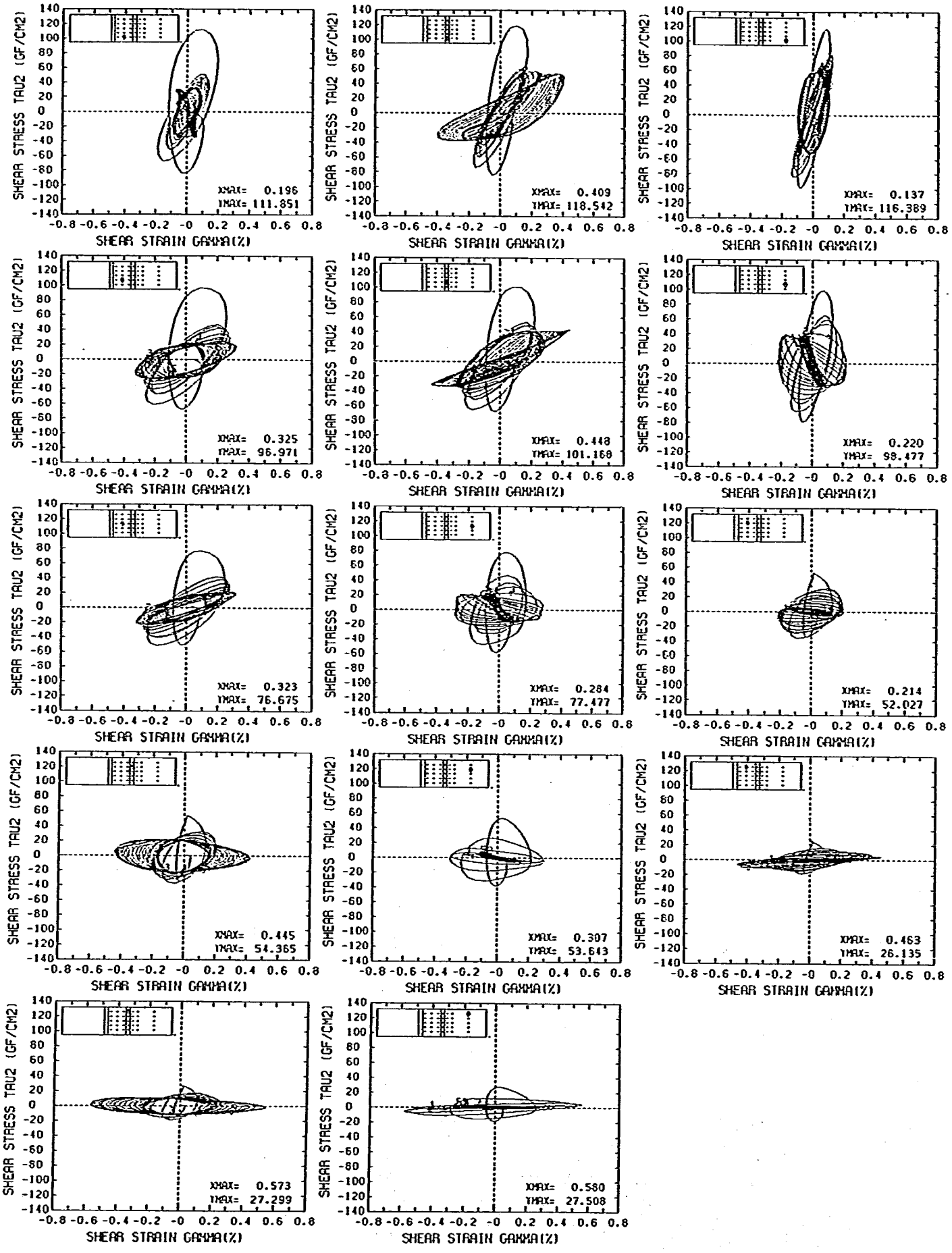
付図－２・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－３）



付図－２・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－３）

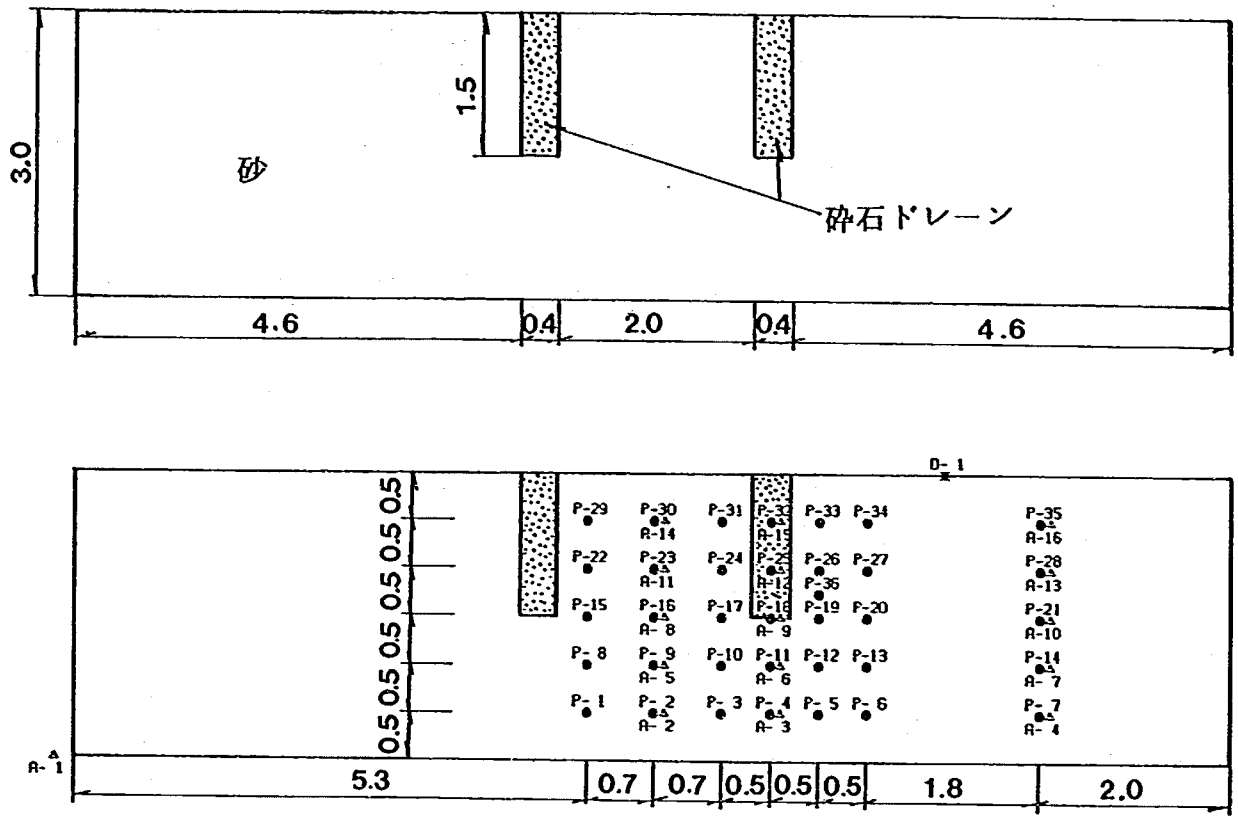


付図－２・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後；模型－３）



付図－２・18　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－３）

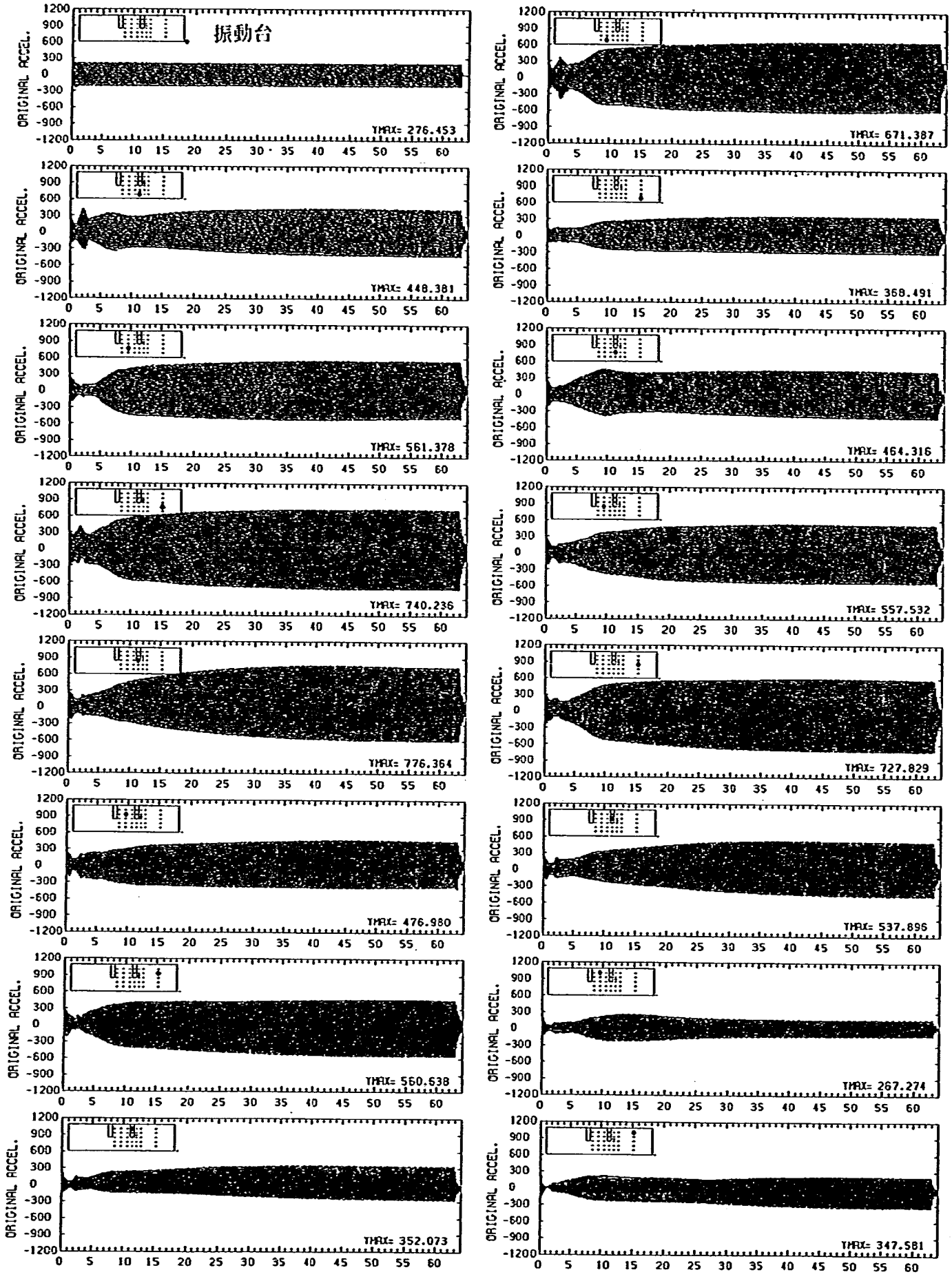
模型 4



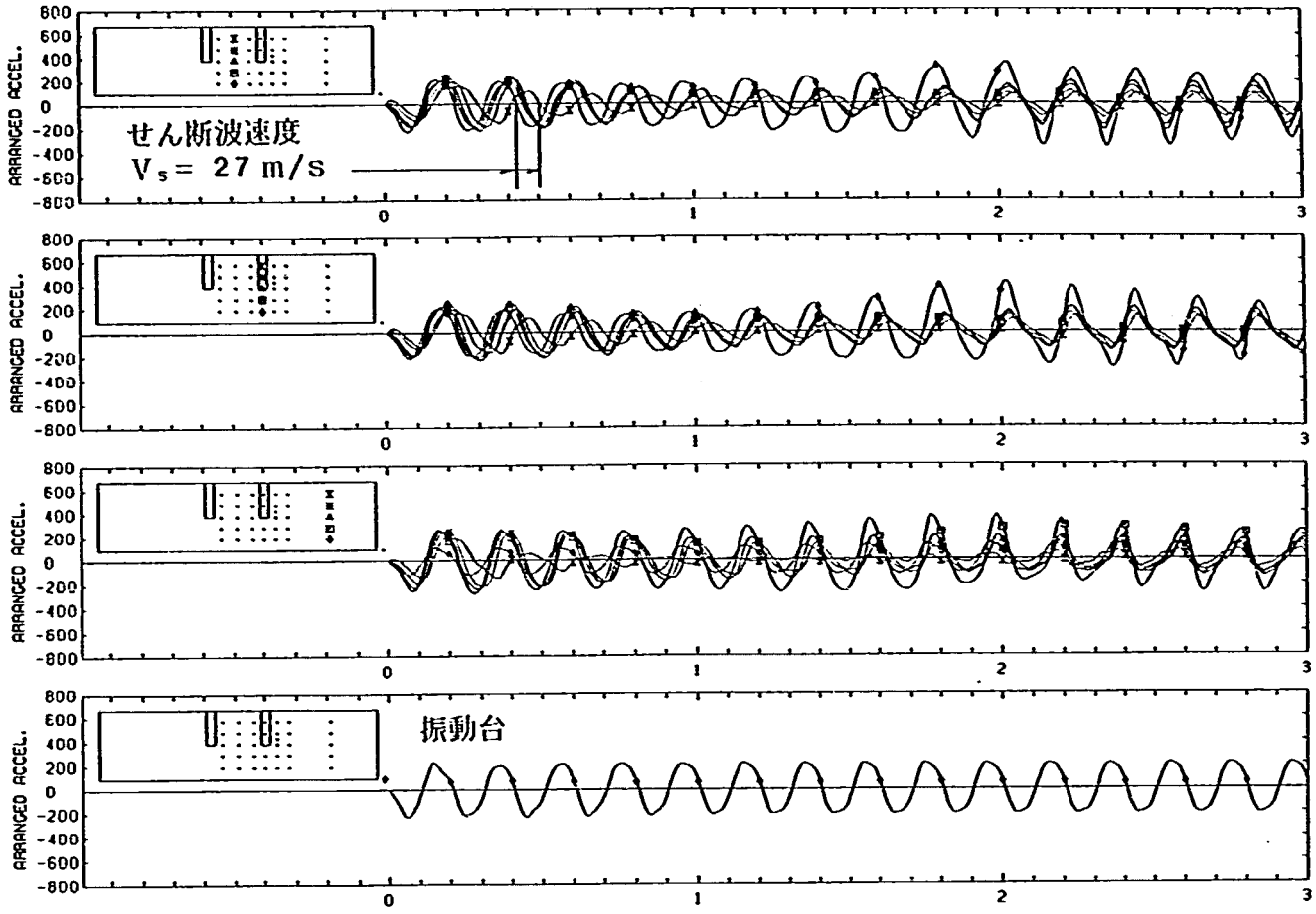
● P－ 間隙水圧計 （３６）
△ A－ 加速度計 （１６）
＊ D－ 変 位 計 （１）

A－１は振動台加速度
P－２７は欠測（飽和）
P－３６はＧＬ－１４５ｃｍの奥の壁に取り付け

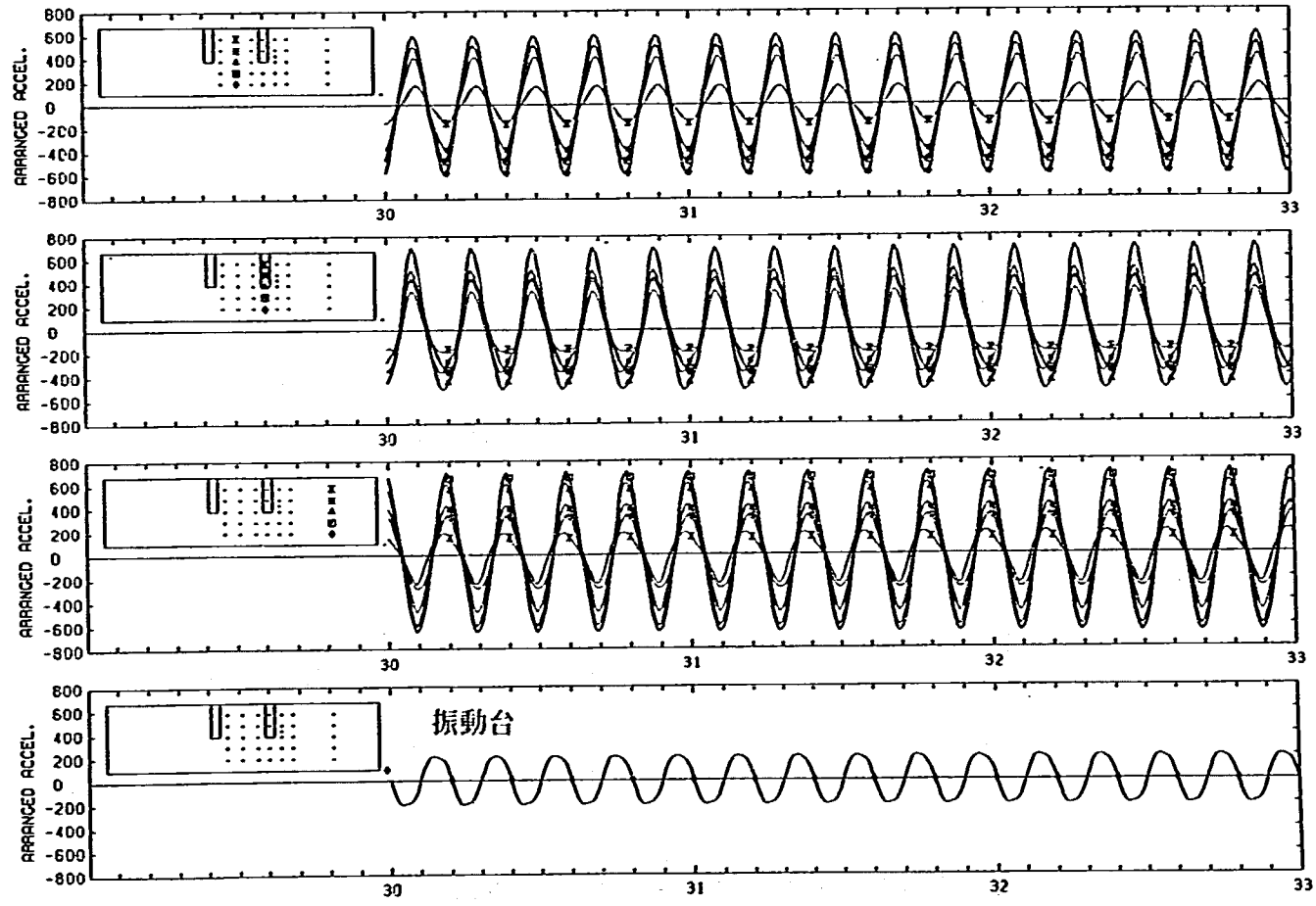
付図－３・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－４）



付図－３・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－４）

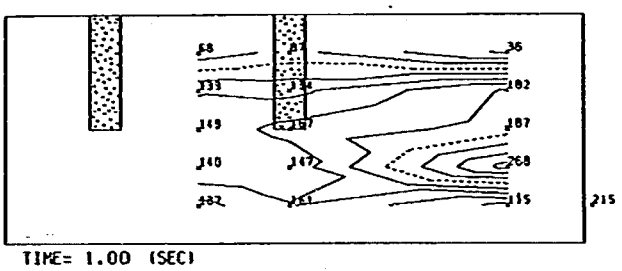


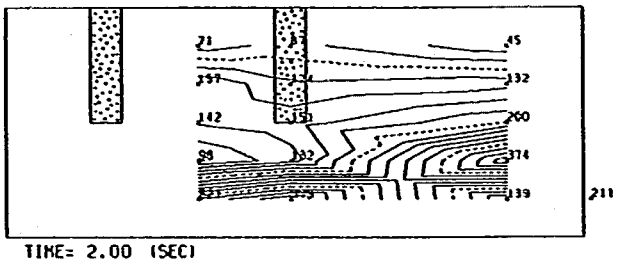
（ａ）加振開始直後（０～３秒）

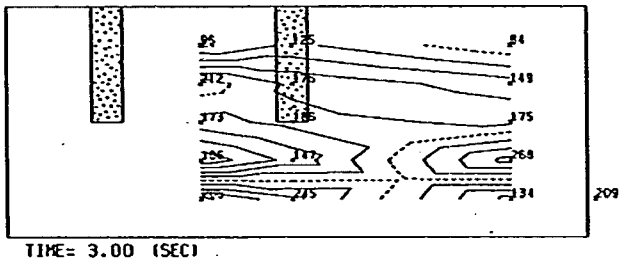


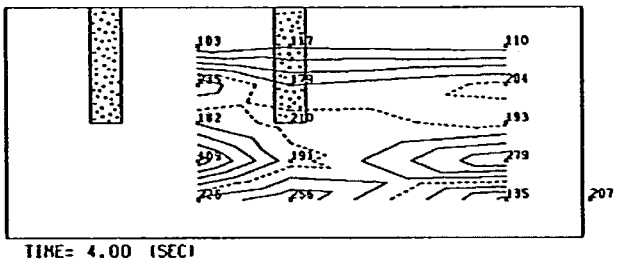
（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

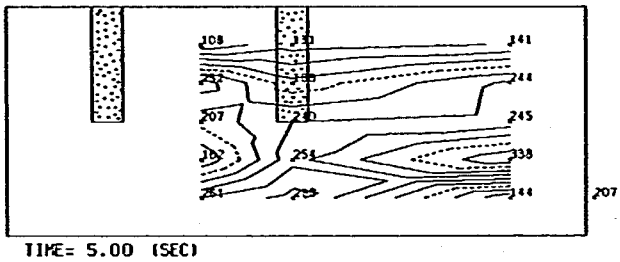
付図－３・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－４）

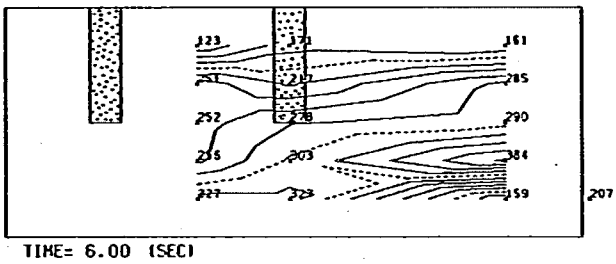


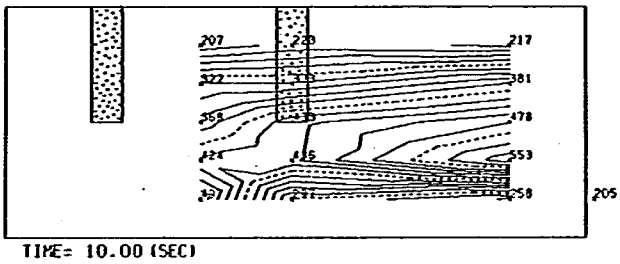


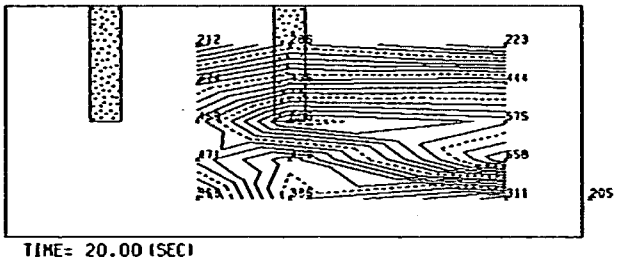


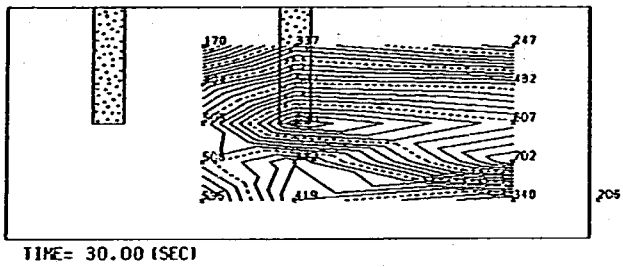


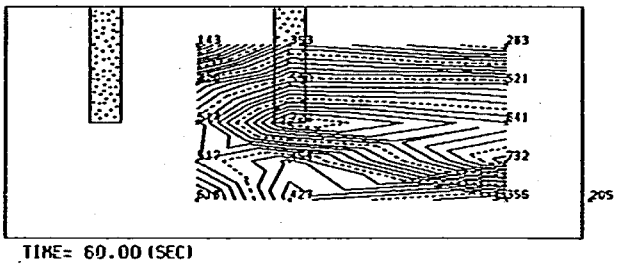




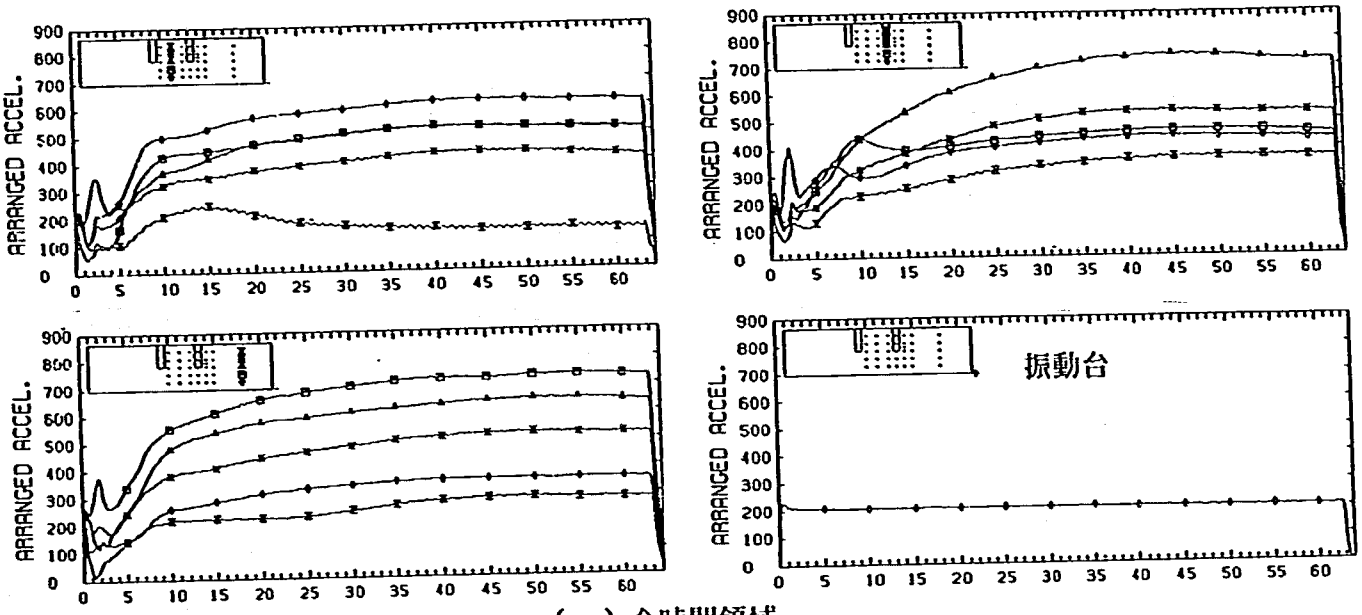




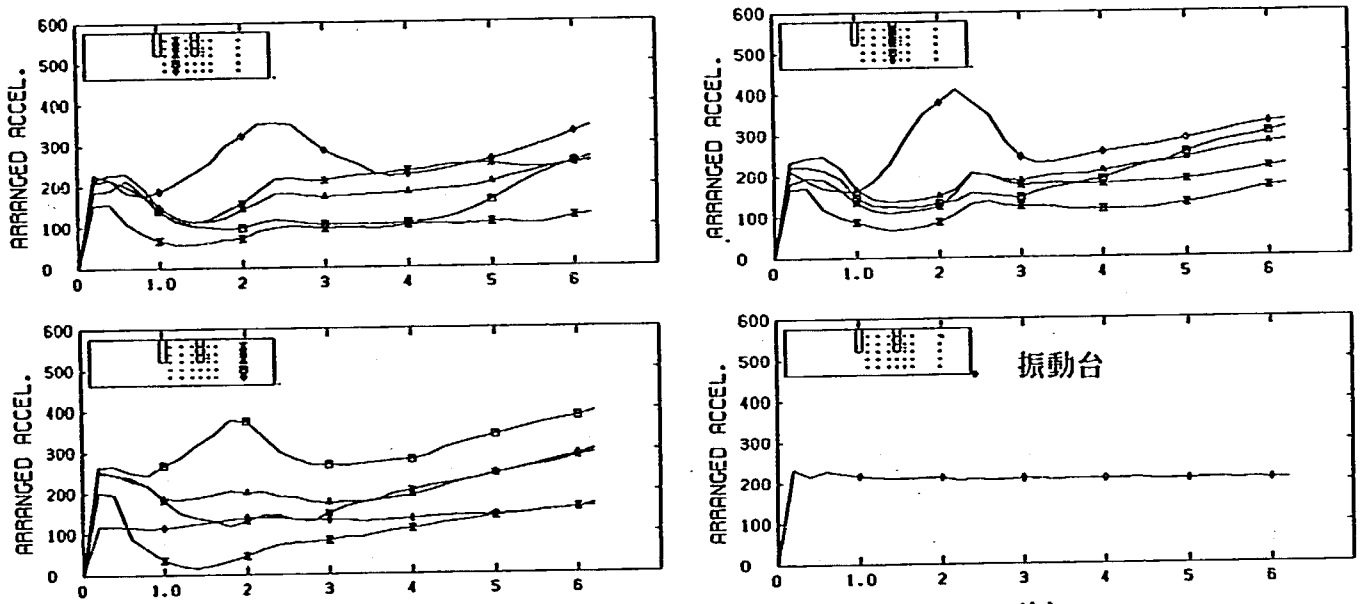




付図－３・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal、模型－４）

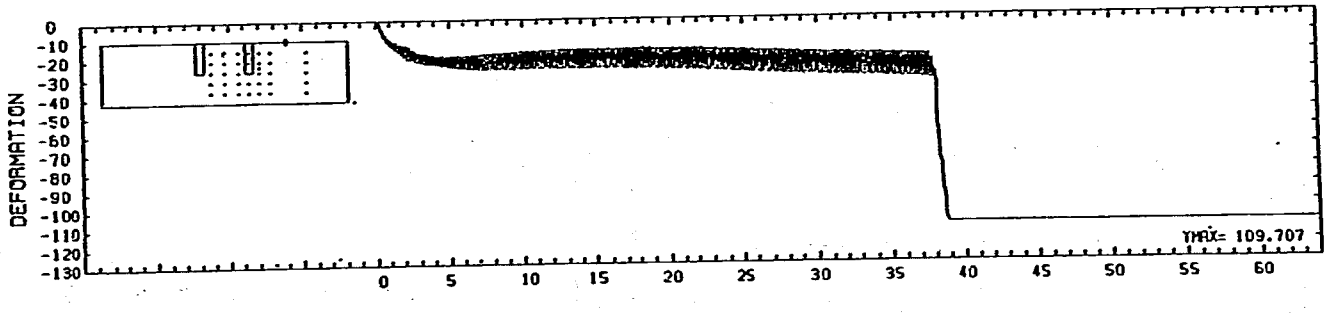


（ａ）全時間領域

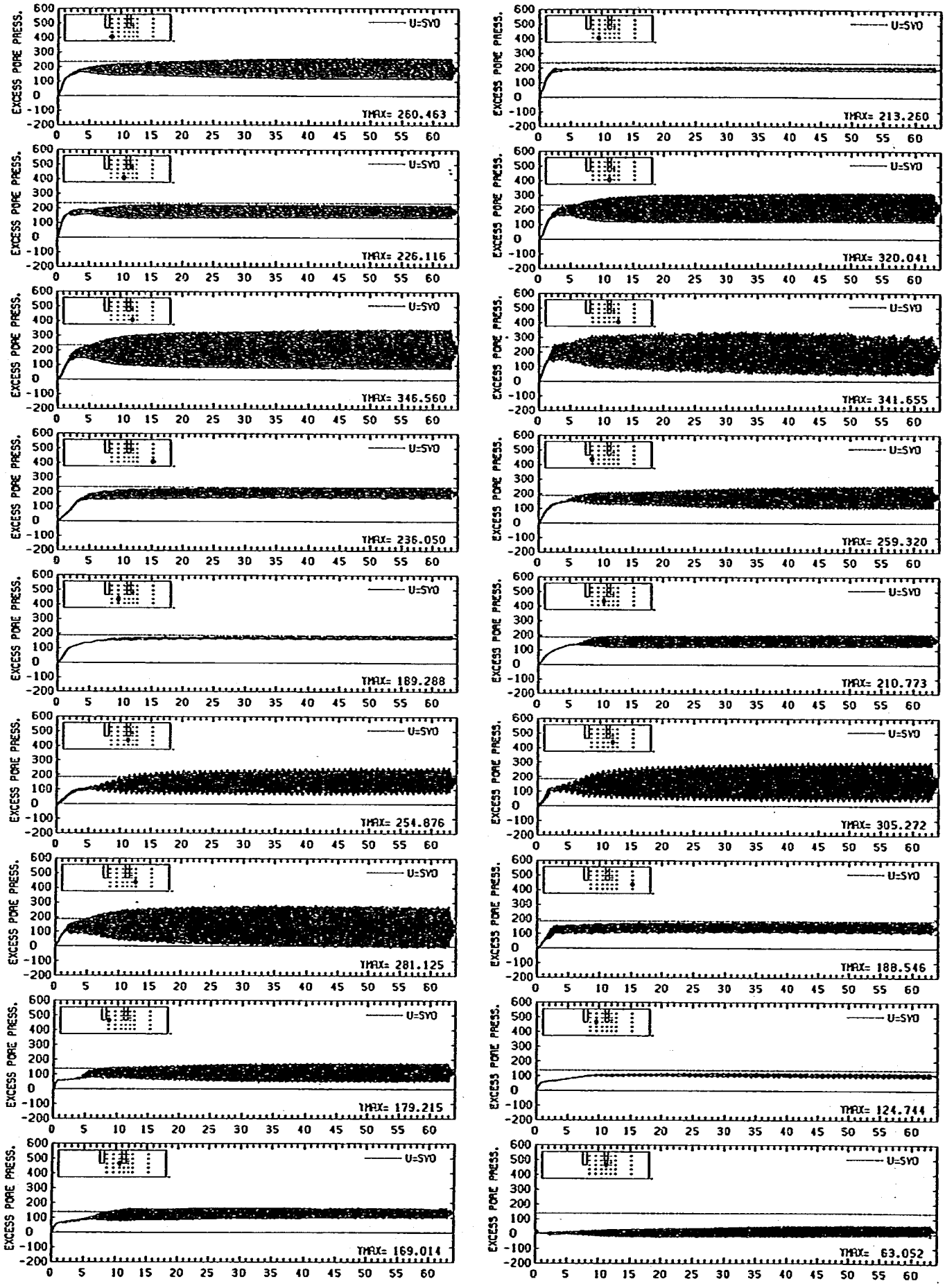


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

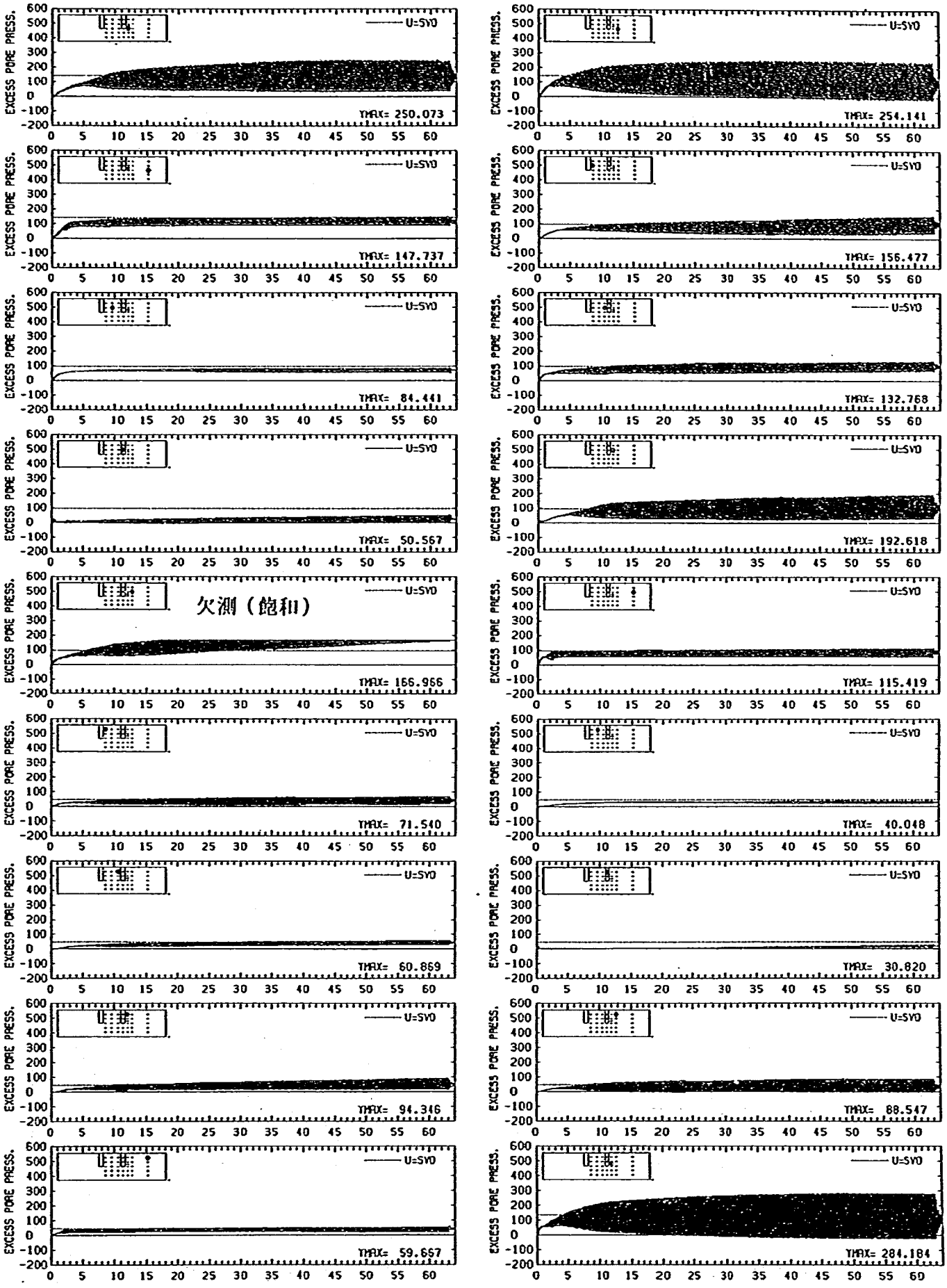
付図－３・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－４）



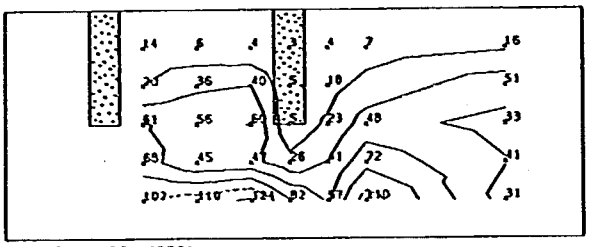
付図－３・６　変位計による地表面沈下の測定結果（単位：㎜、模型－４）

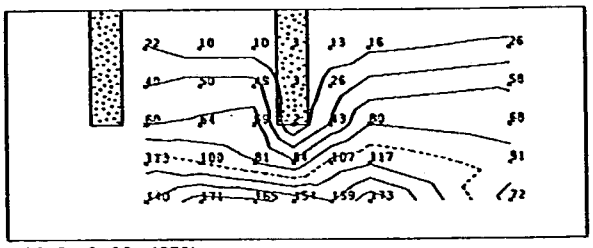


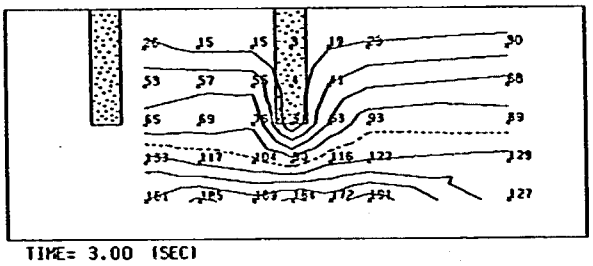
付図－３・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－４）

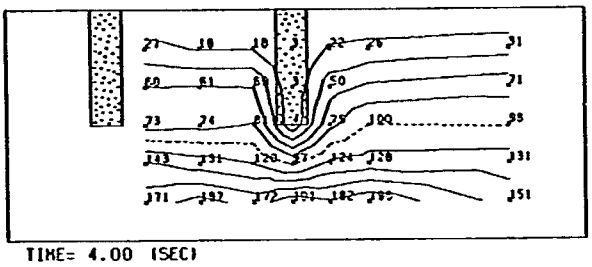


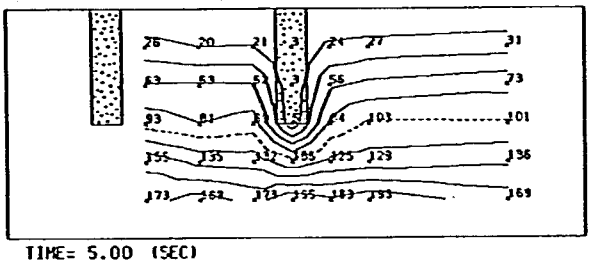
付図－３・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－４）

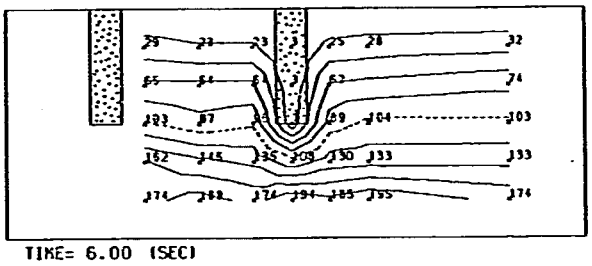


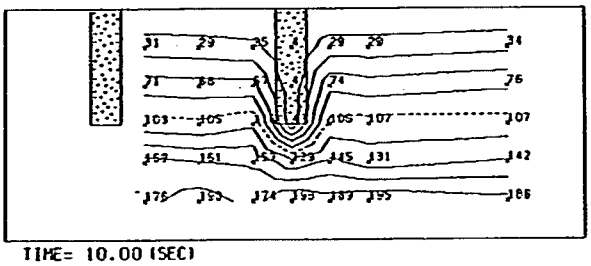


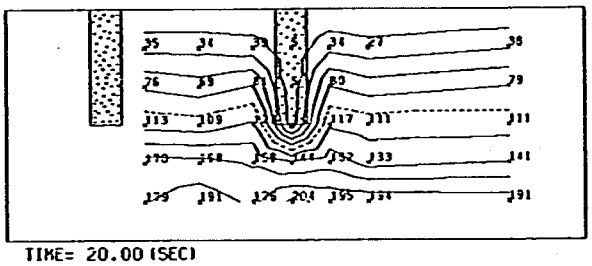


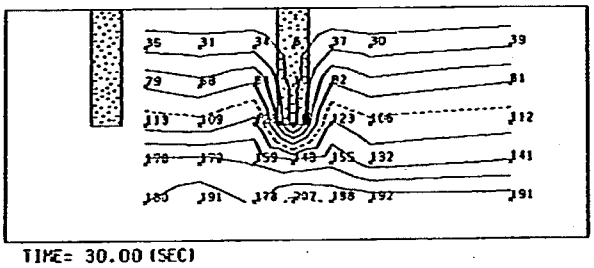


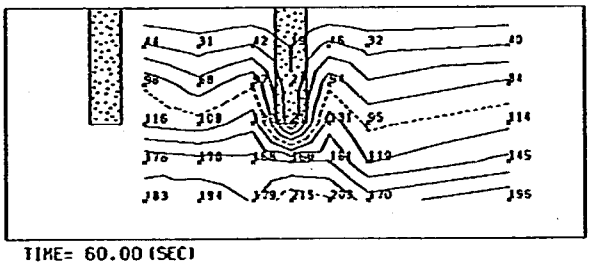




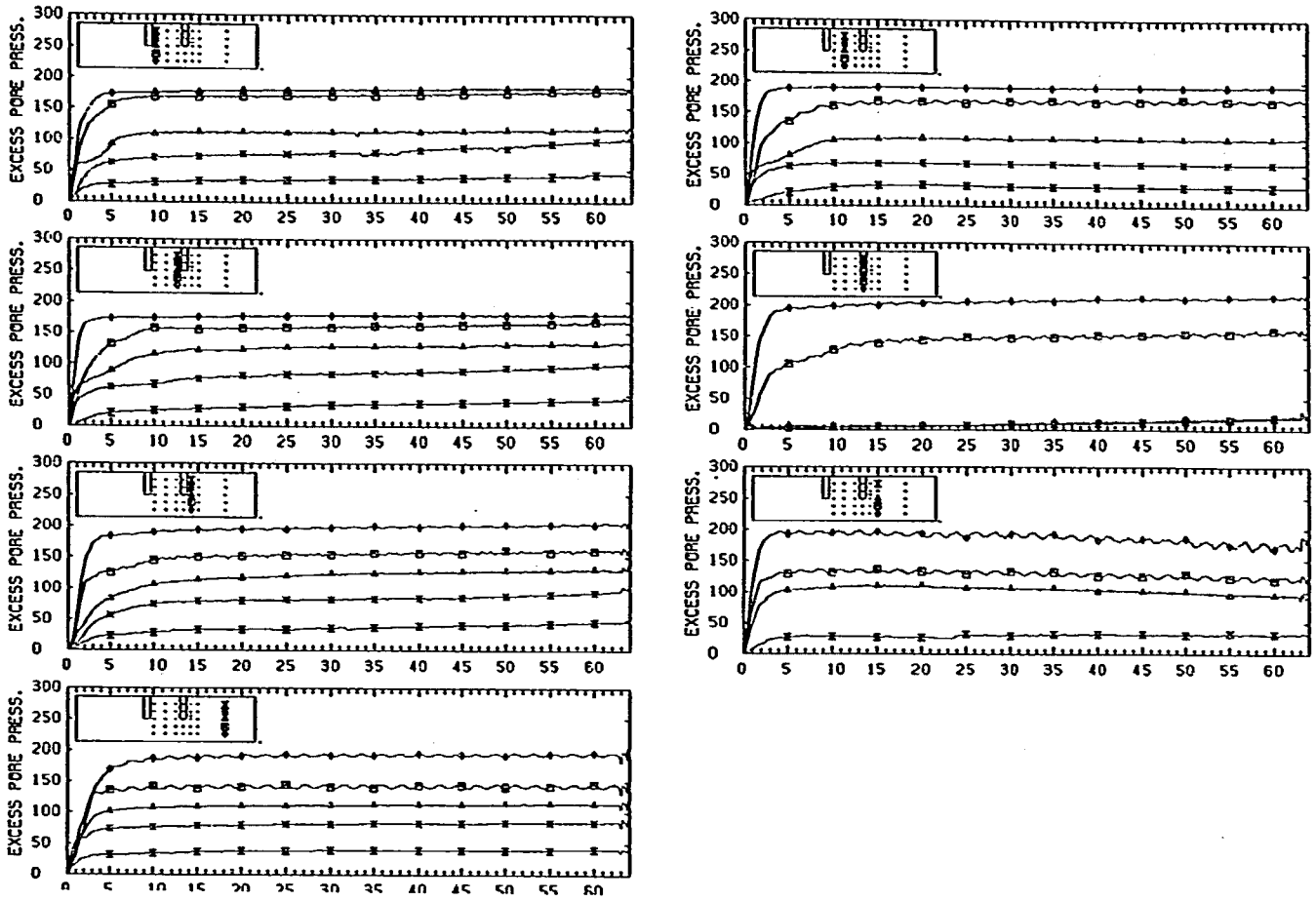




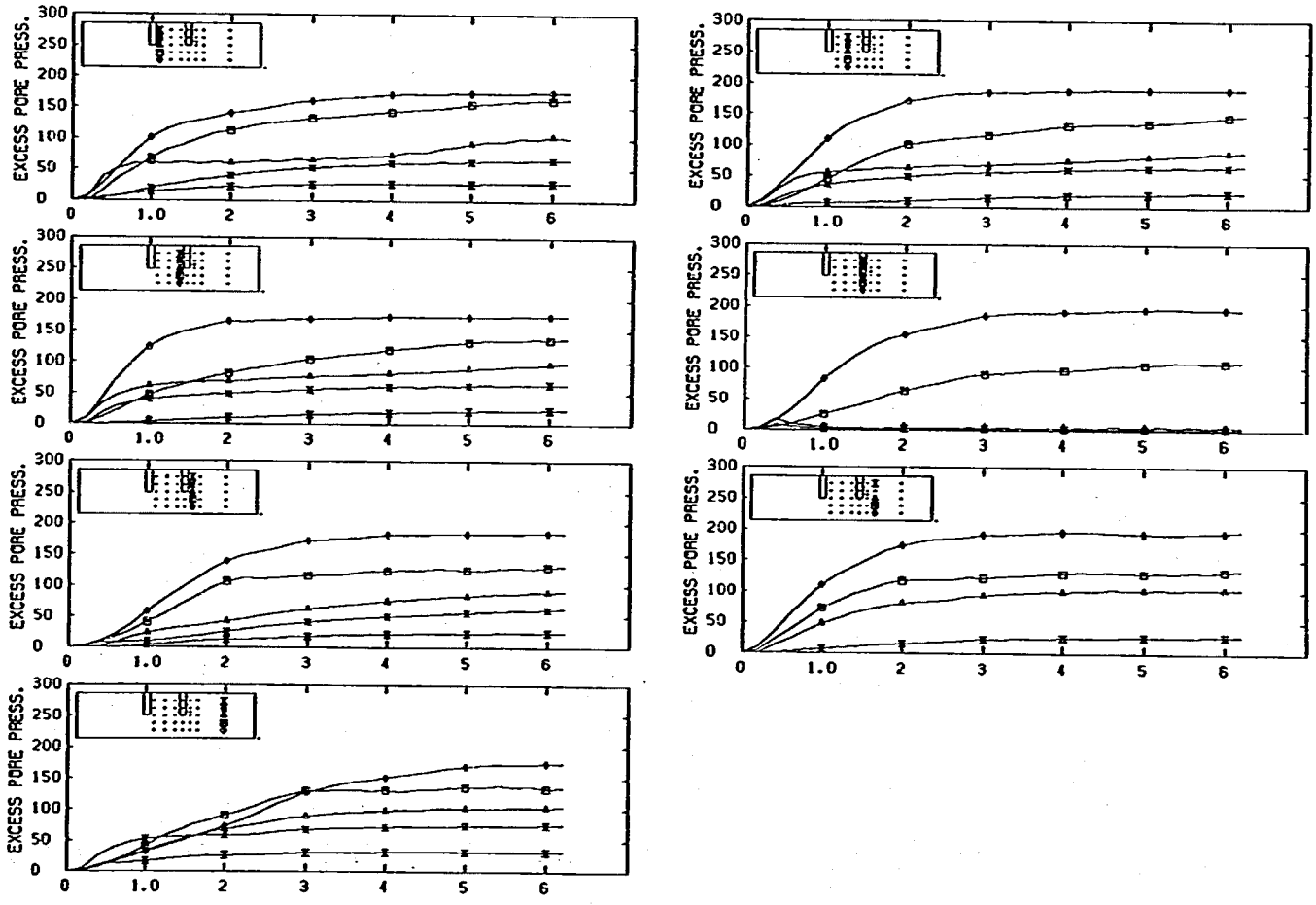




付図－３・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－４）

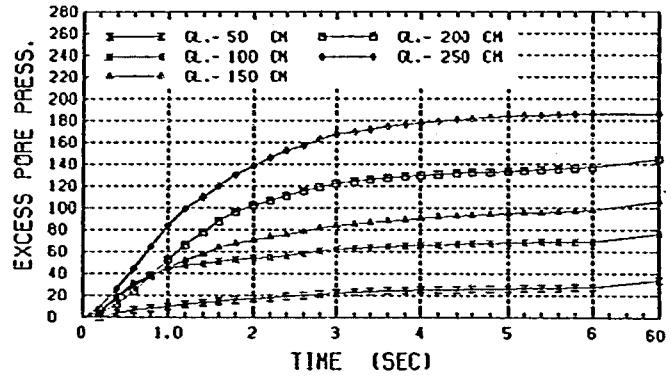


（a）全時間領域

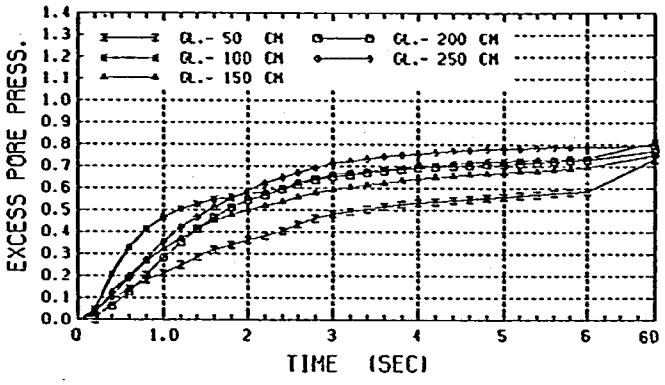


（b）加振開始直後の拡大図（0～6秒）

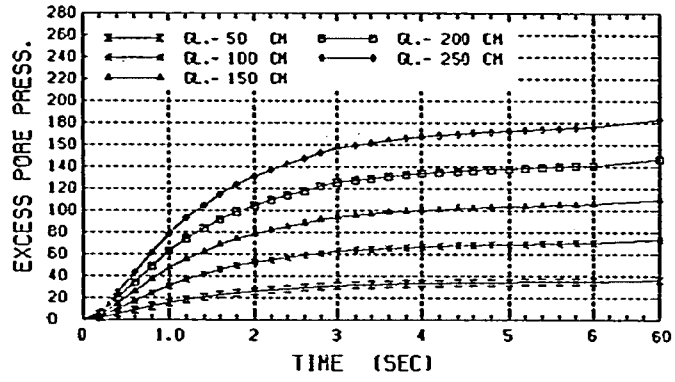
付図－3・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－4）



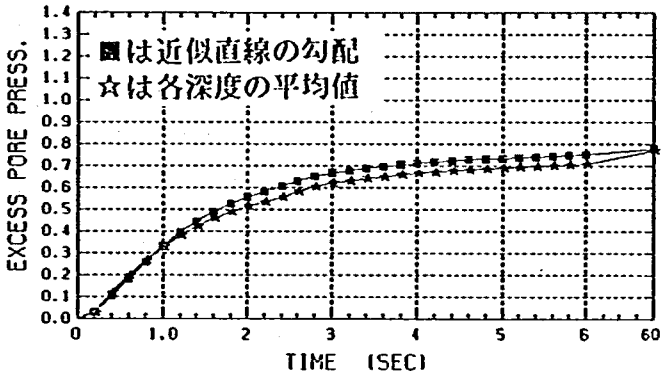
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



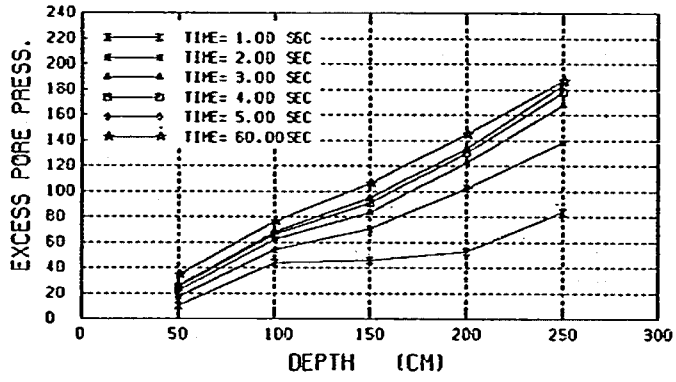
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



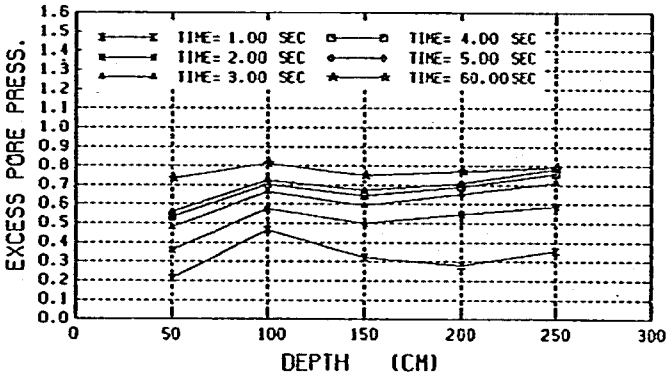
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



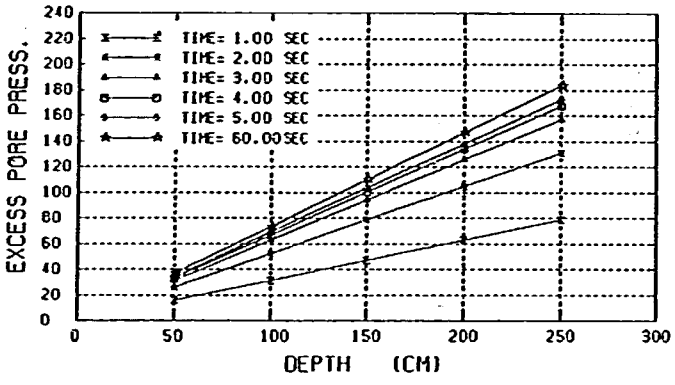
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



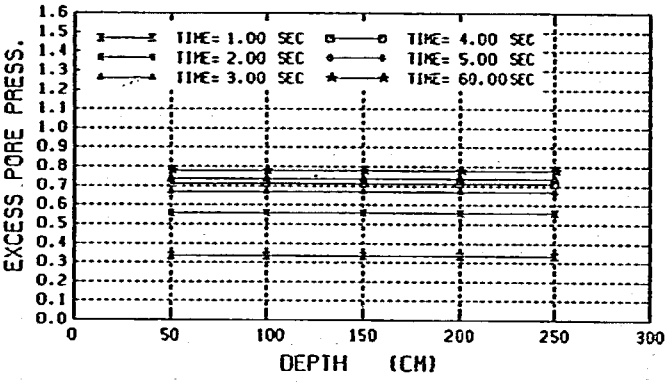
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

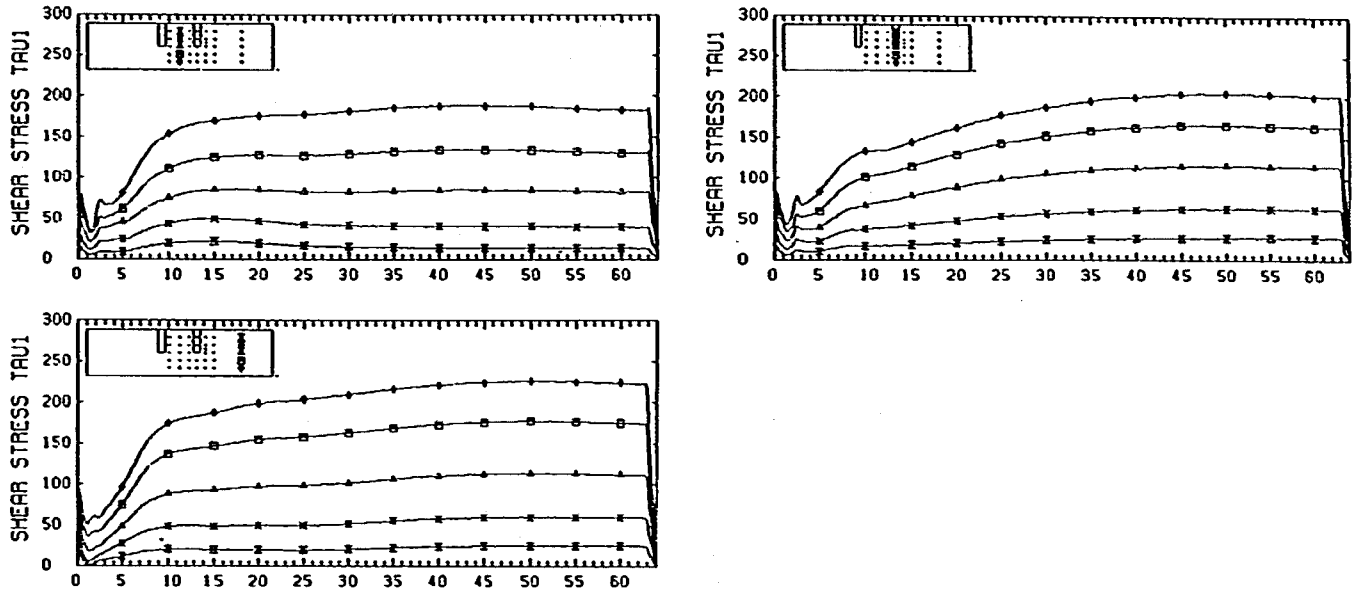


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

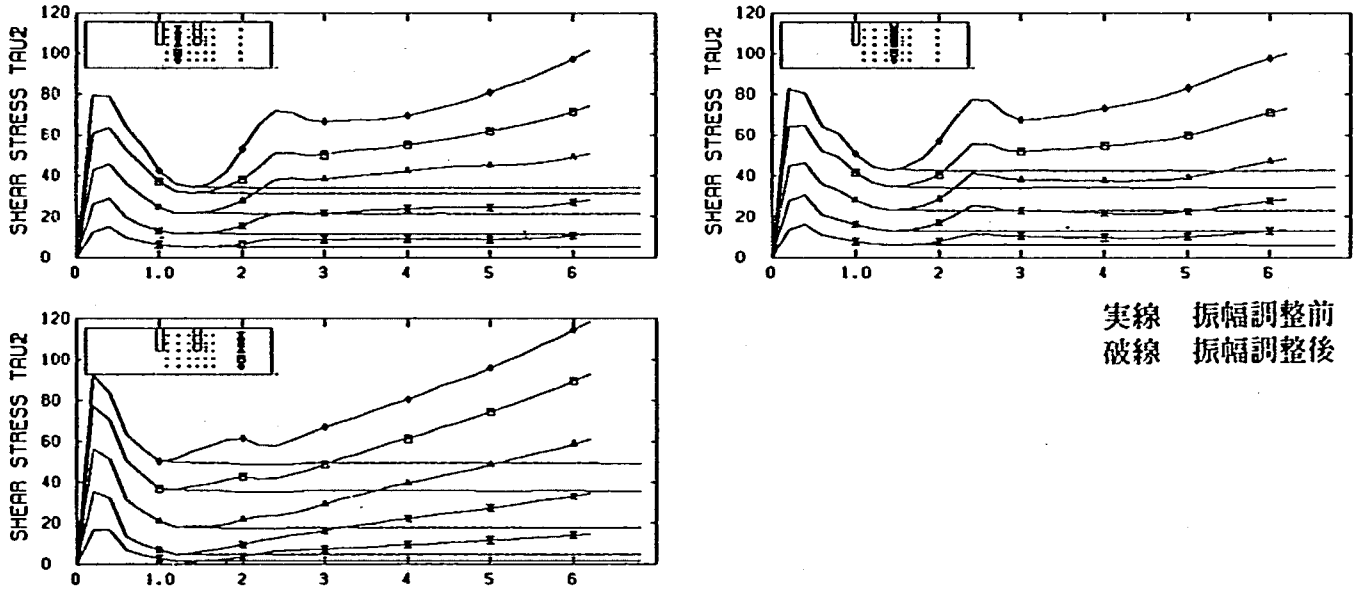


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

付図－３・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－４）

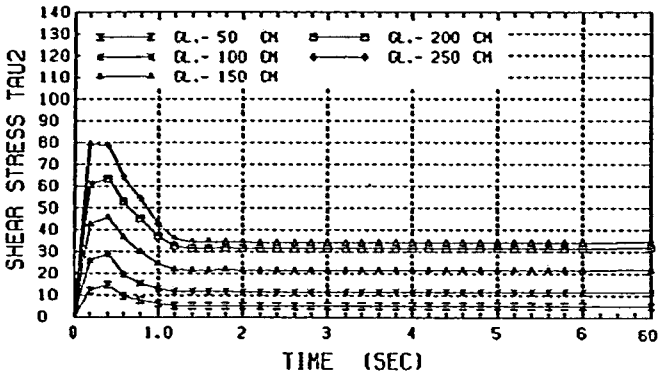


（ａ）全時間領域

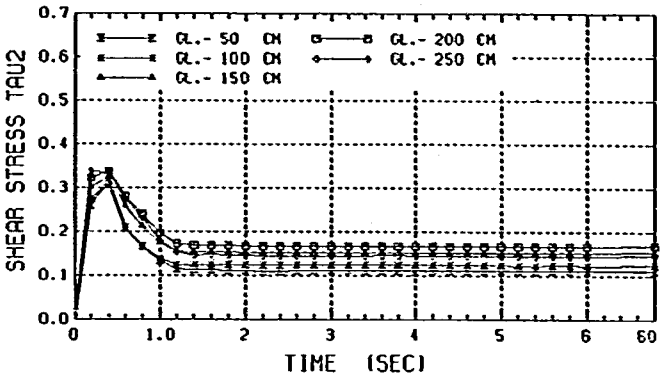


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

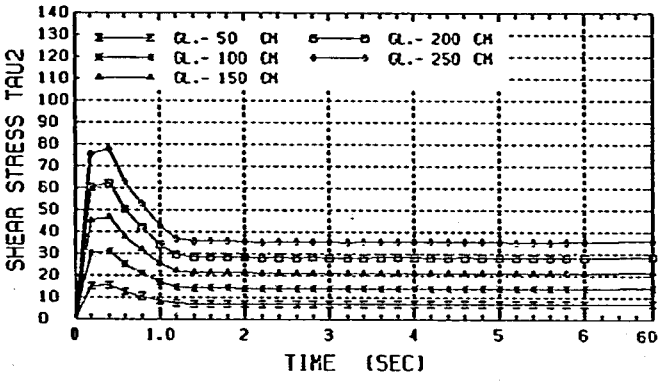
付図－３・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－４）



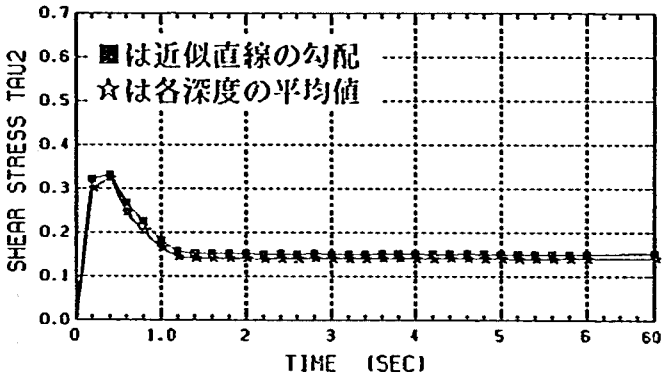
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



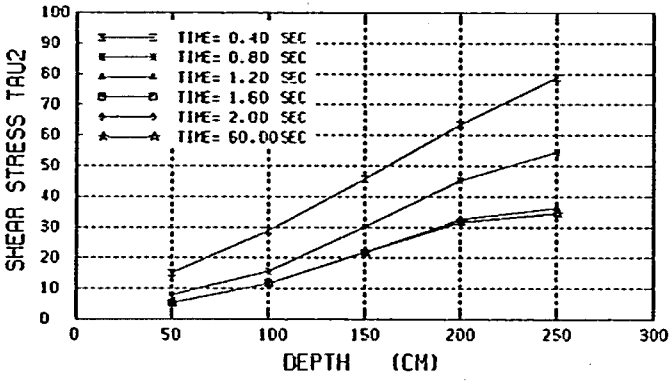
（ｂ）同左のせん断応力比



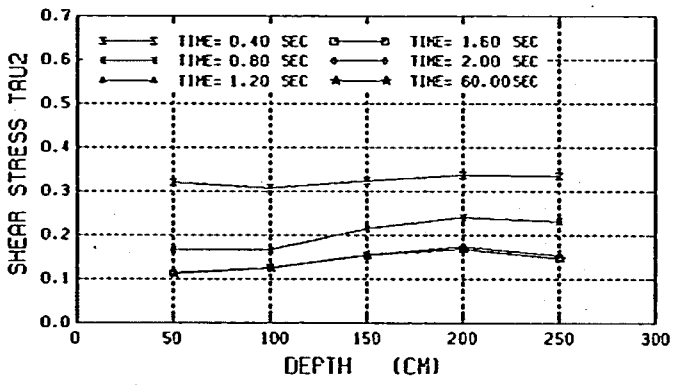
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



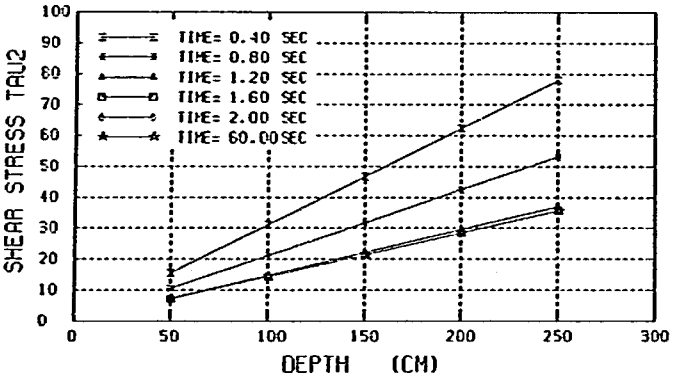
（ｄ）同左のせん断応力比



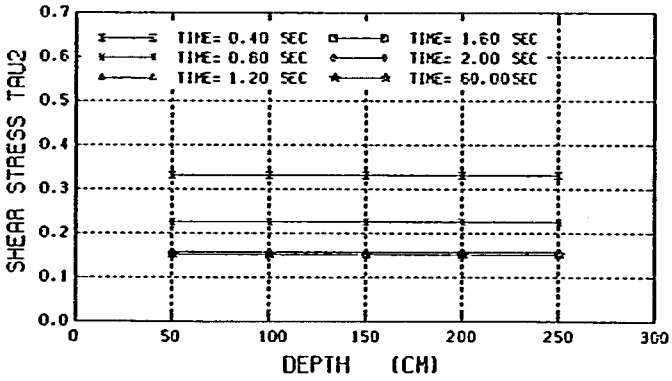
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

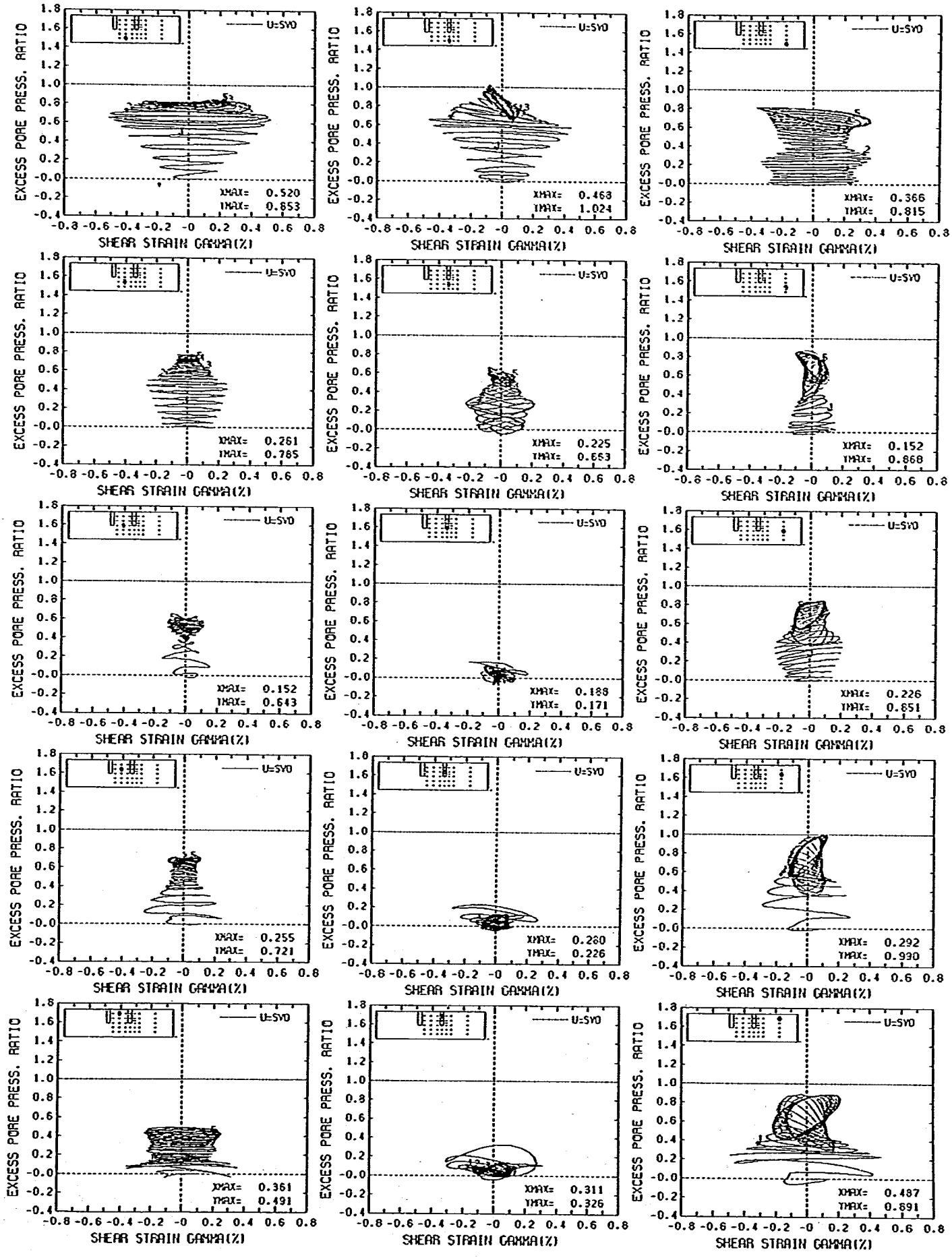


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

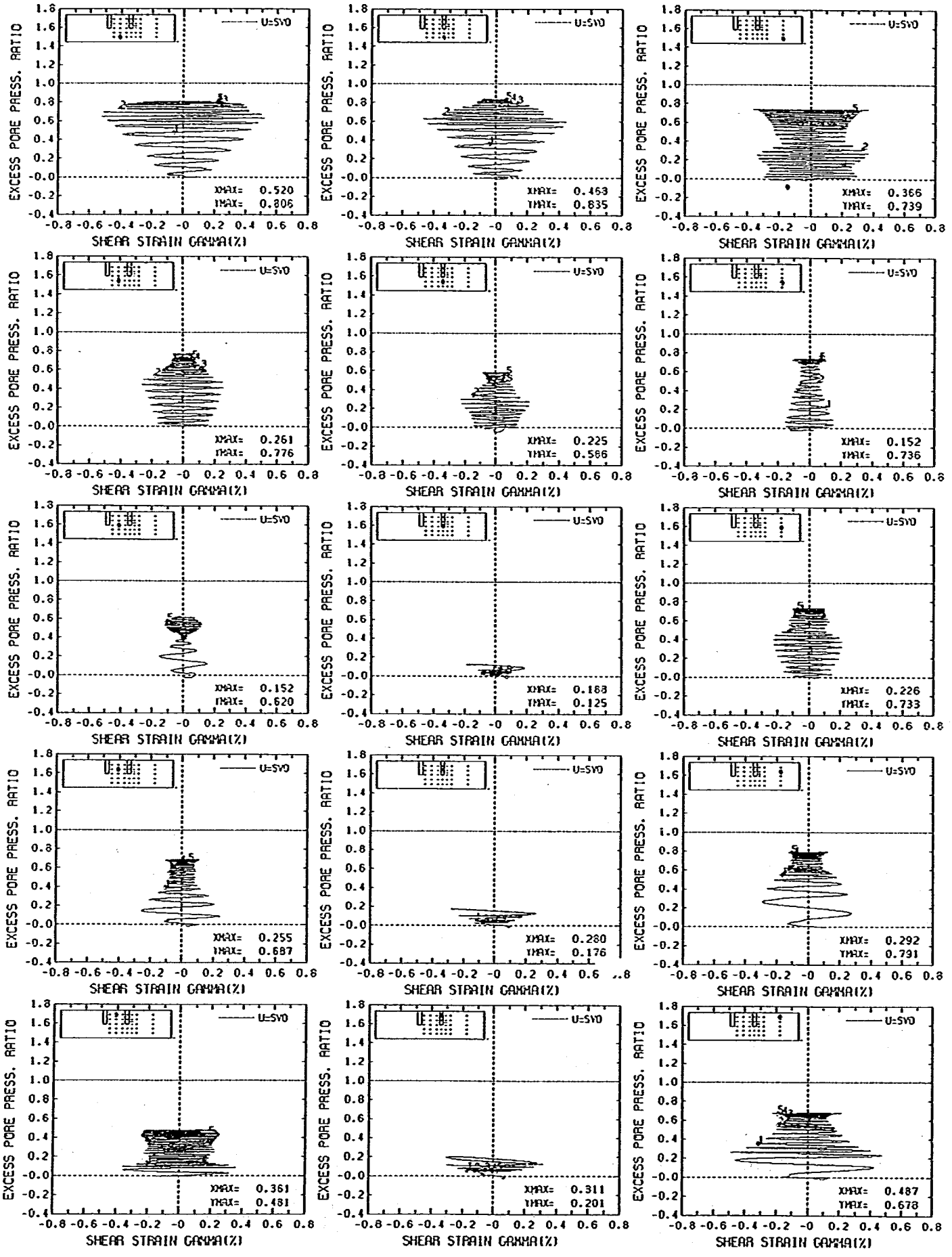


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

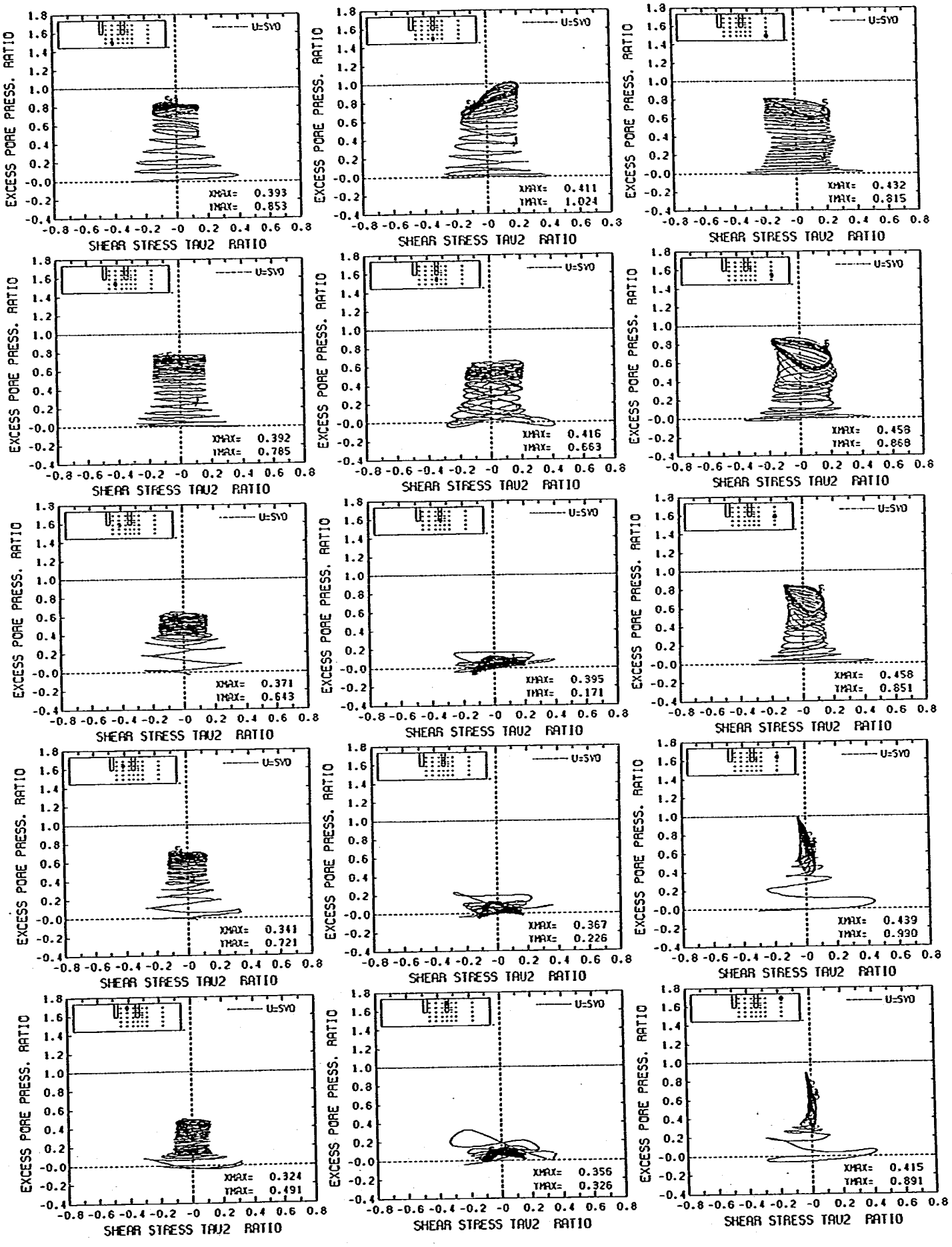
付図－３・13　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－４）



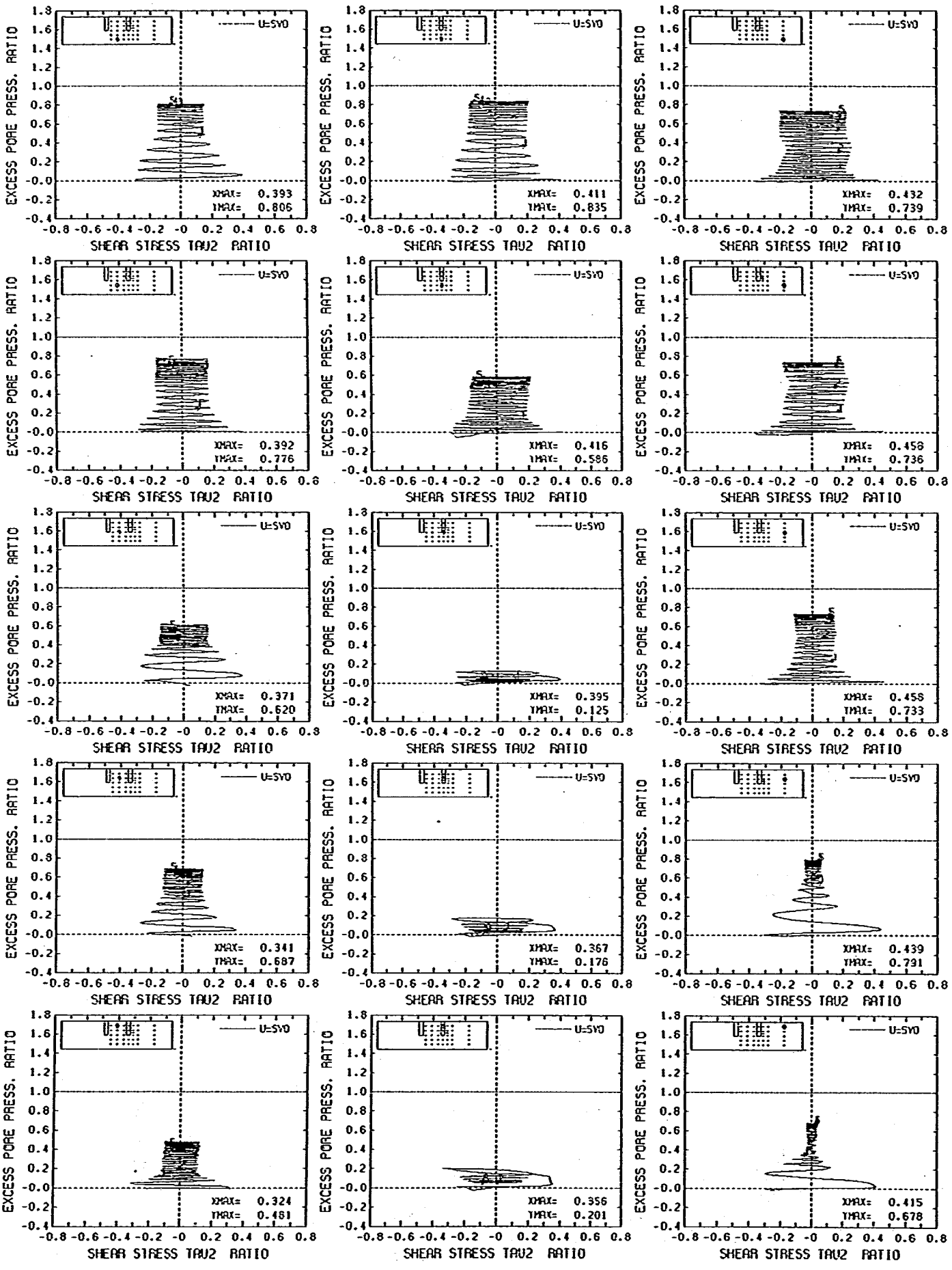
付図－３・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－４）



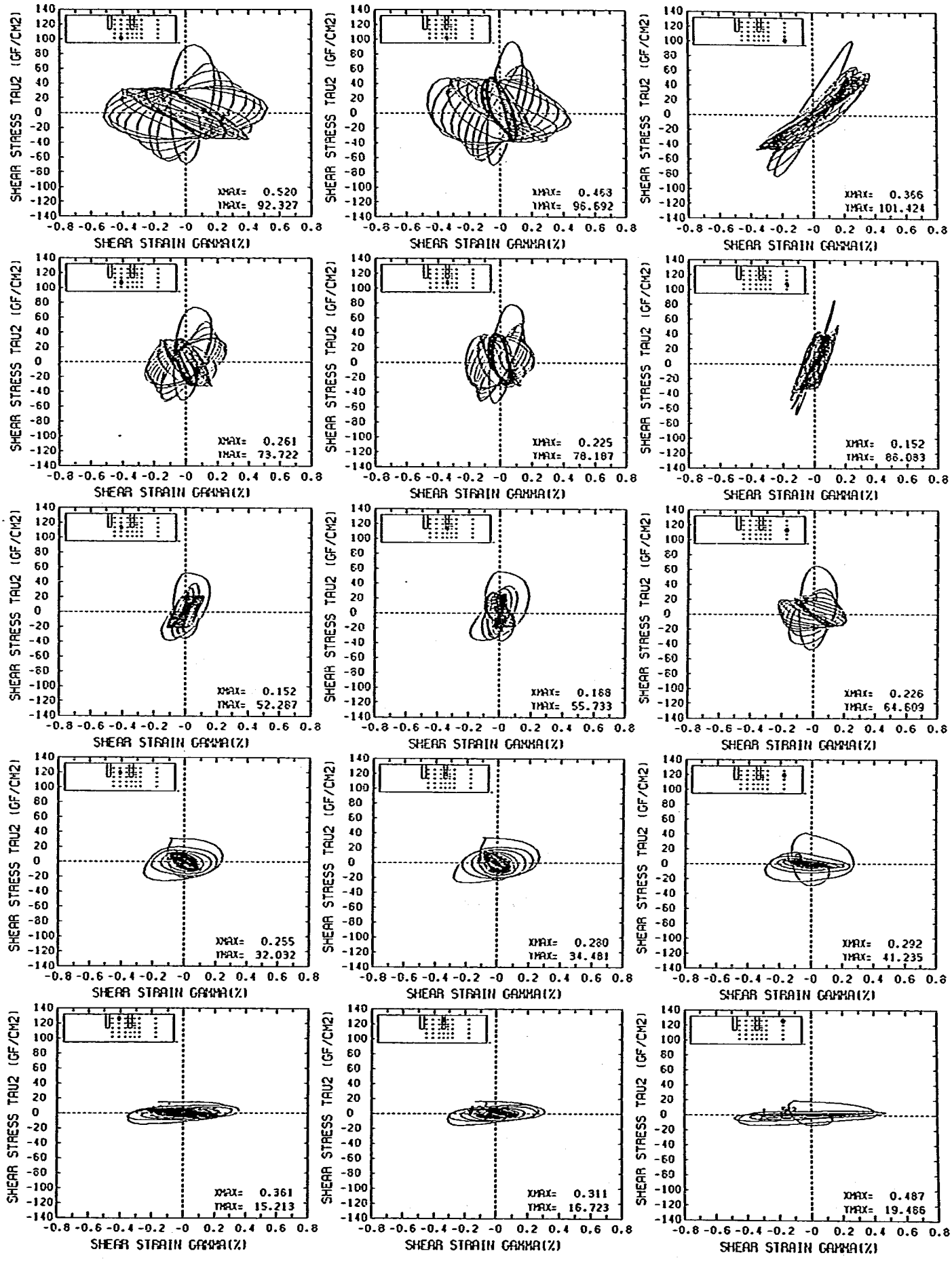
付図－3・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－4）



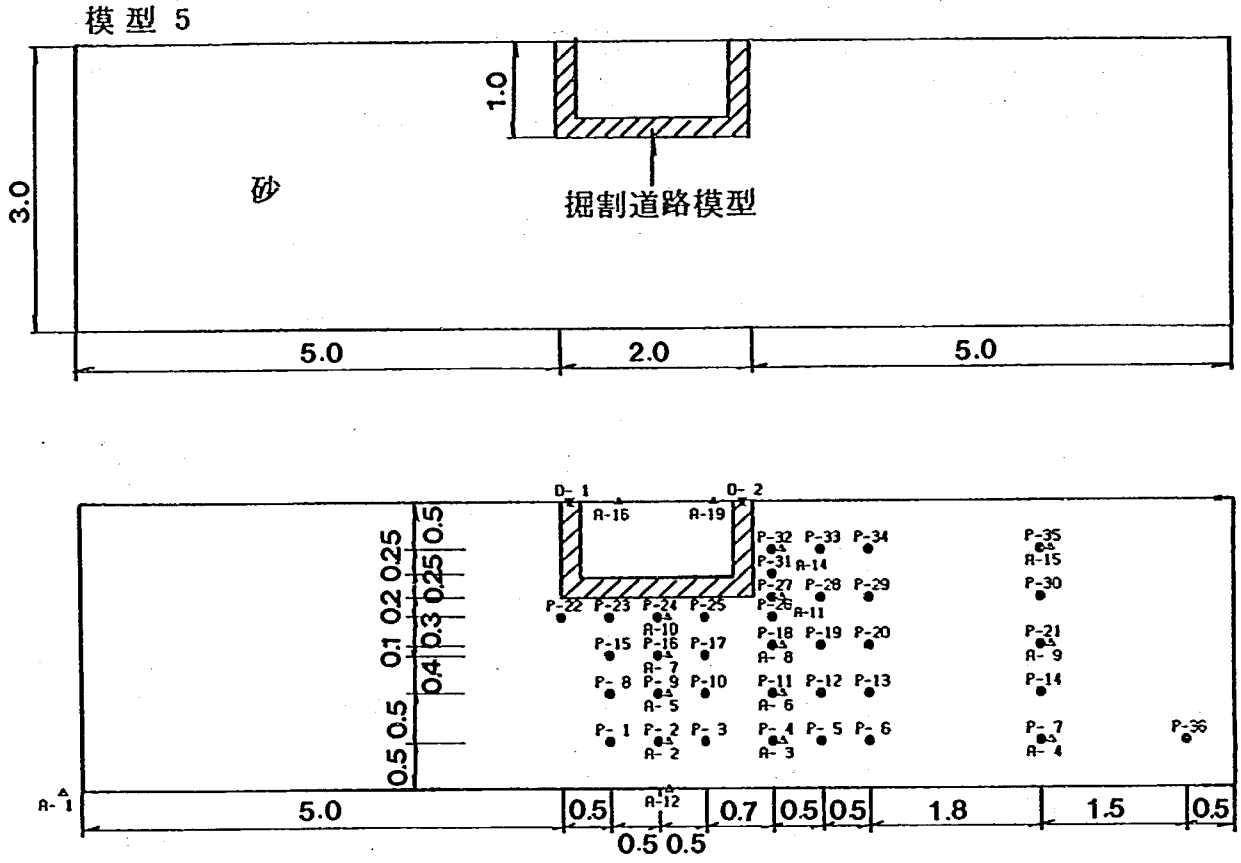
付図－３・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－４）



付図－３・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－４）



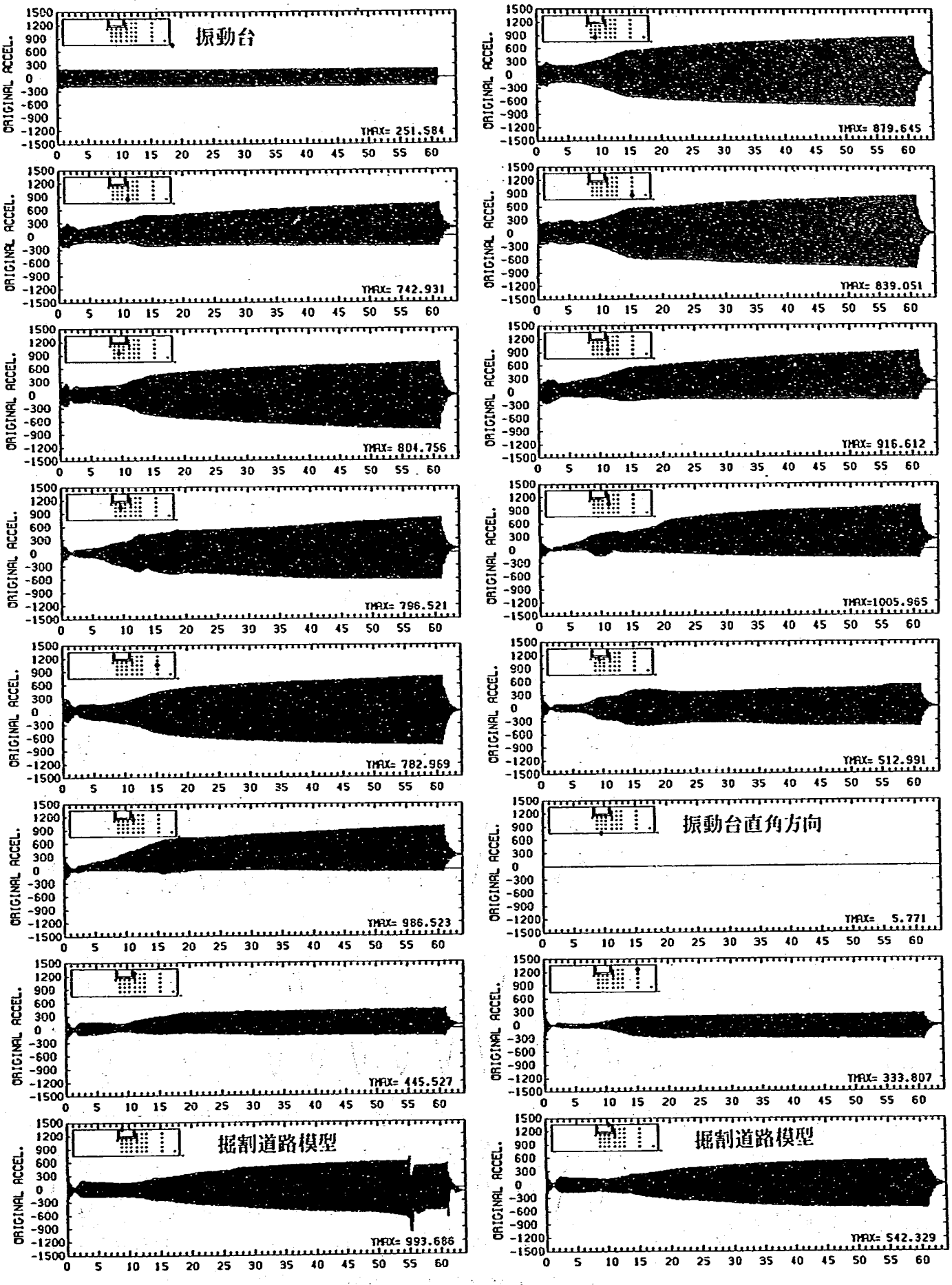
付図－３・18　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－４）



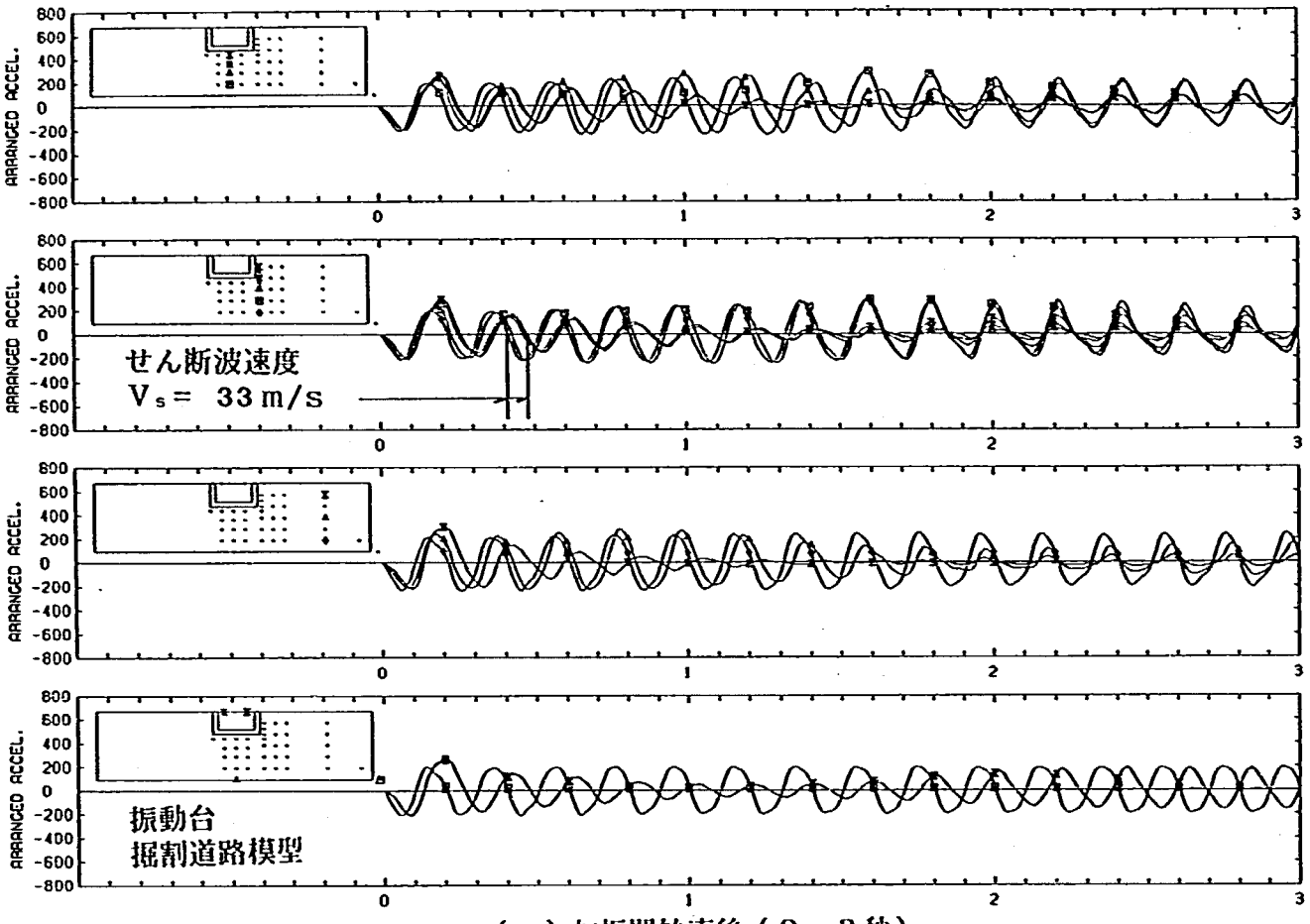
● P－ 間隙水圧計 （３６）
△ A－ 加速度計 （１６）
＊ D－ 変位計 （２）

A－１は振動台加速度
A－１２は加振直角方向
A－１６，A－１９は掘割道路模型上の手前側と奥側
P－２６は欠測（飽和）

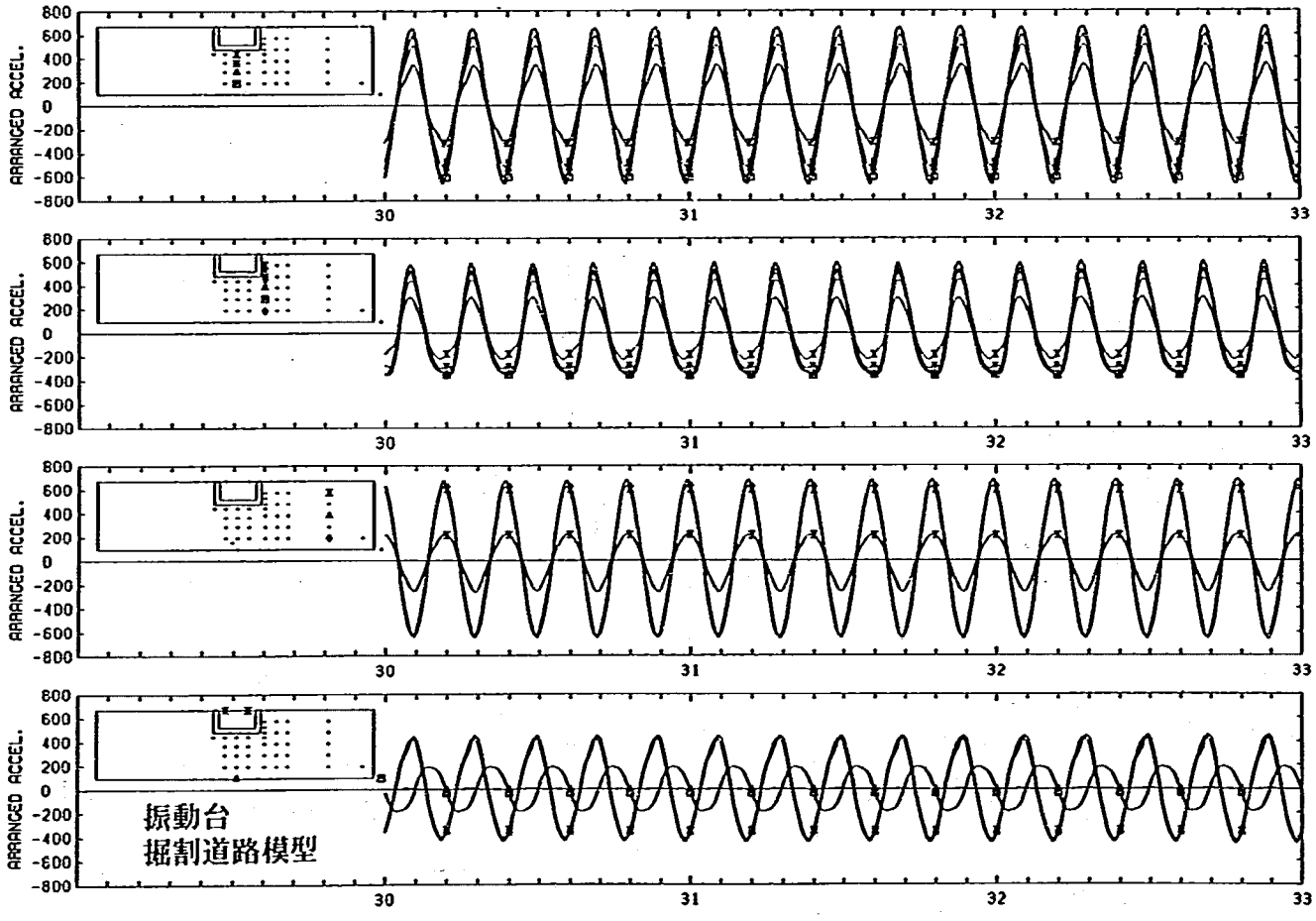
付図－４・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－５）



付図－４・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－５）

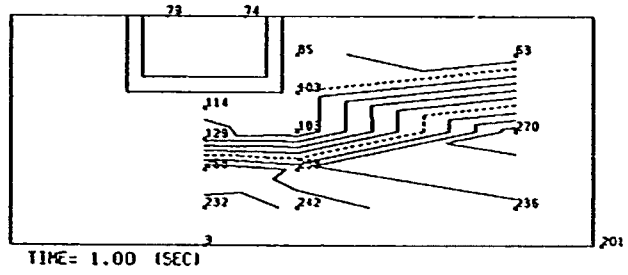


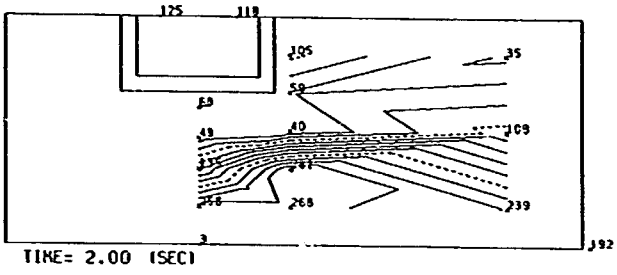
（ａ）加振開始直後（０～３秒）

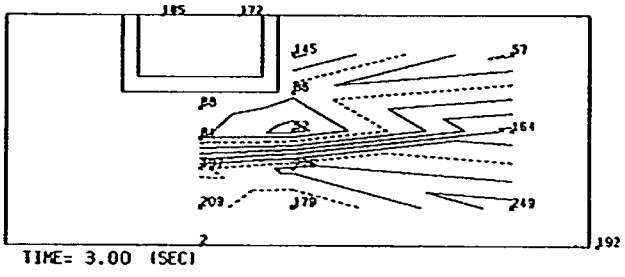


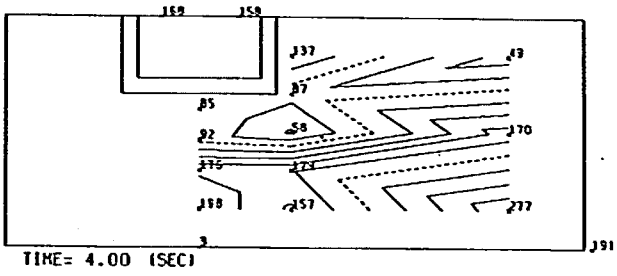
（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

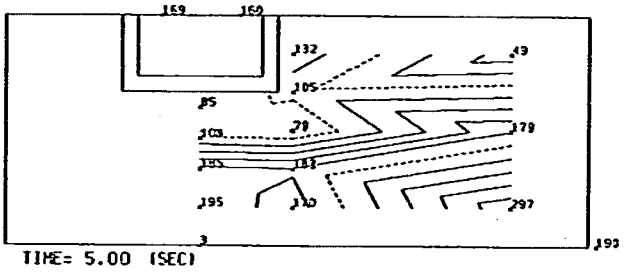
付図－４・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－５）

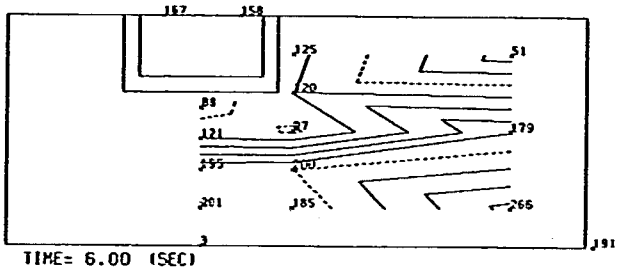


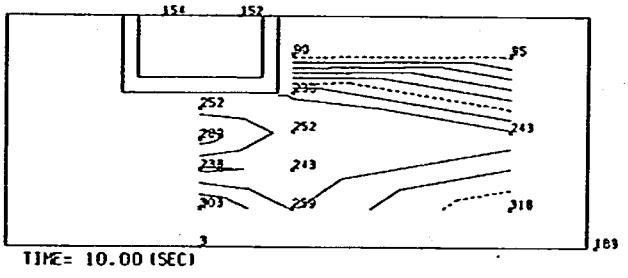


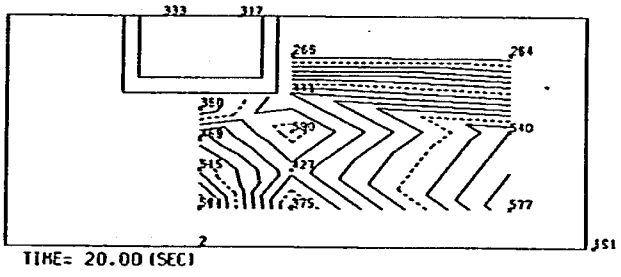


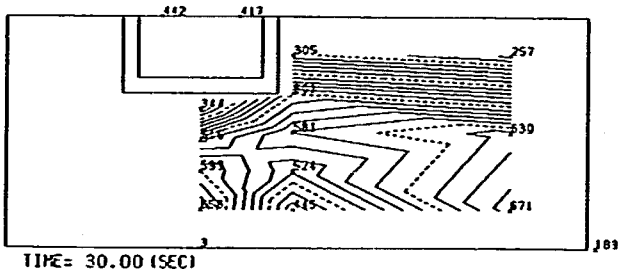


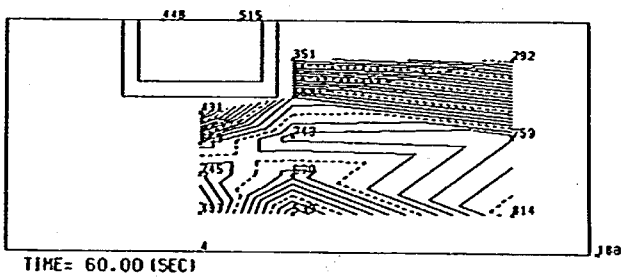




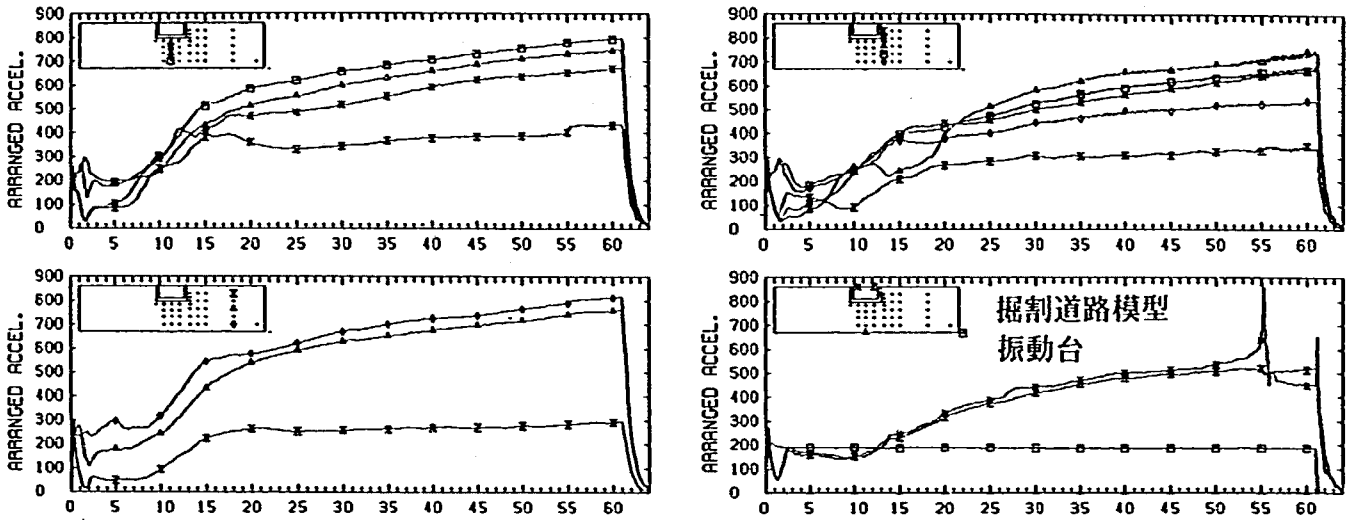




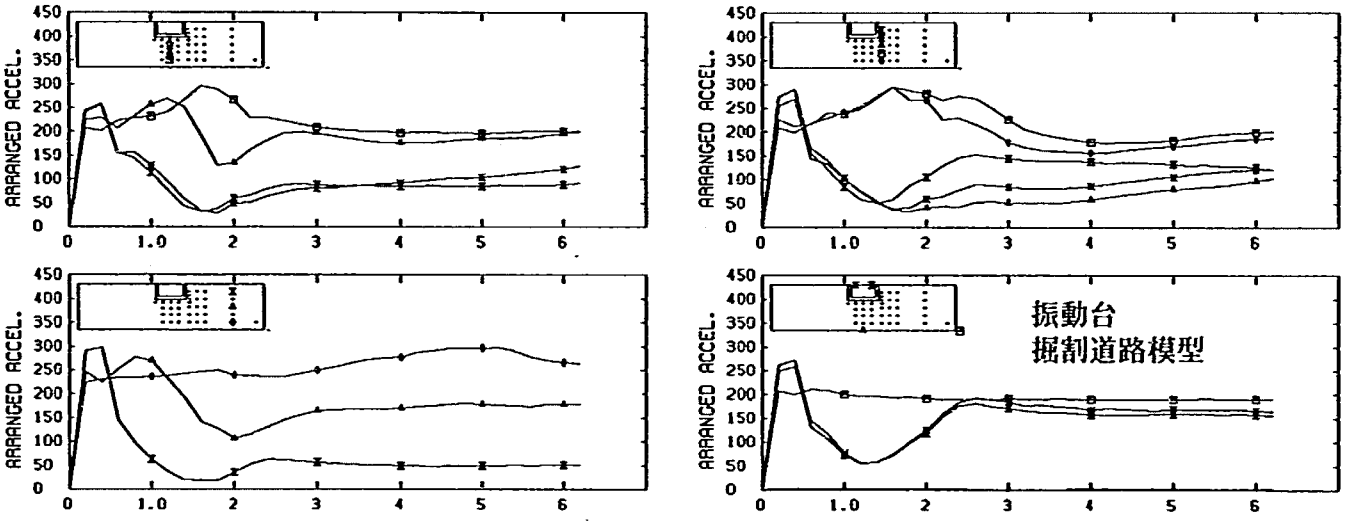




付図－４・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal、模型－５）

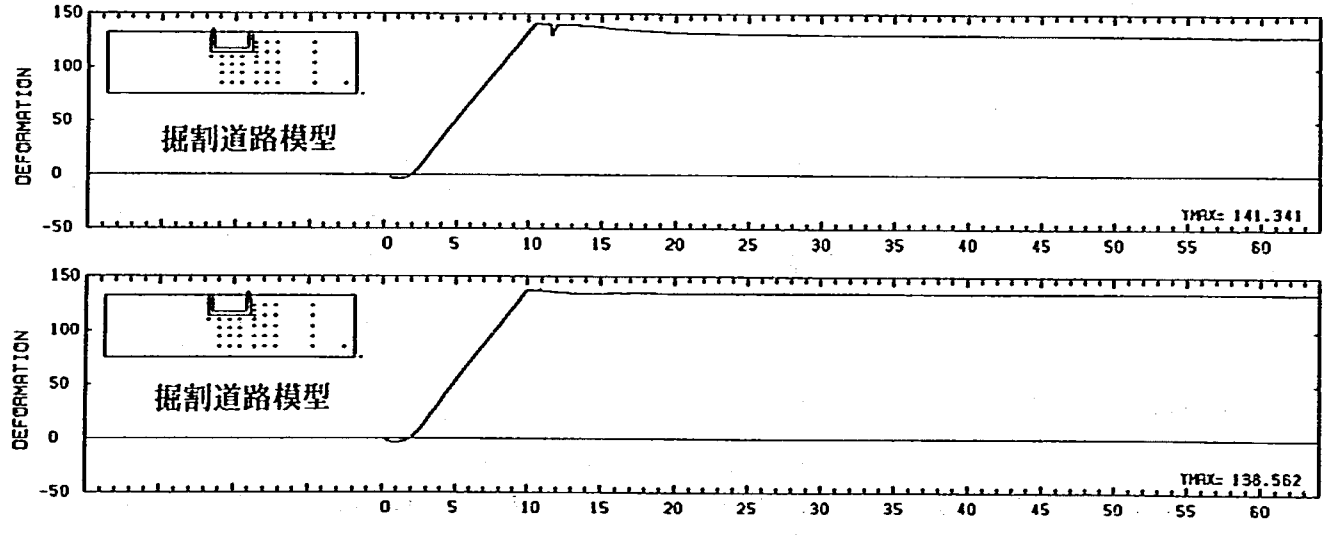


（ａ）全時間領域

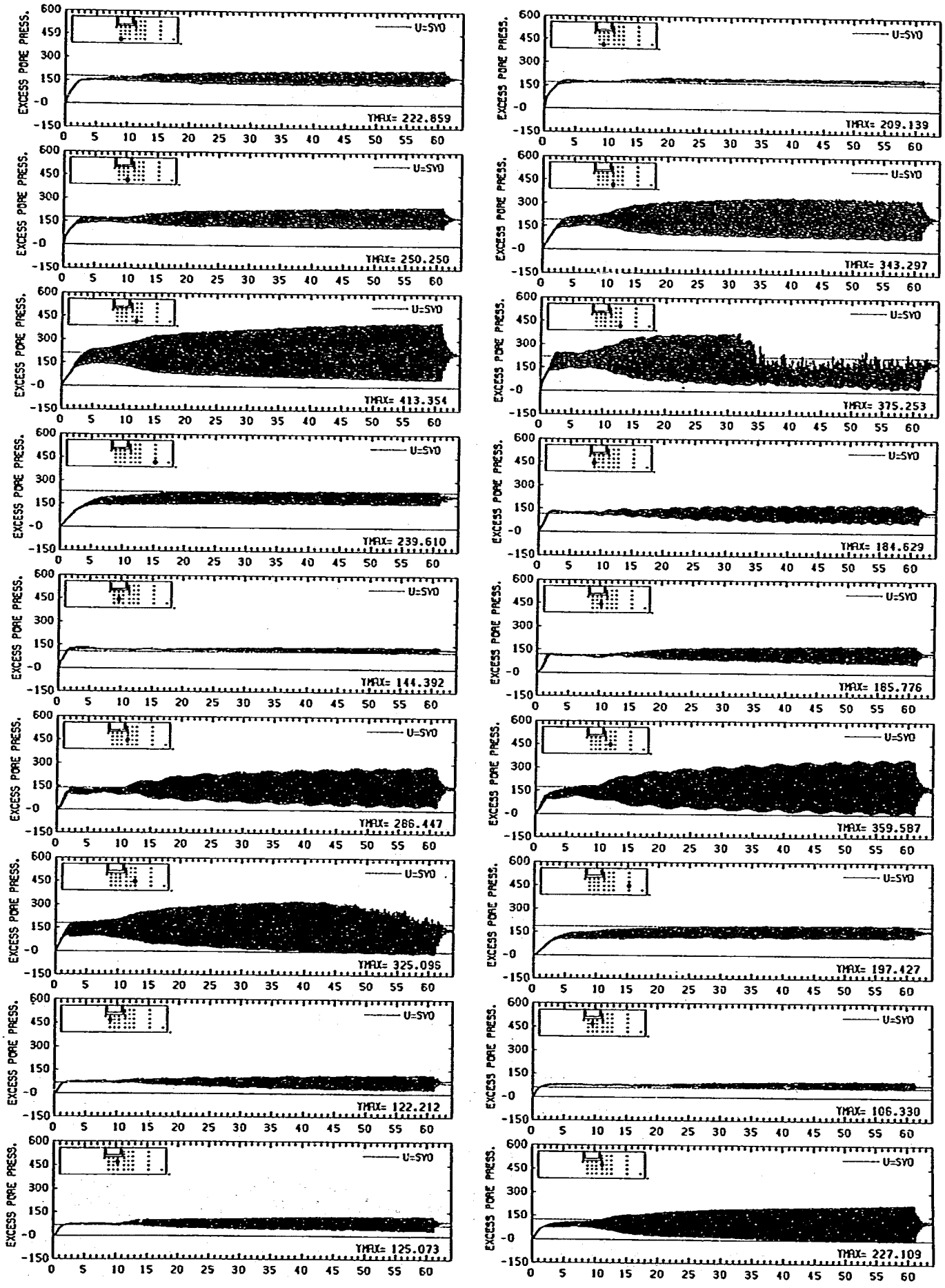


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

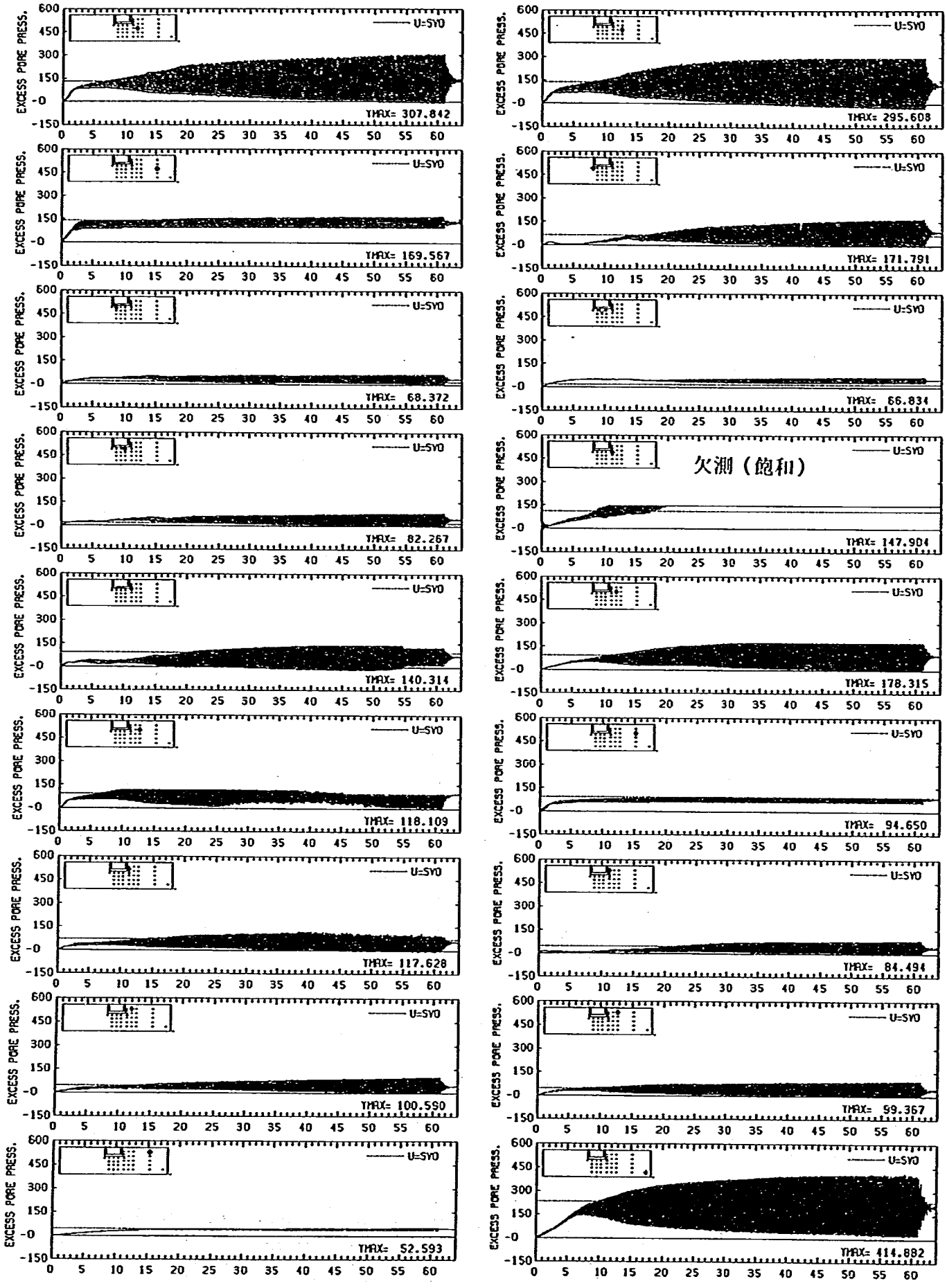
付図－４・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－５）



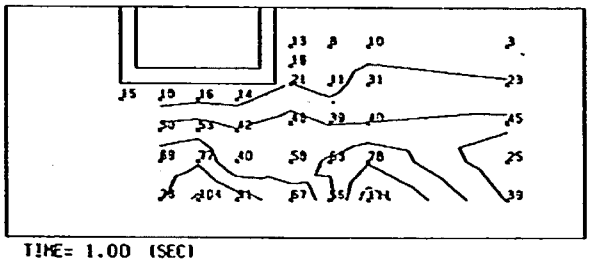
付図－４・６　変位計による掘割道路模型の浮上量の測定結果（単位：㎜、模型－５）

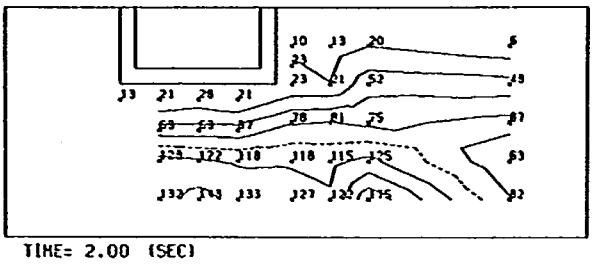


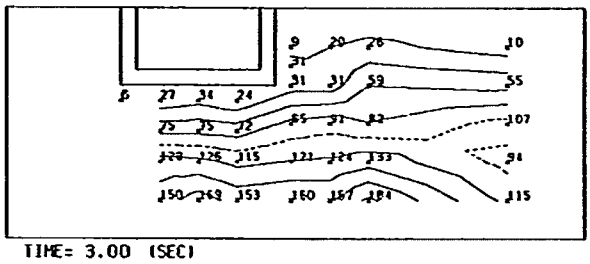
付図－４・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－５）

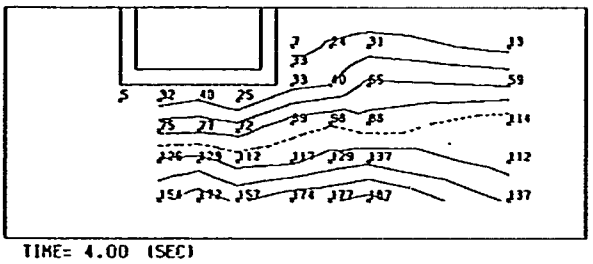


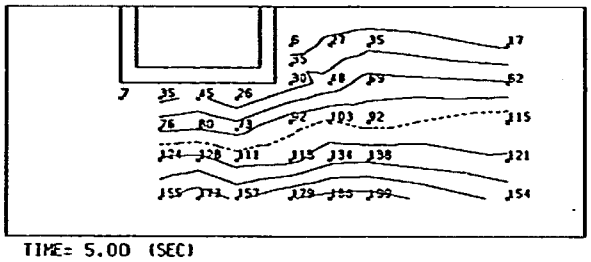
付図－４・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－５）

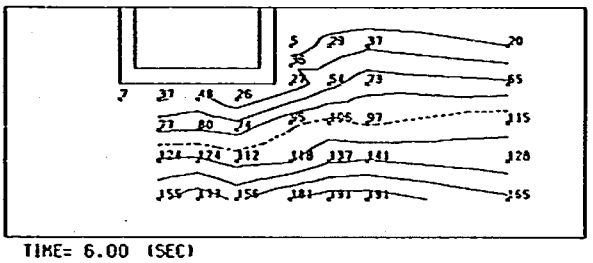


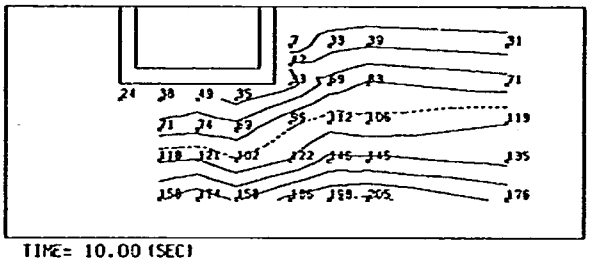


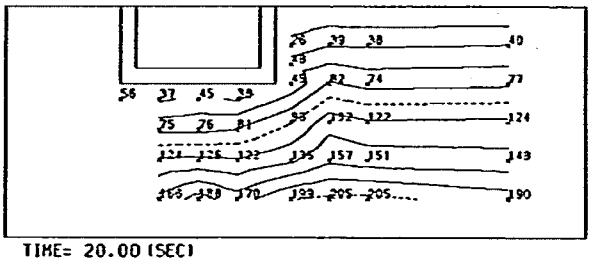


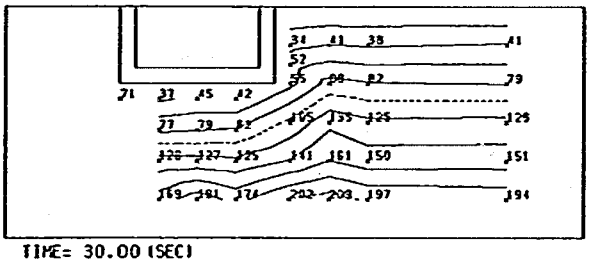


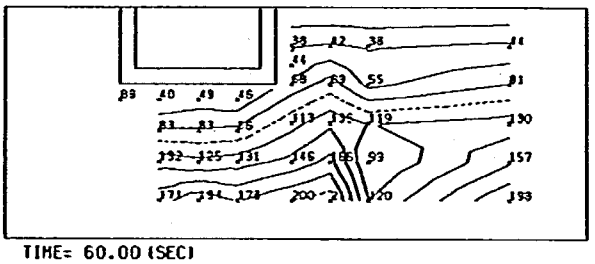




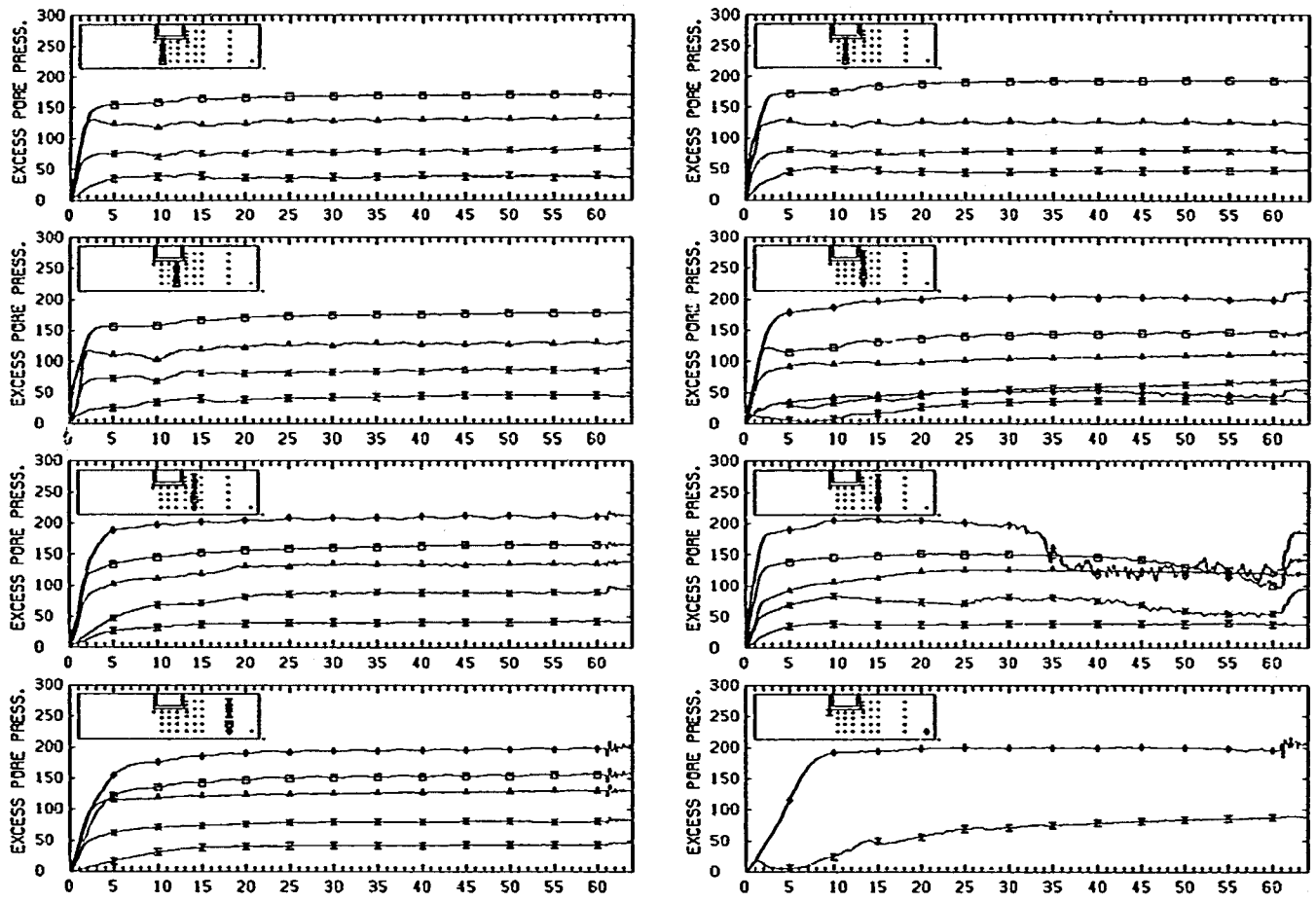




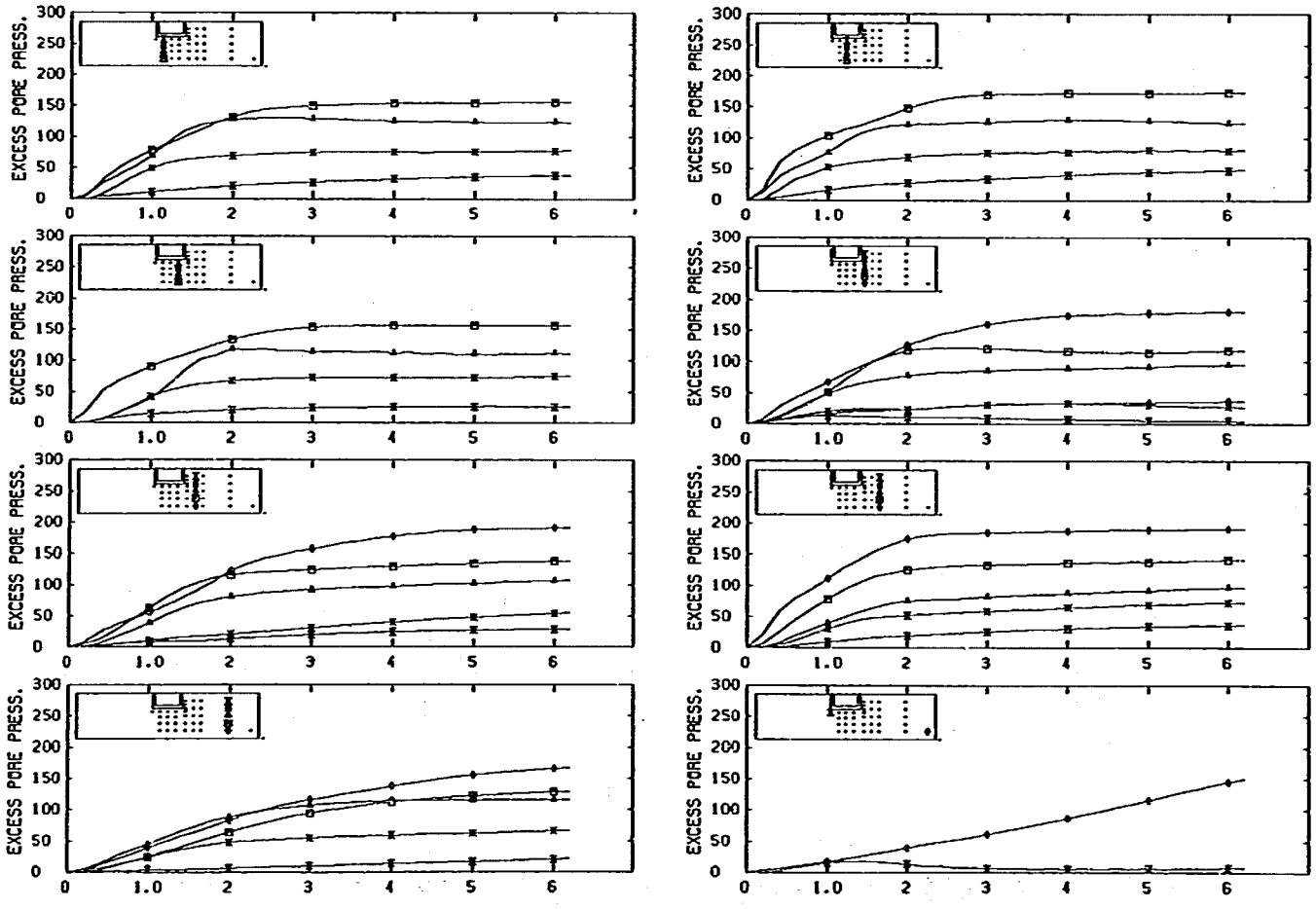




付図－４・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm²、模型－５）

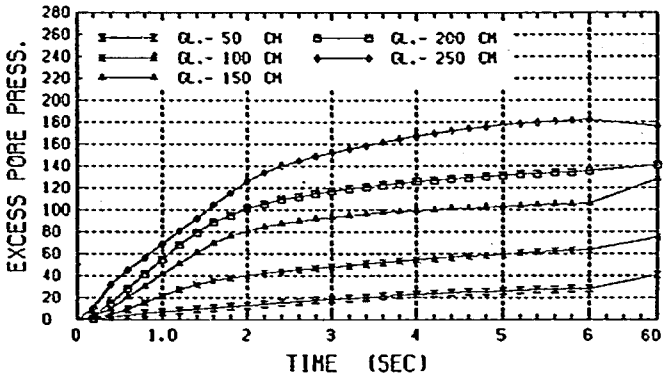


（ａ）全時間領域

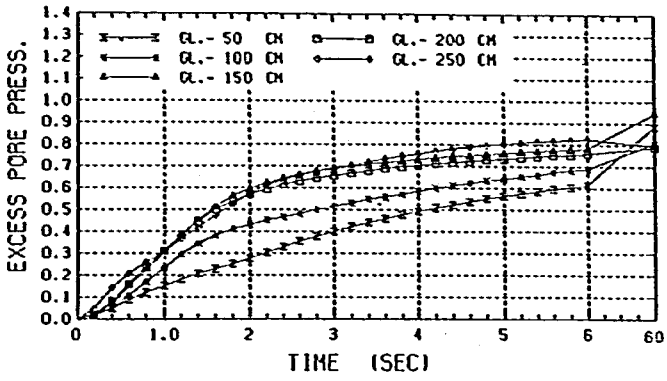


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

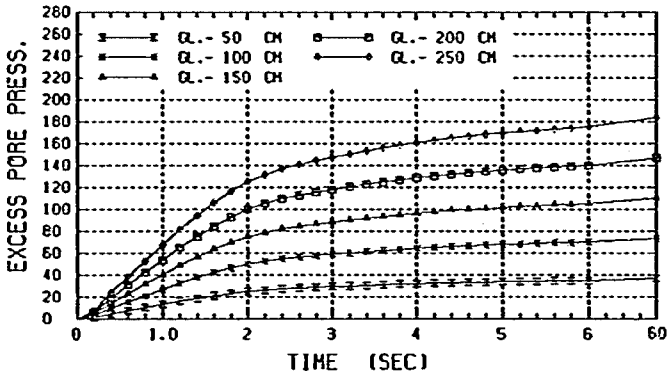
付図－４・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－５）



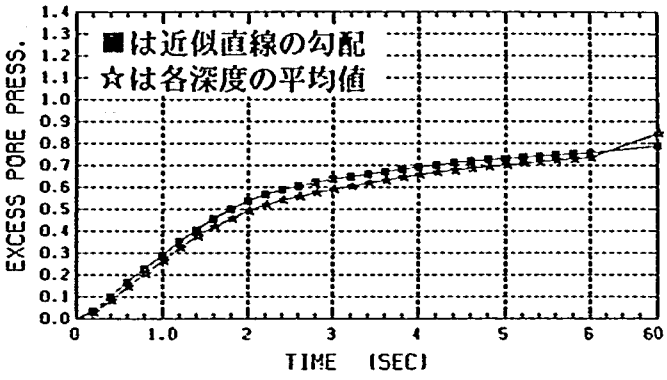
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



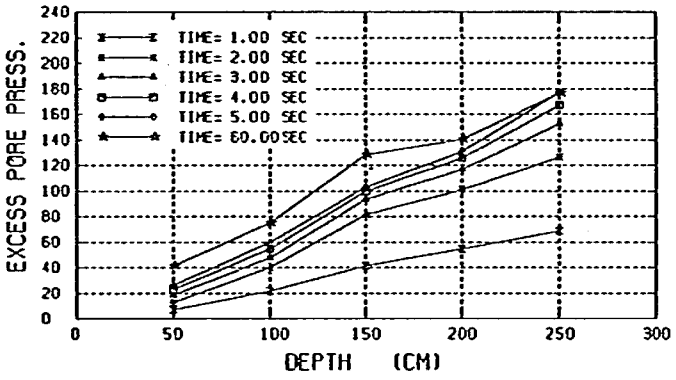
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



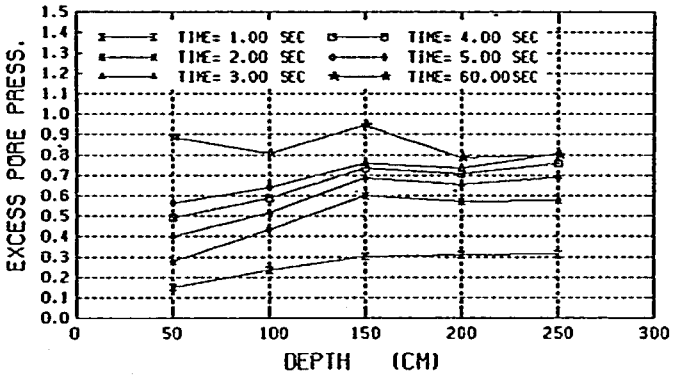
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



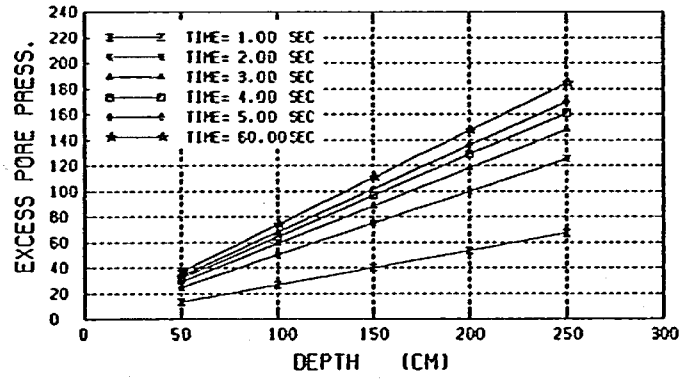
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



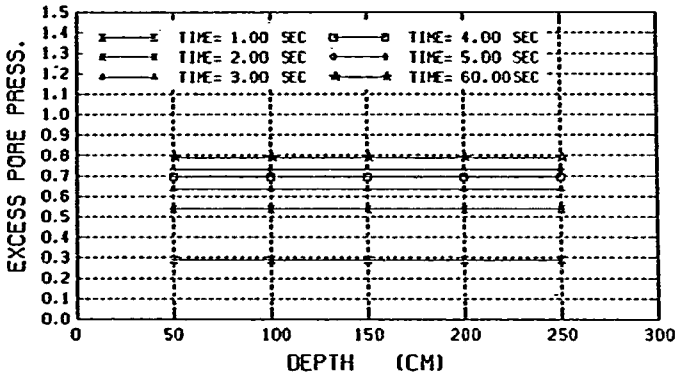
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

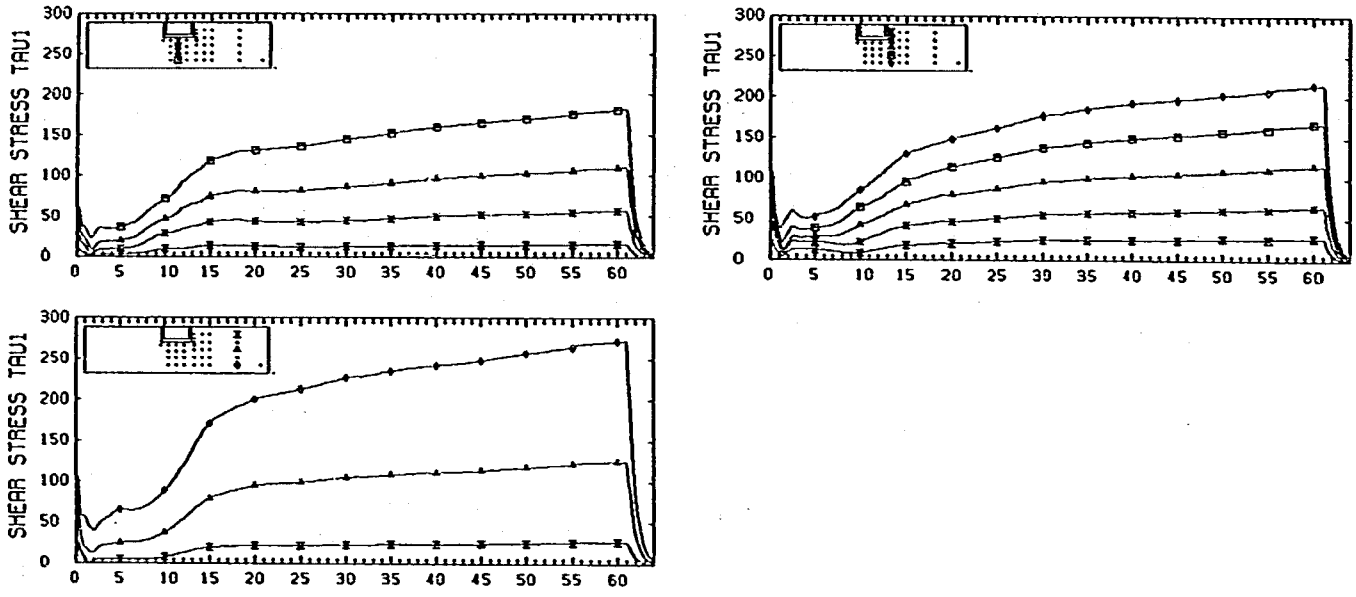


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

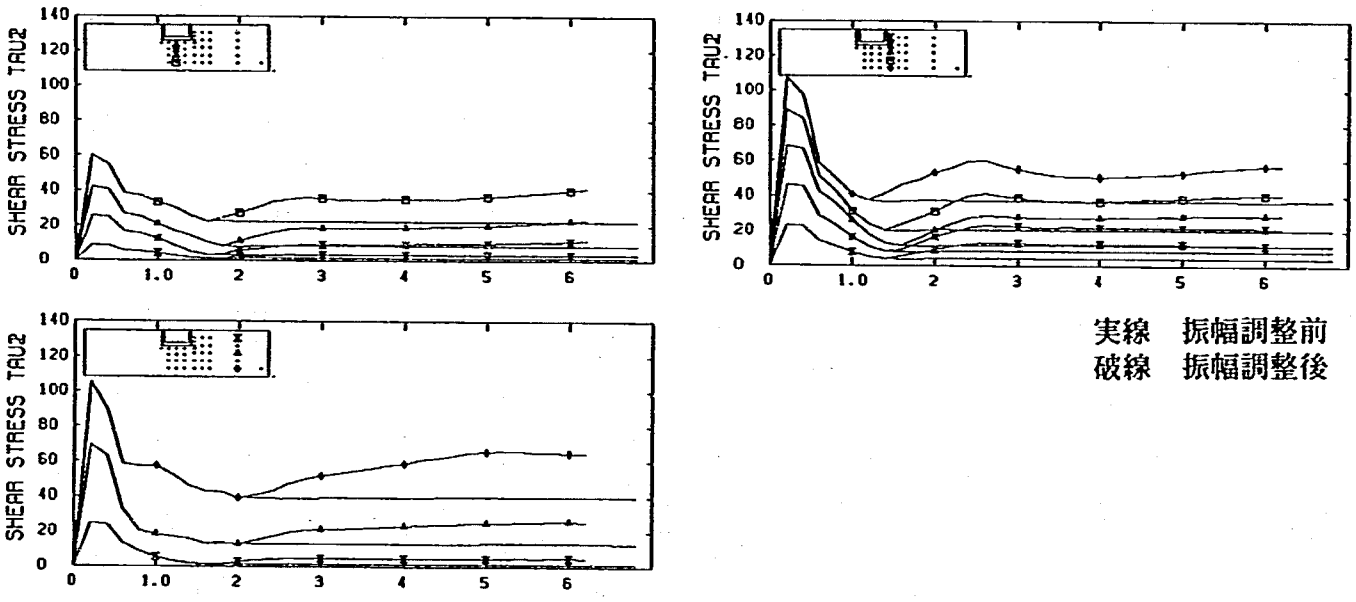


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

付図－４・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－５）



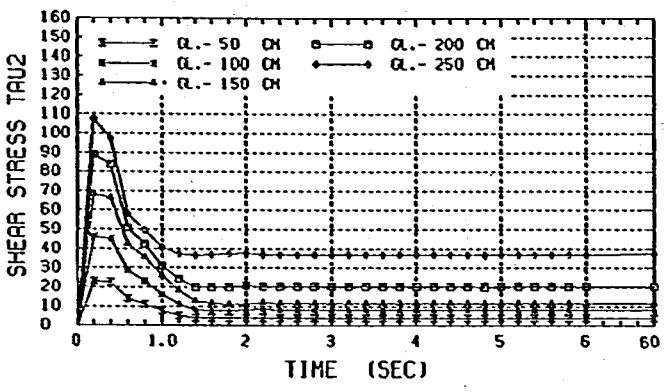
（ａ）全時間領域



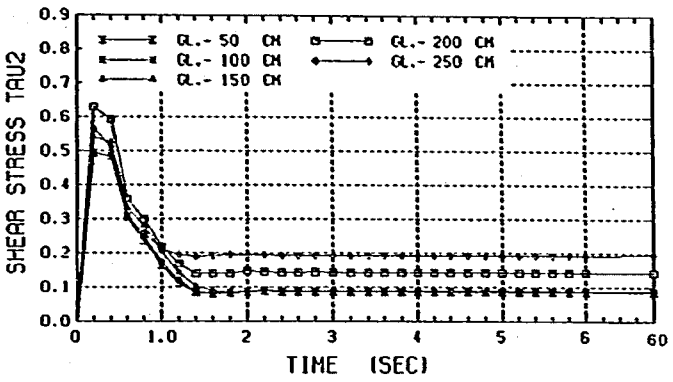
実線　振幅調整前
破線　振幅調整後

（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

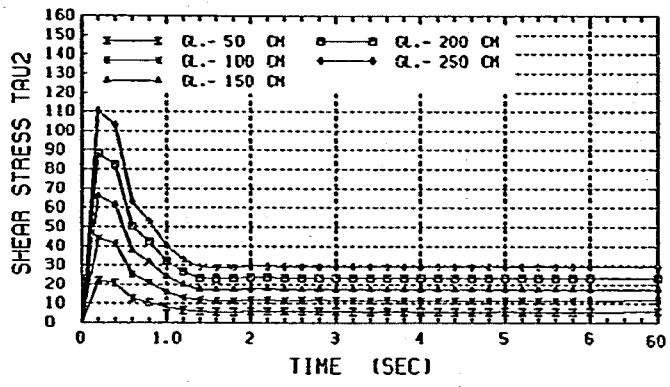
付図－４・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－５）



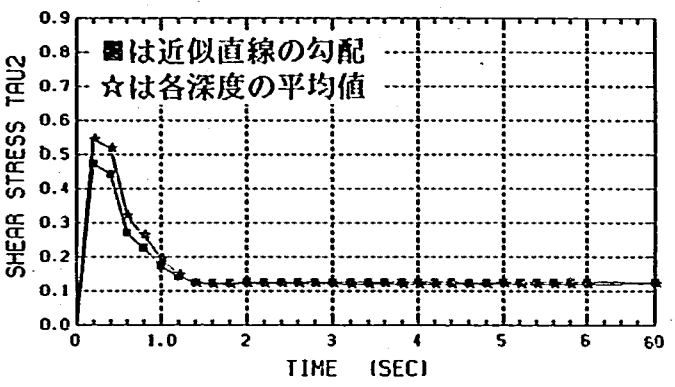
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



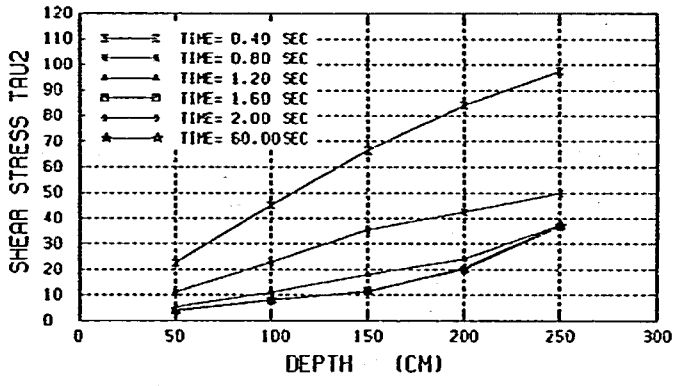
（ｂ）同左のせん断応力比



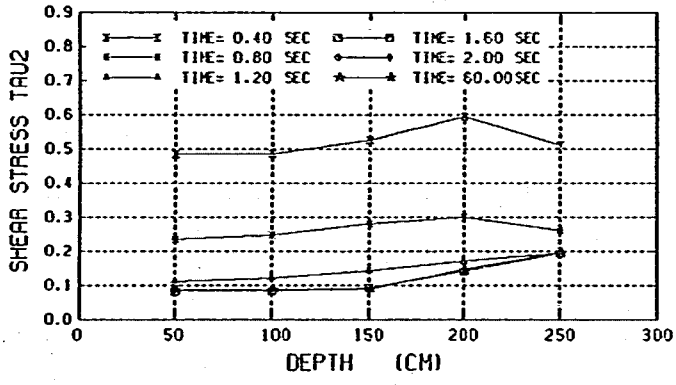
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



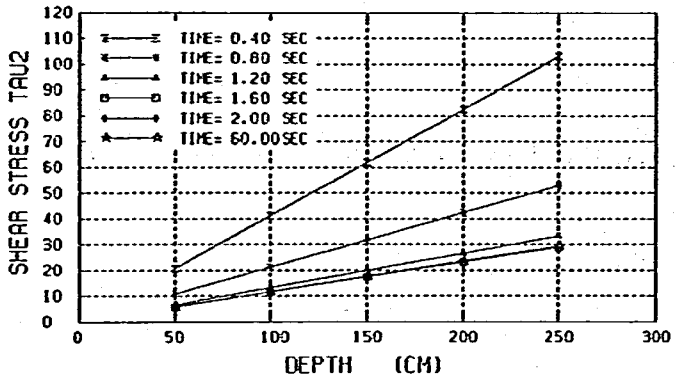
（ｄ）同左のせん断応力比



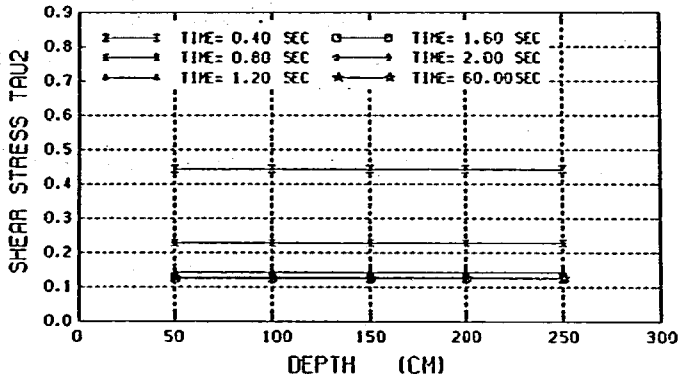
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

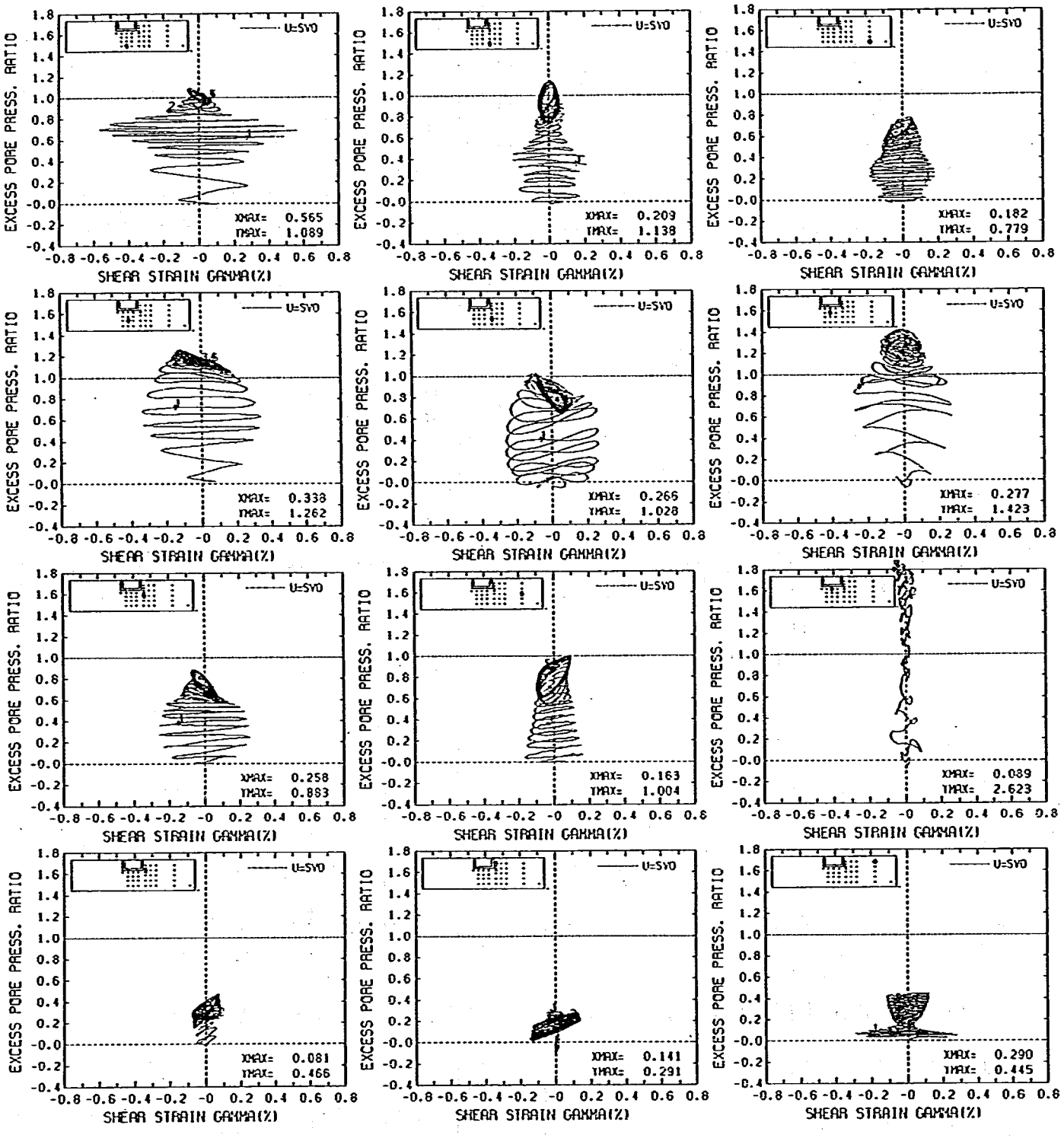


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

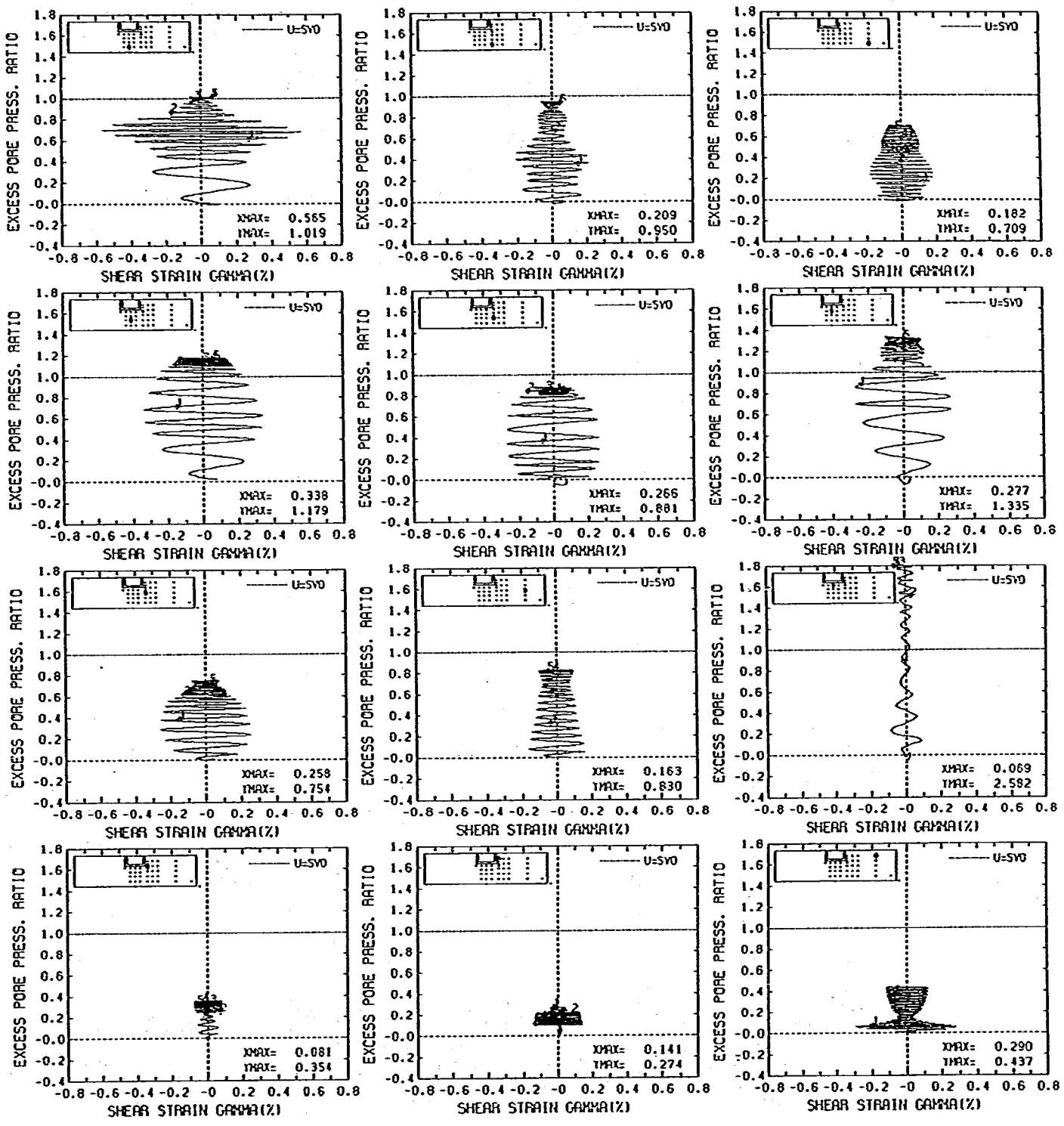


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

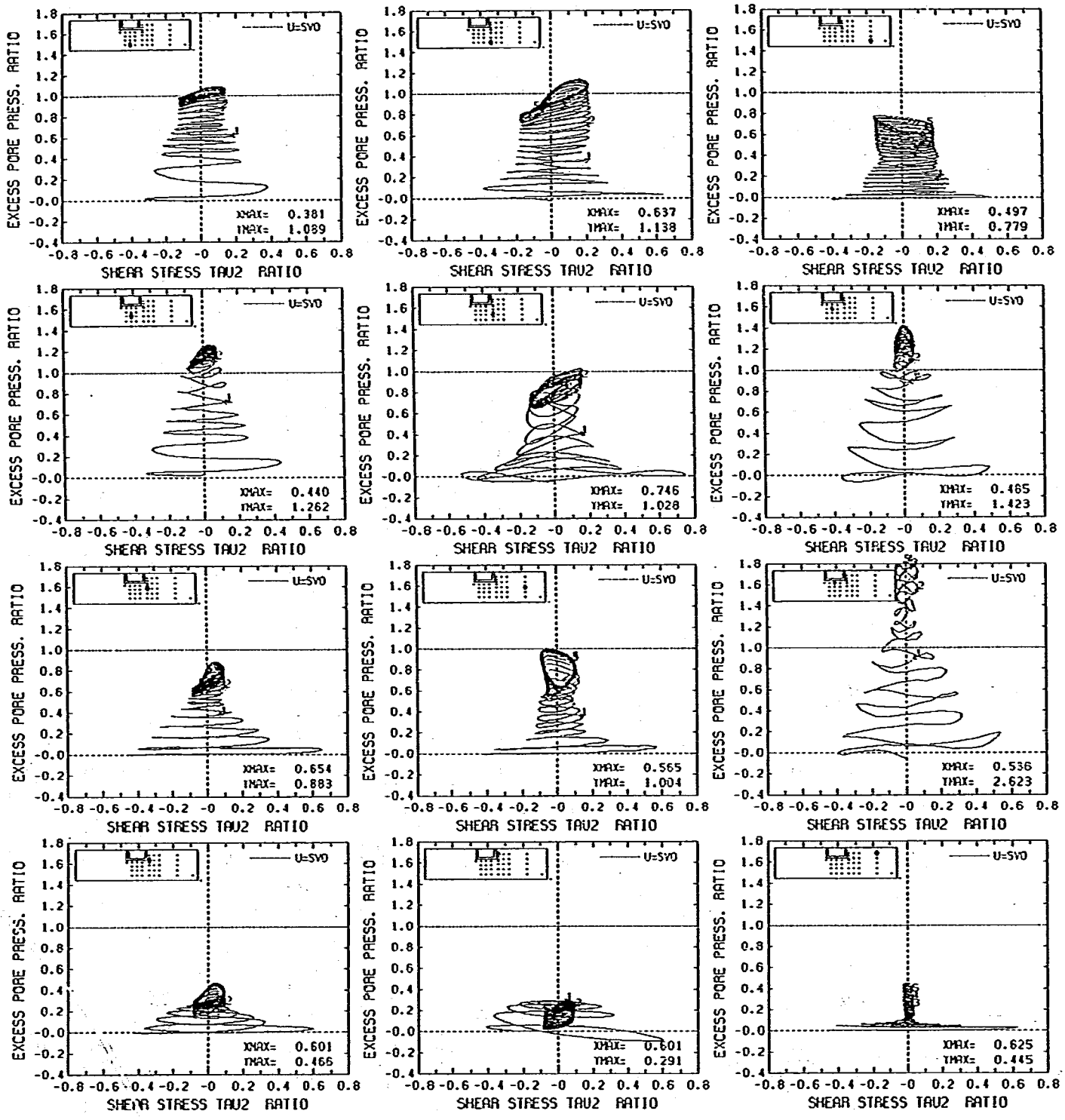
付図－４・13　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－５）



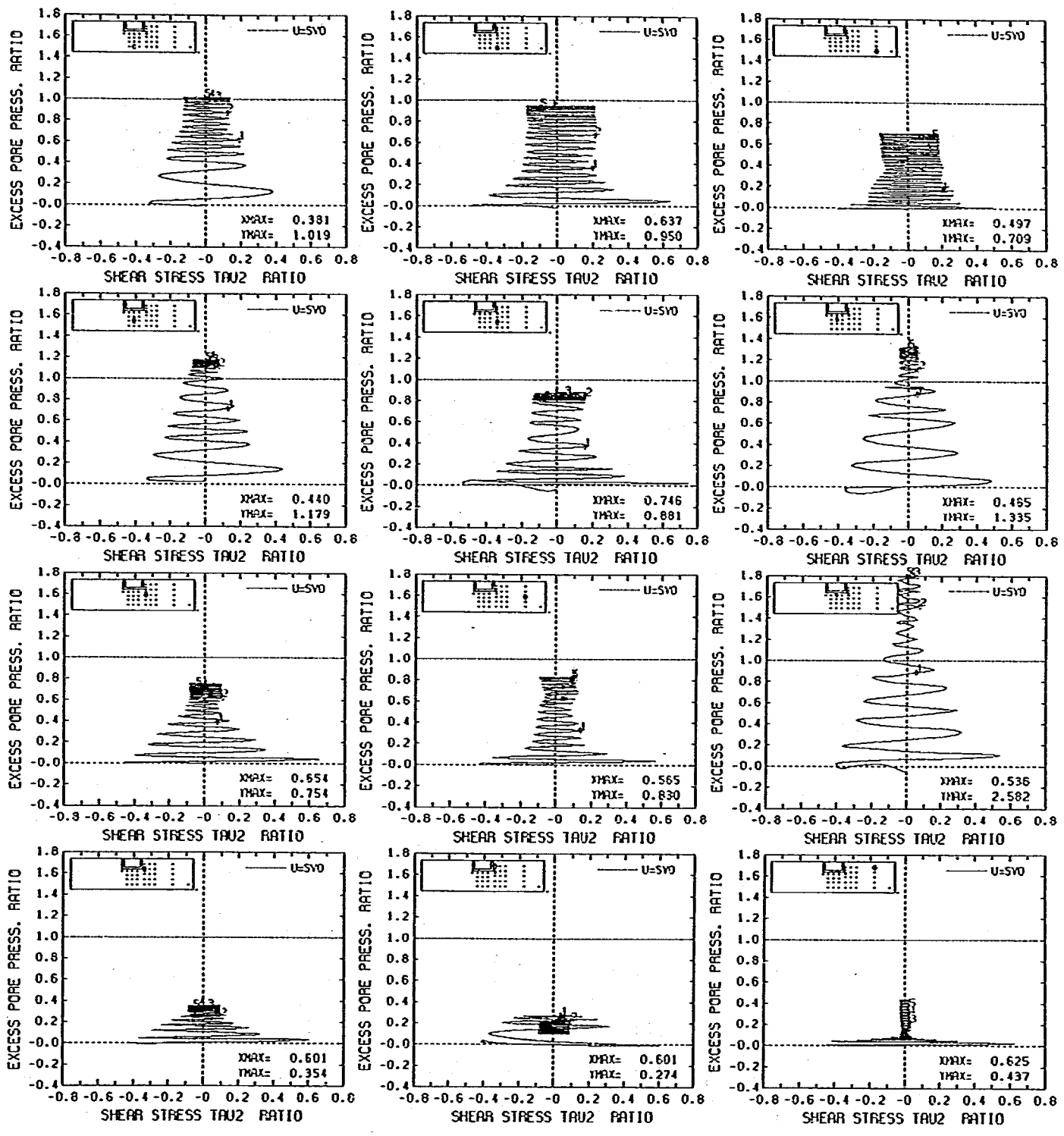
付図－４・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－５）



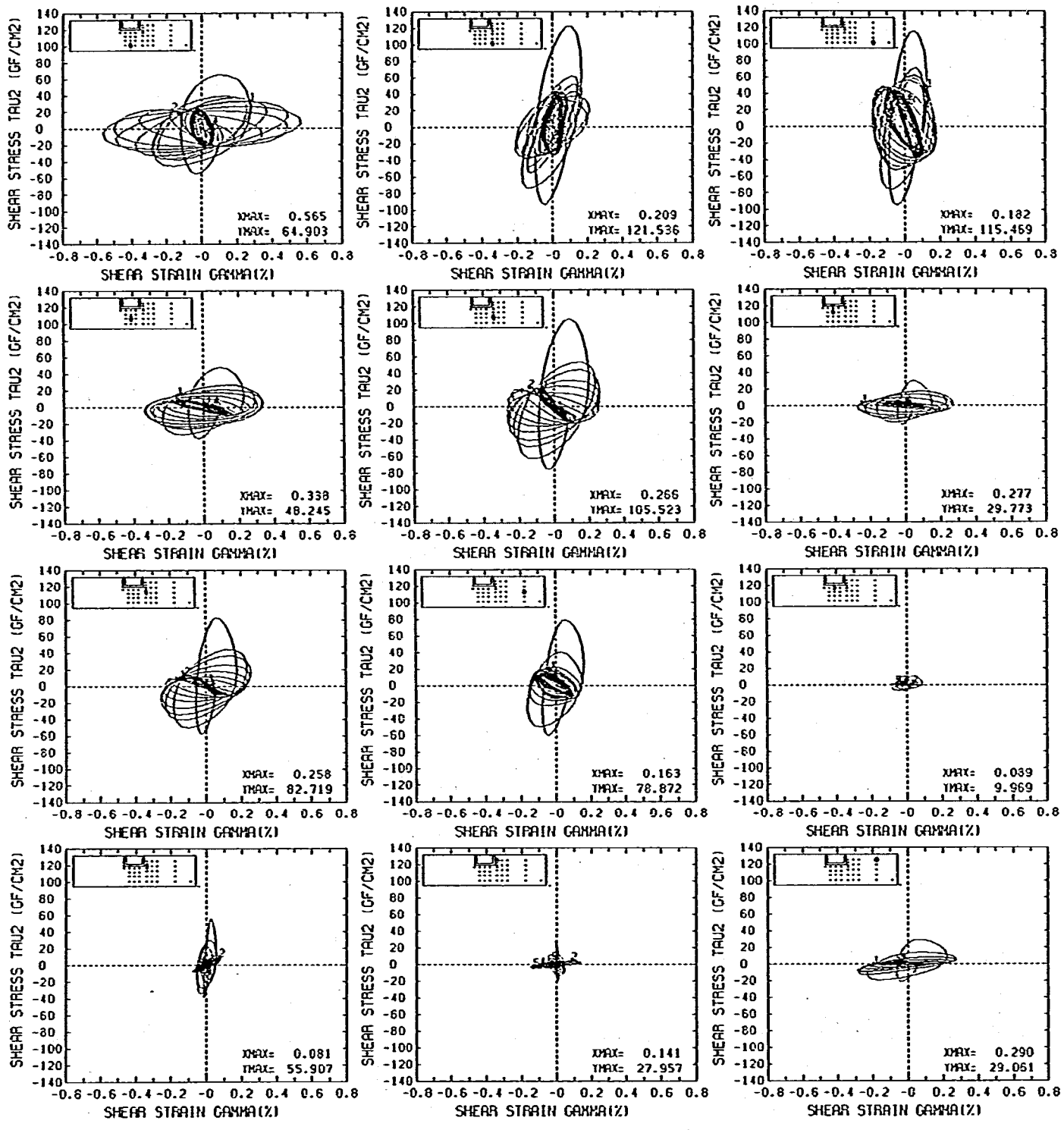
付図－4・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－5）



付図－４・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－５）

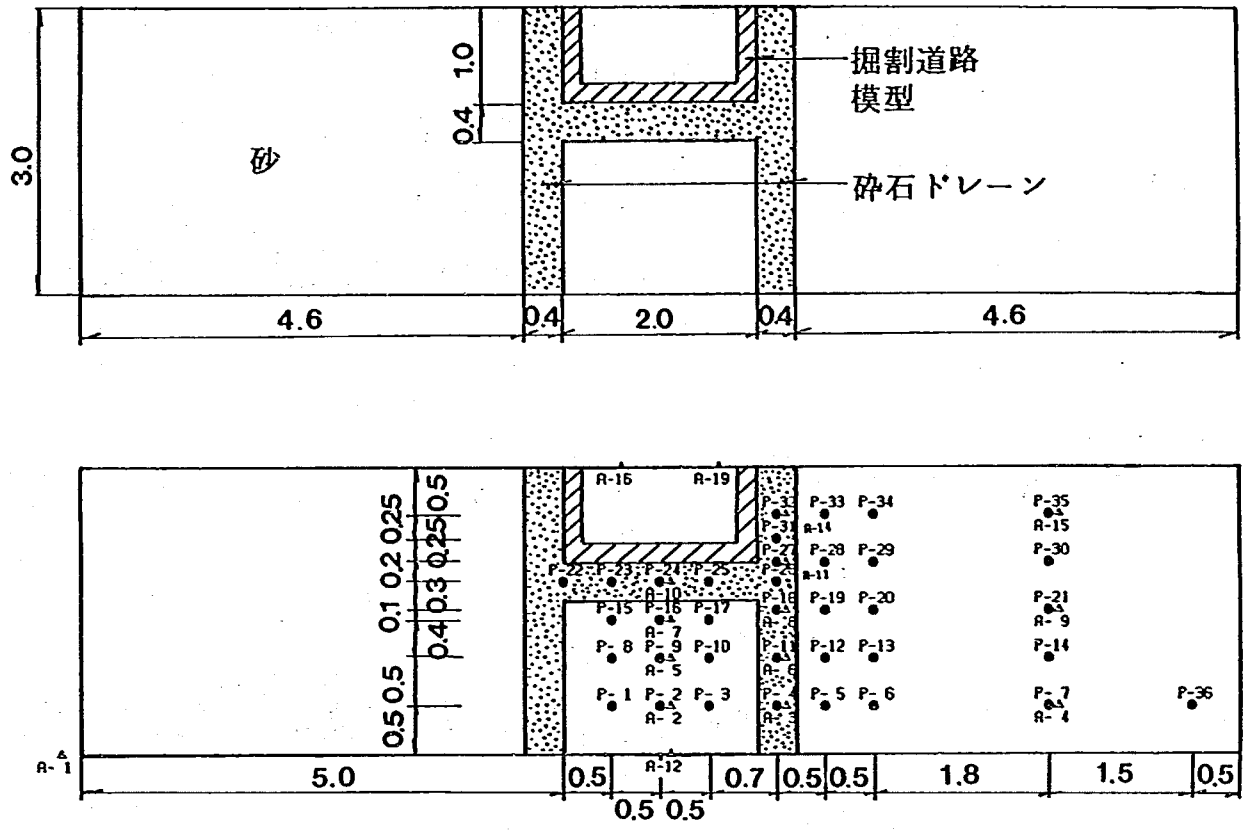


付図－４・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－５）



付図－４・18　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－５）

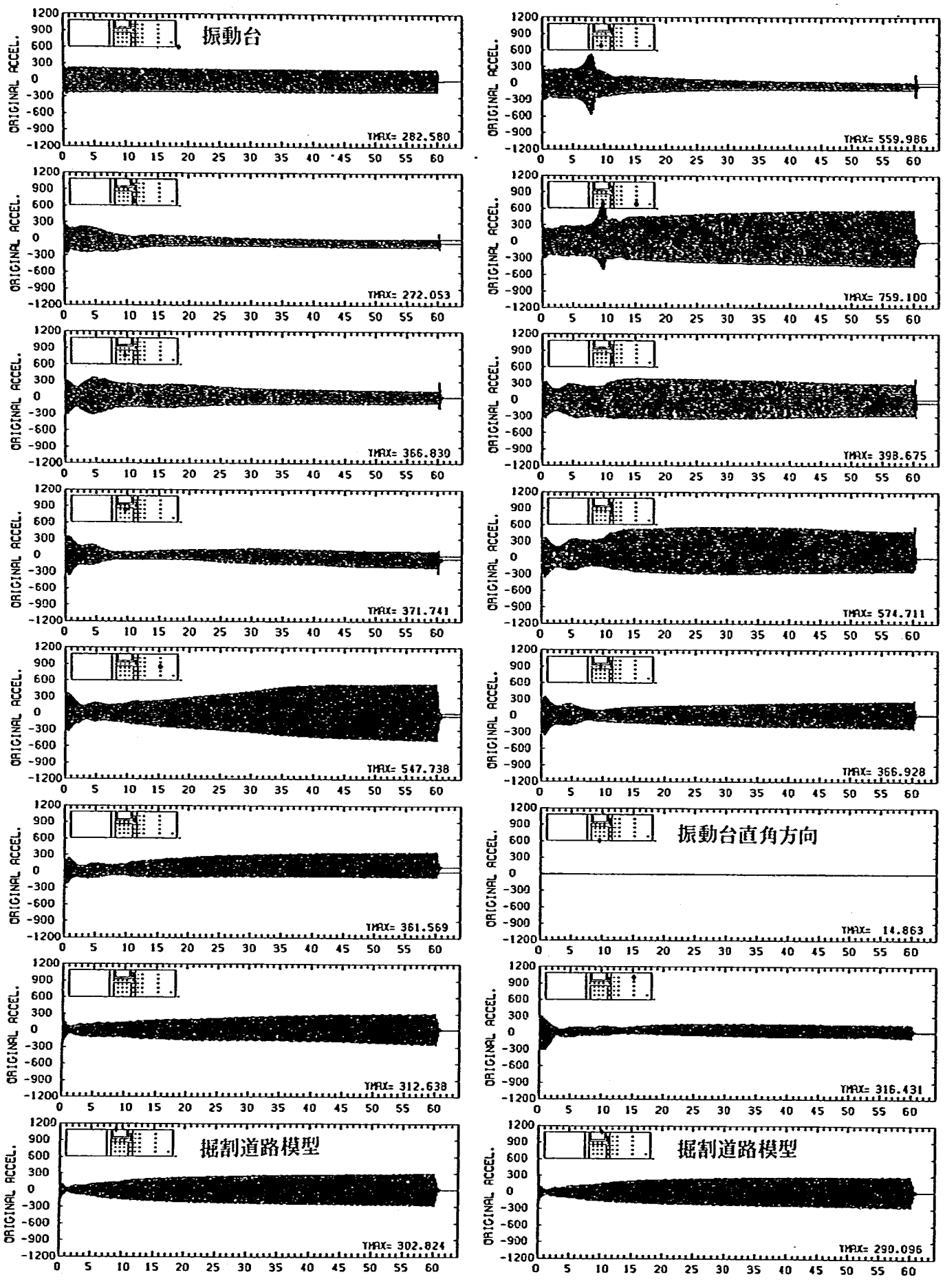
模型 6



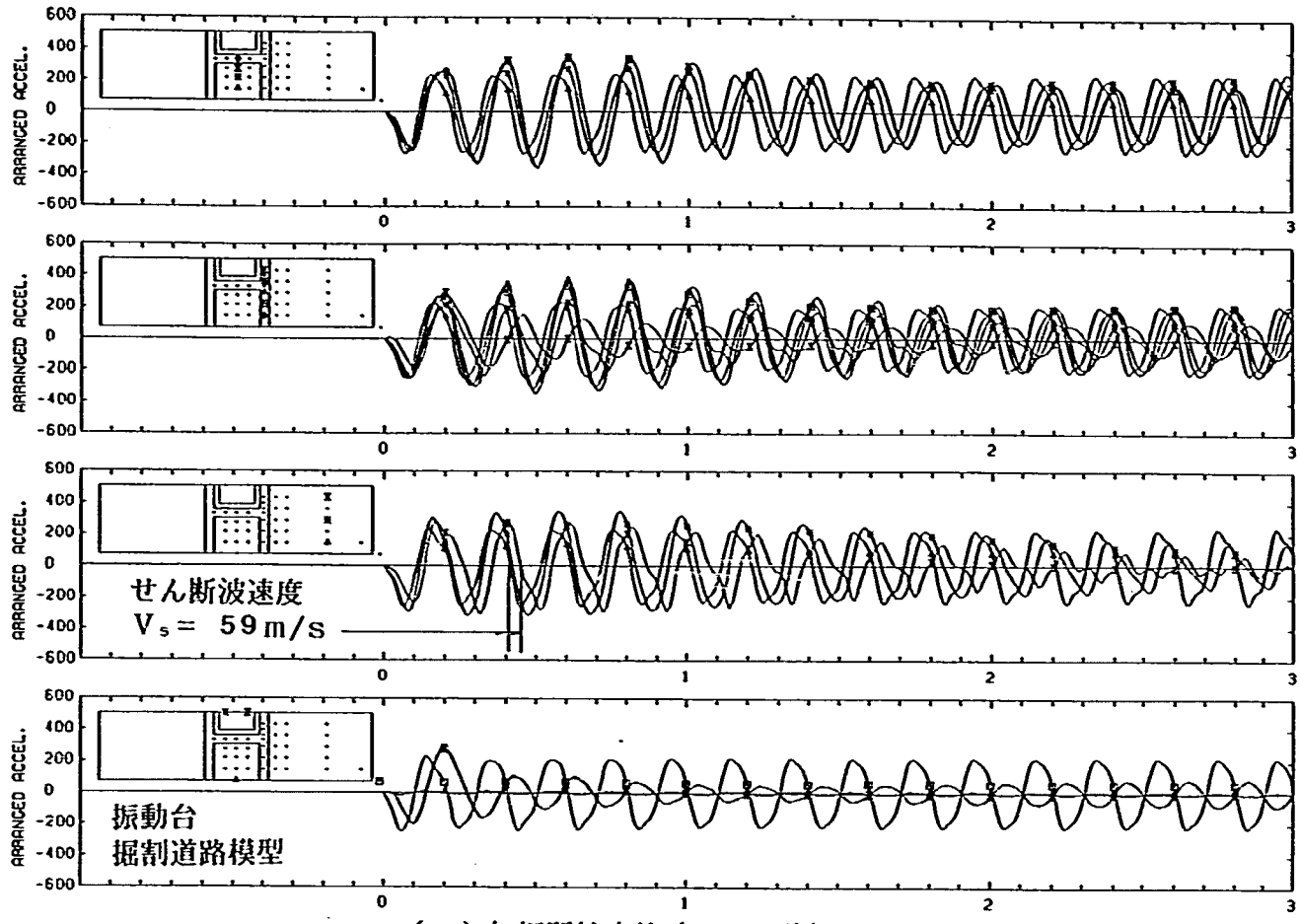
● P－ 間隙水圧計 （３６）
△ A－ 加速度計 （１６）
＊ D－ 変 位 計 （２）

A－１は振動台加速度
A－１２は加振直角方向
A－１６，A－１９は掘割道路模型上の手前側と奥側

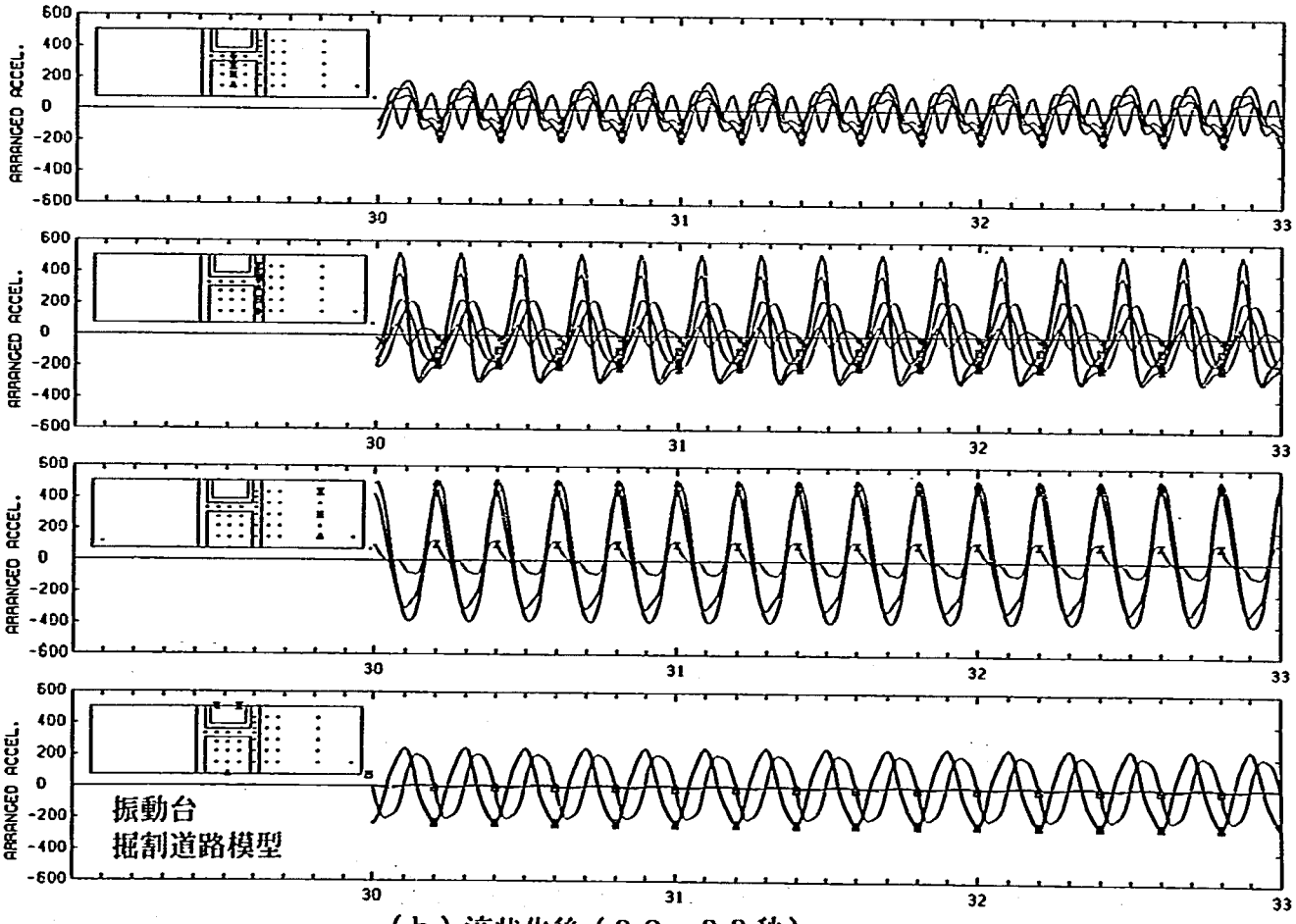
付図－５・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－６）



付図－５・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－６）

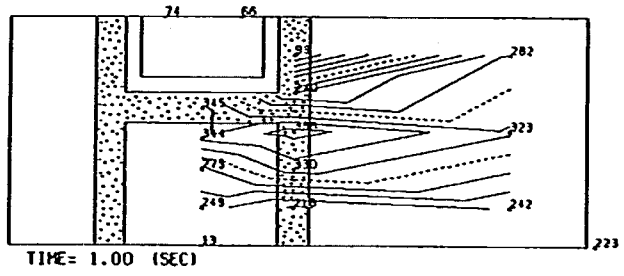


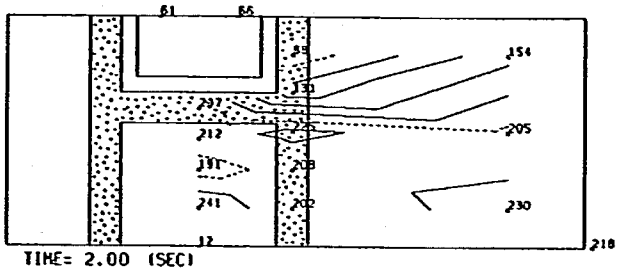
（ａ）加振開始直後（０～３秒）

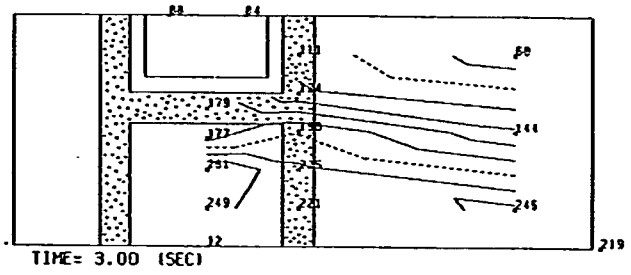


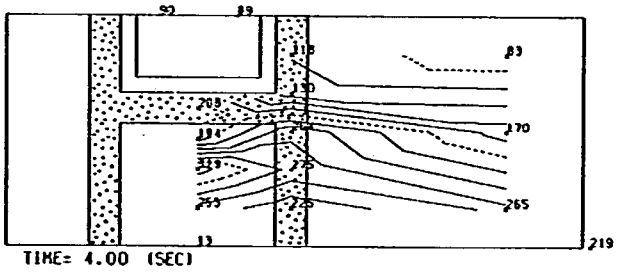
（ｂ）液状化後（３０～３３秒）

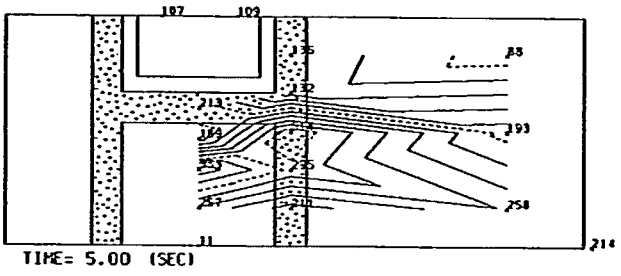
付図－５・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－６）

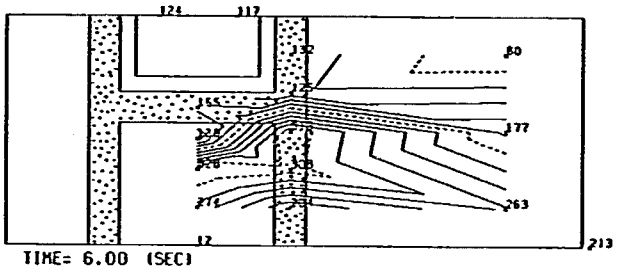


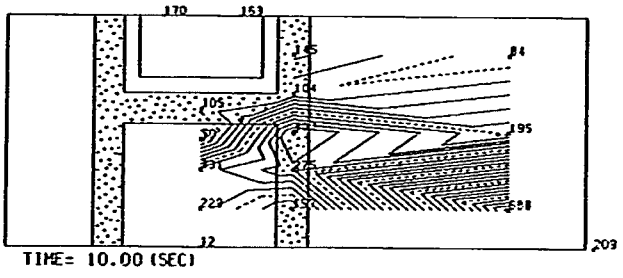


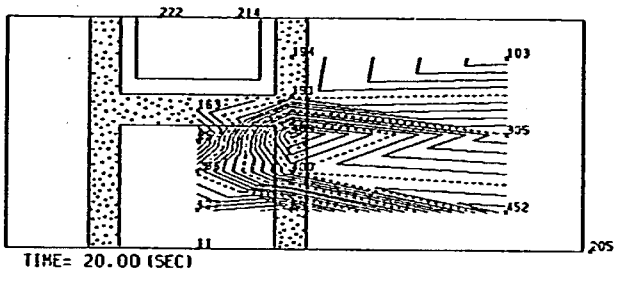


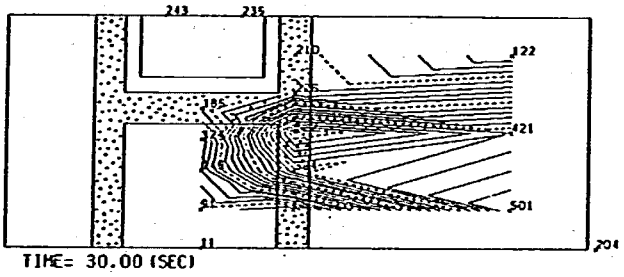


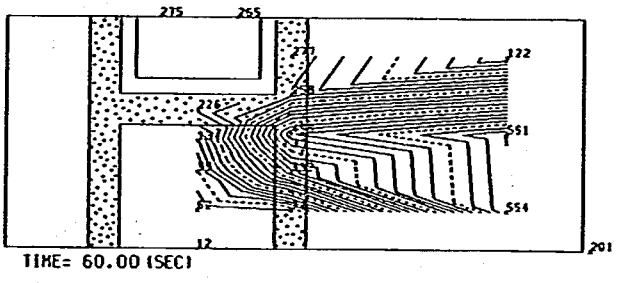




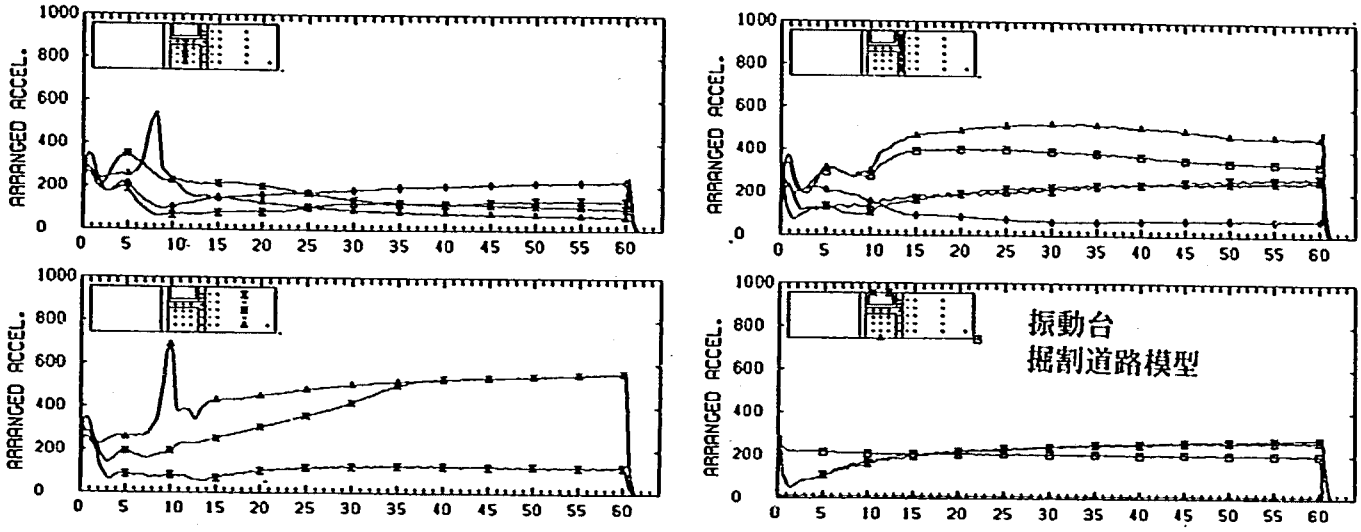




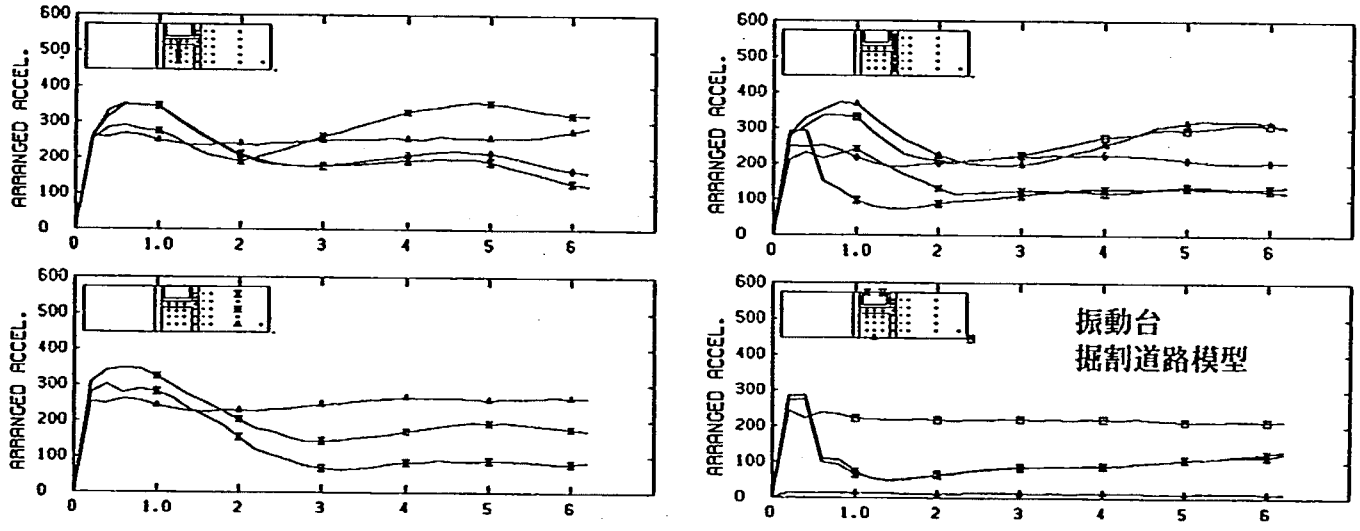




付図－５・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ20gal、模型－６）

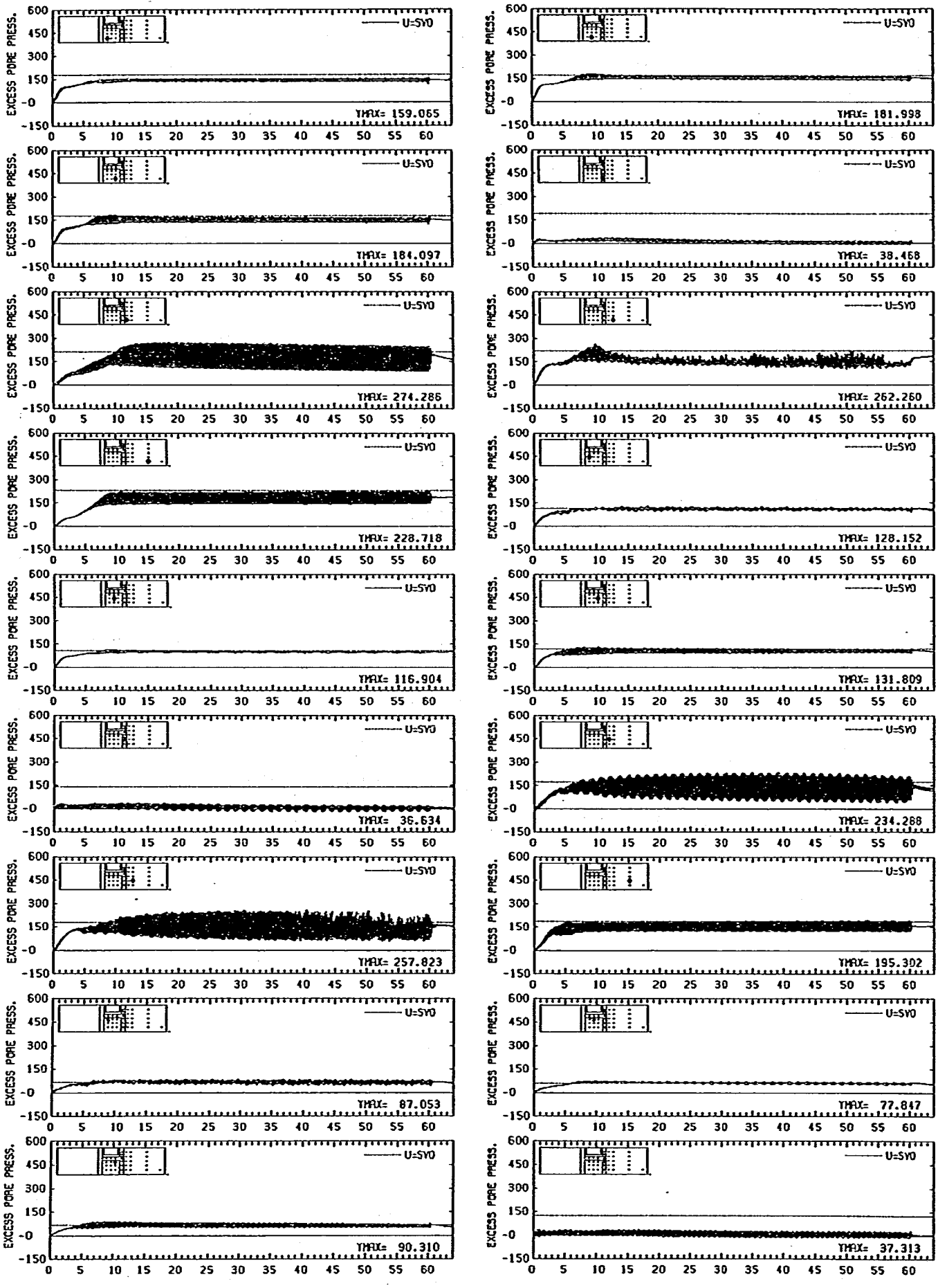


（ａ）全時間領域

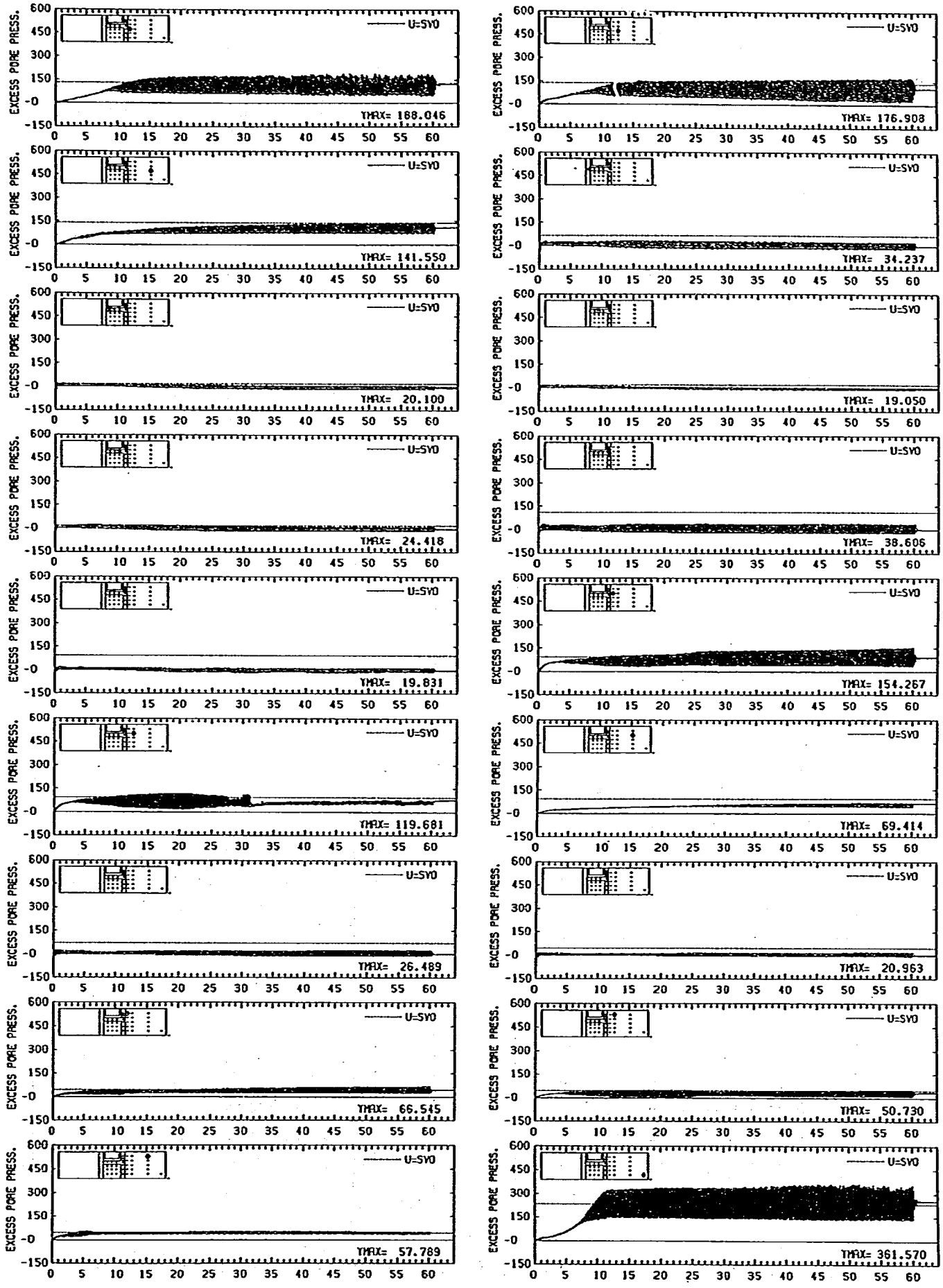


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

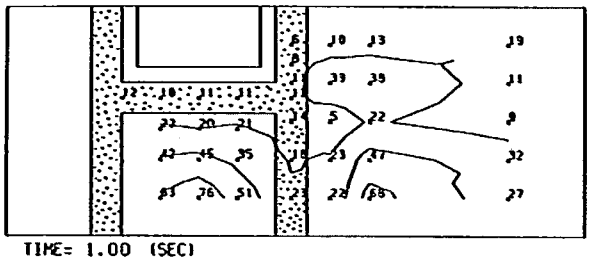
付図－５・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－６）

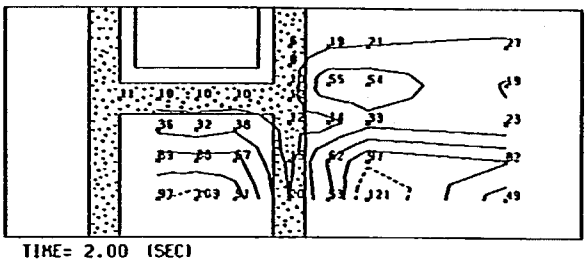


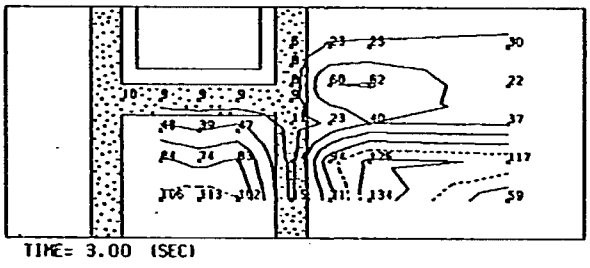
付図－５・６　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－６）

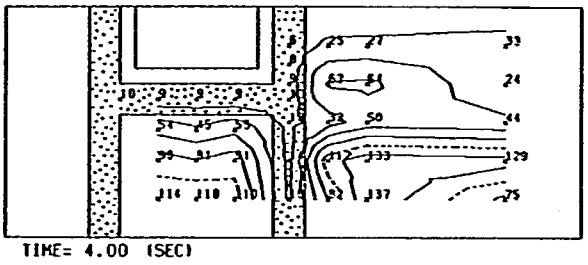


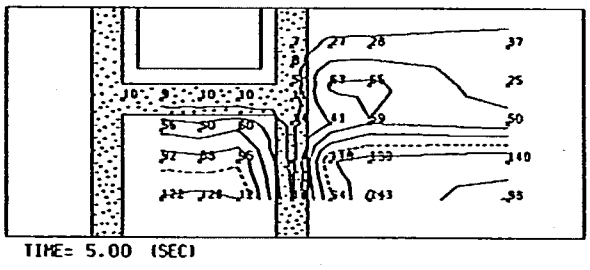
付図－５・７　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－６）

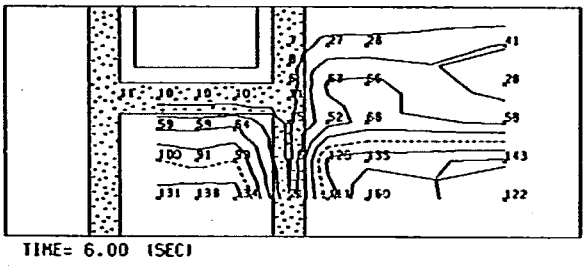


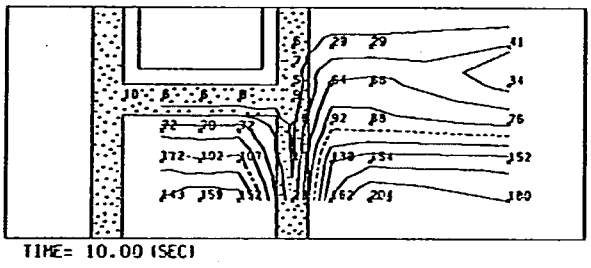


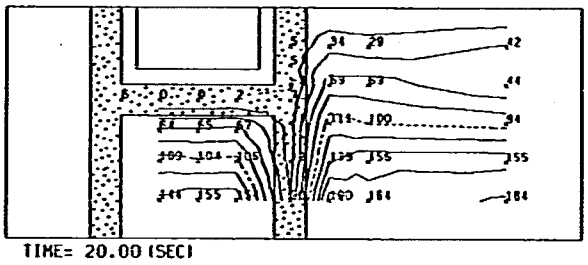


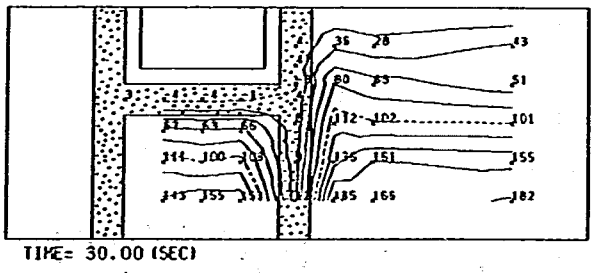


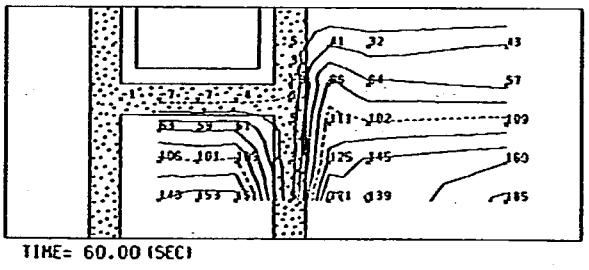




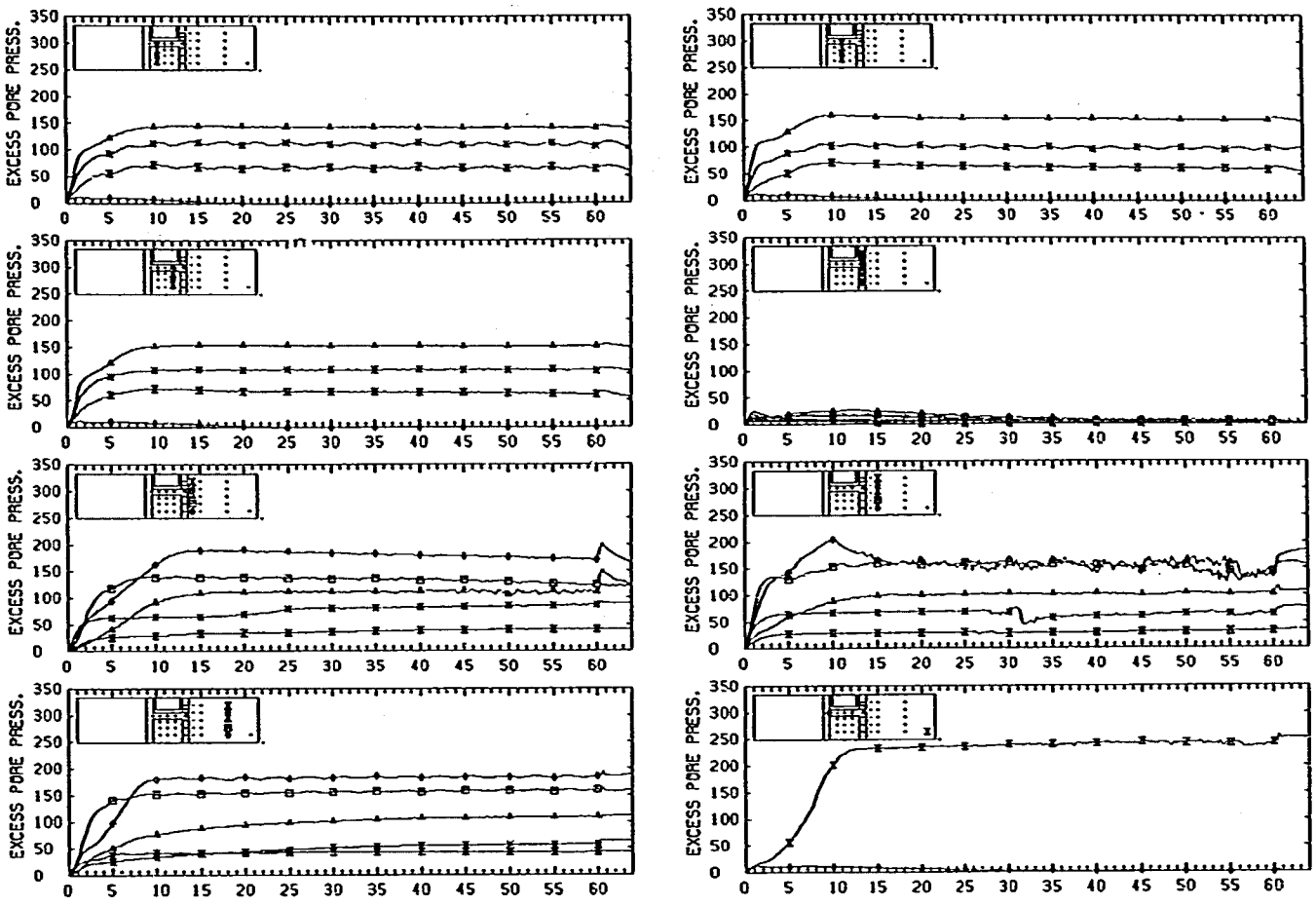




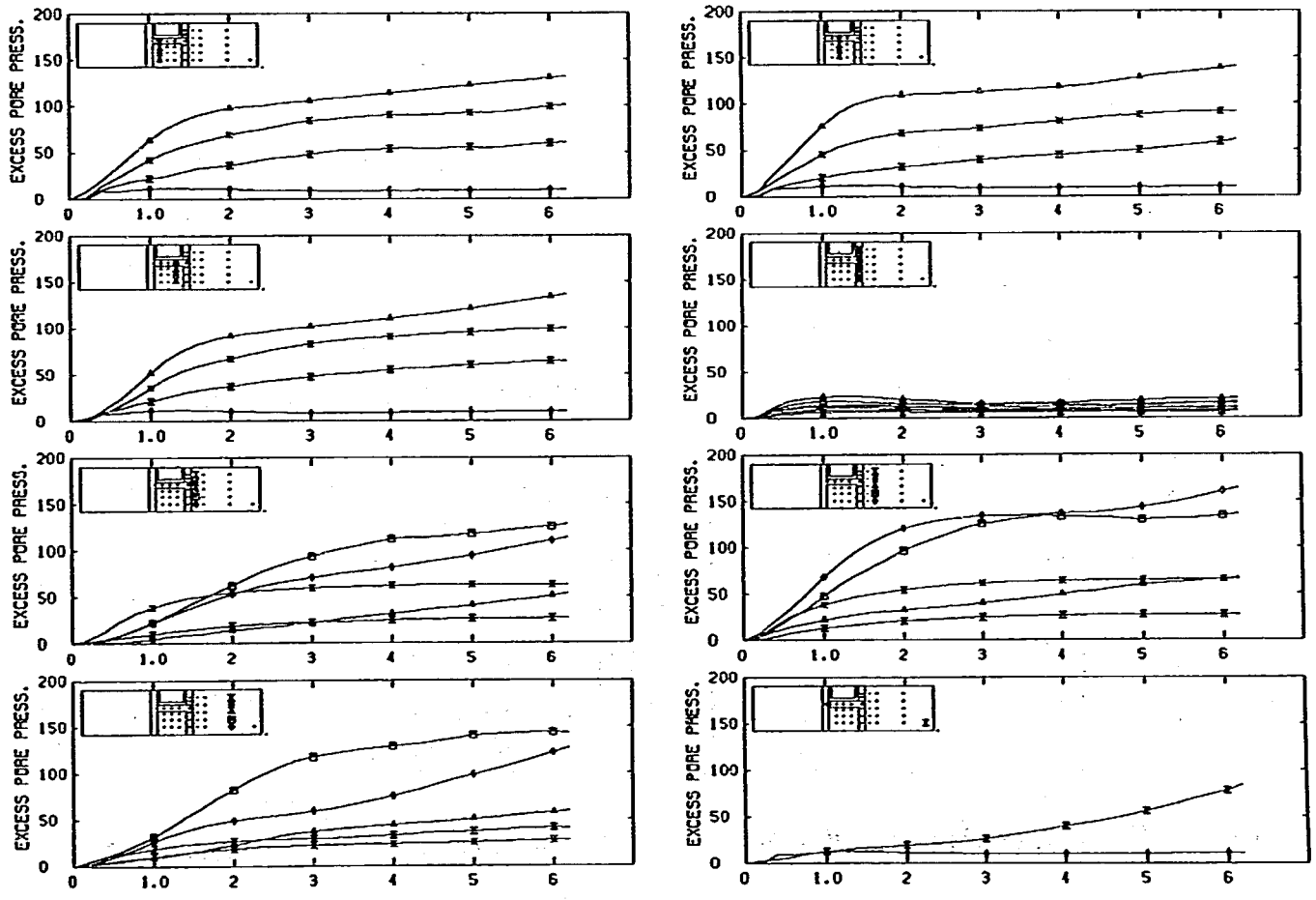




付図－５・８　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－６）

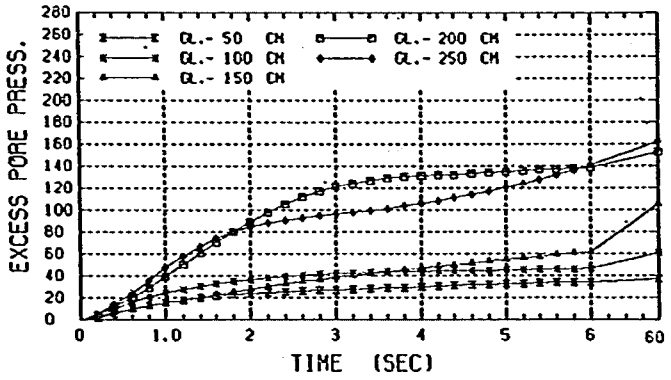


（ａ）全時間領域

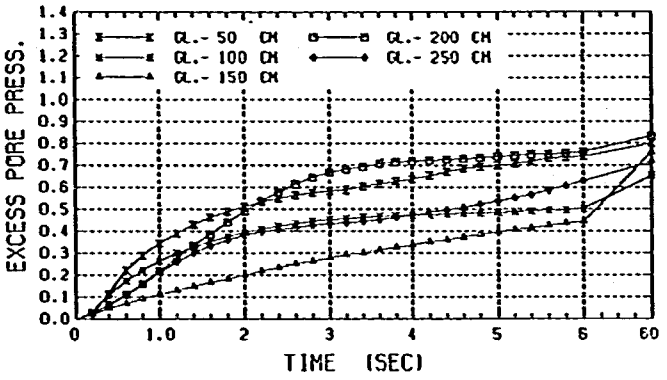


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

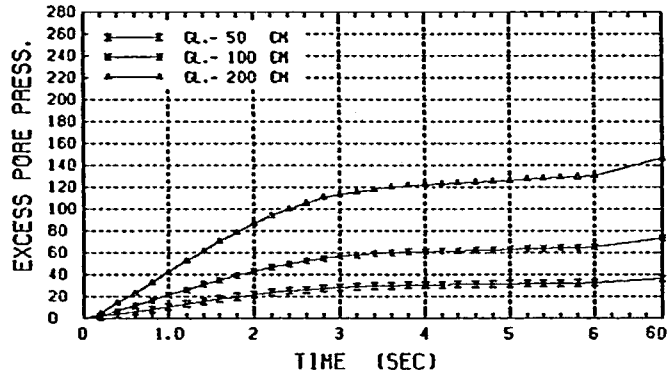
付図－５・９　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－６）



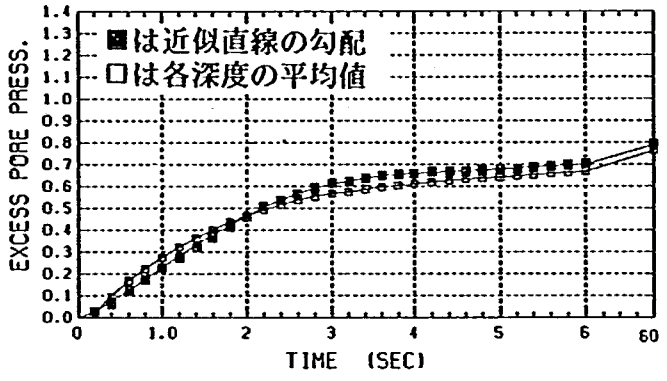
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



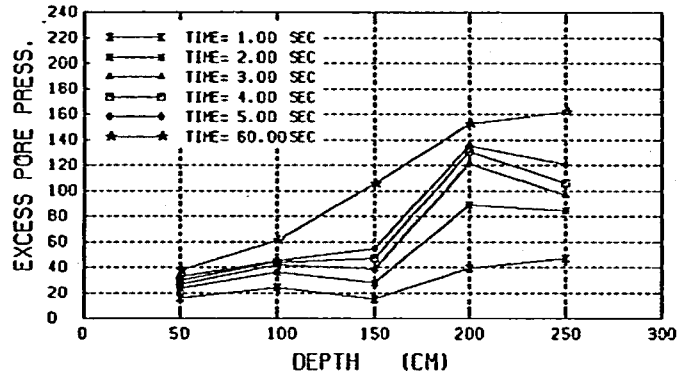
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



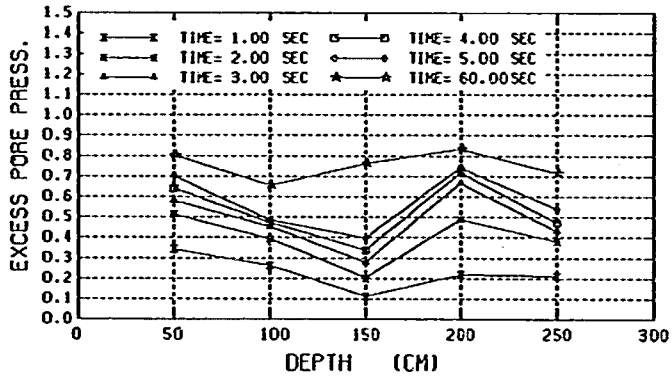
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



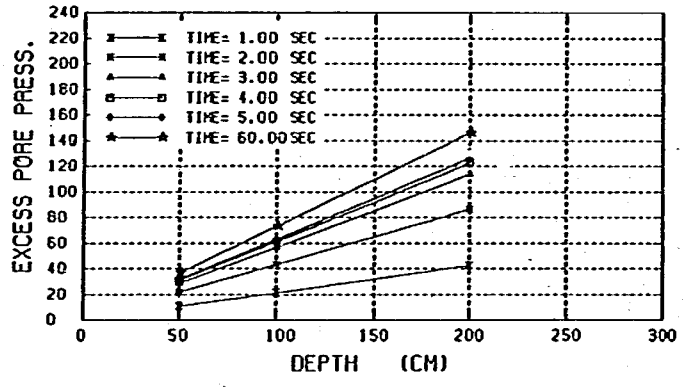
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



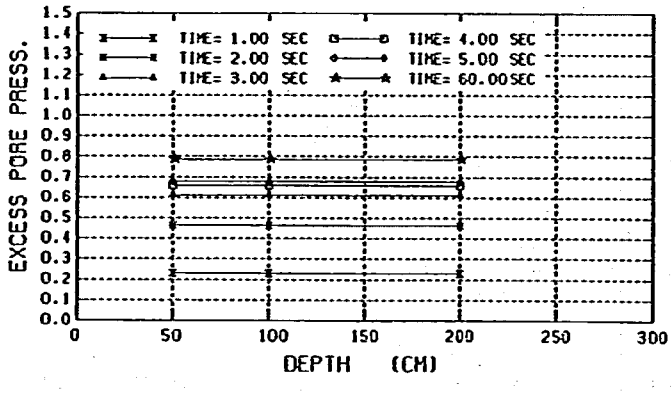
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

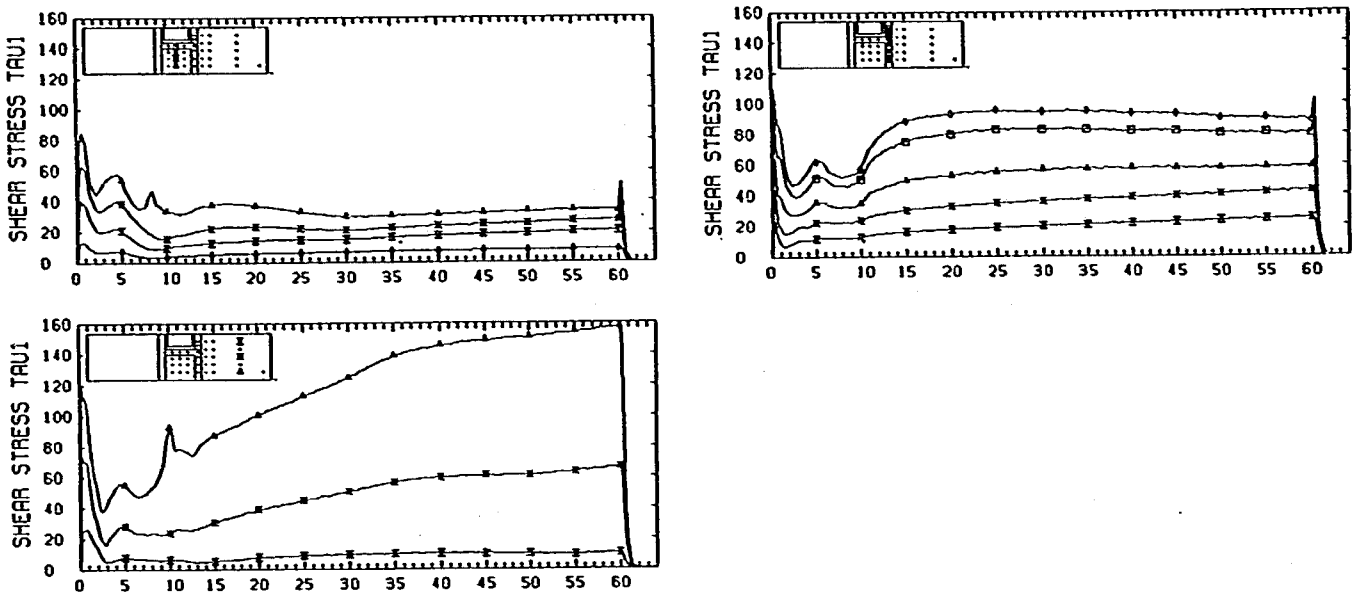


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

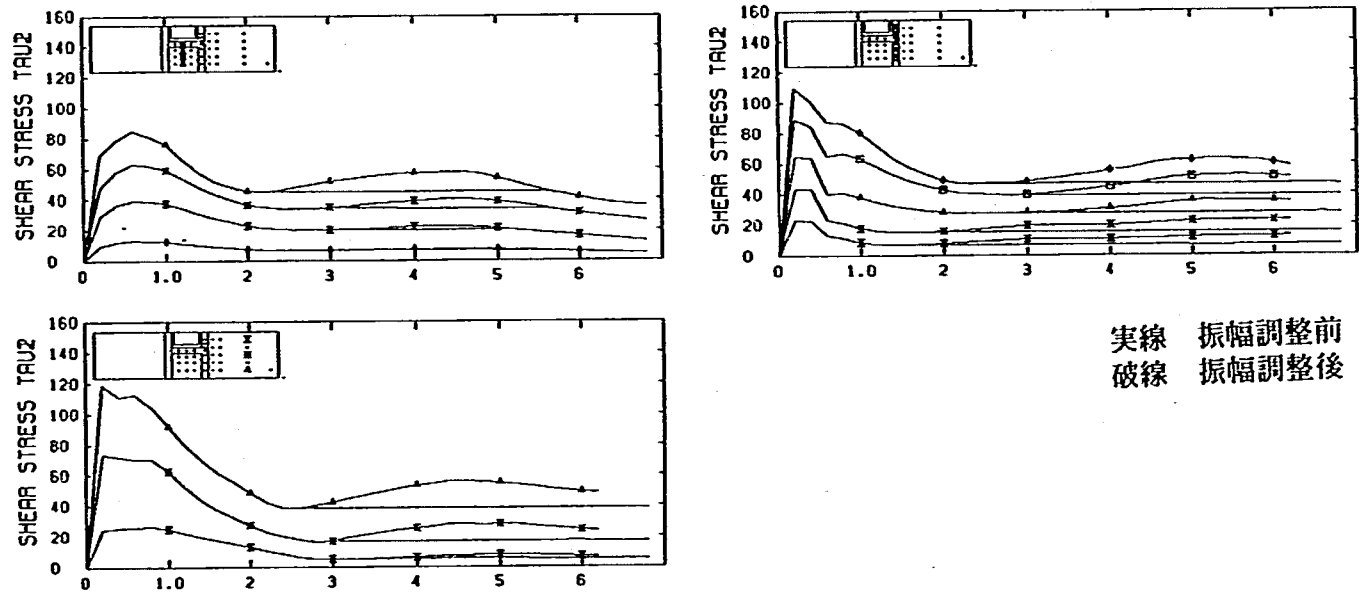


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

付図－５・10　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－６）

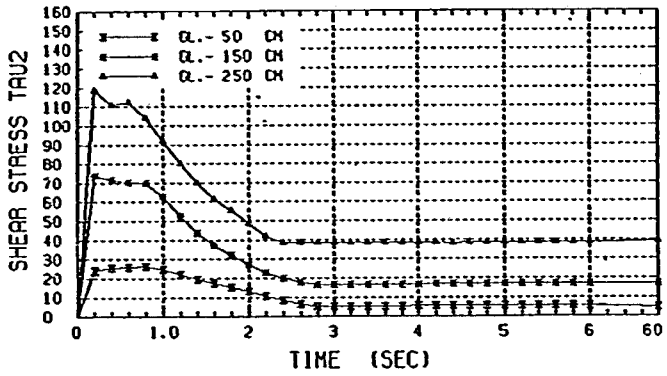


（ａ）全時間領域

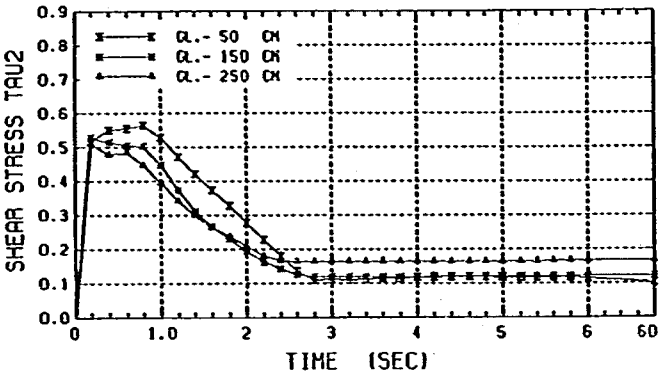


（ｂ）加振開始直後の拡大図（０～６秒）

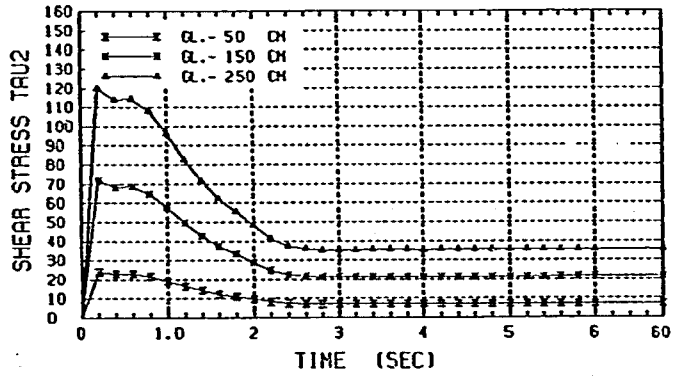
付図－５・11　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－６）



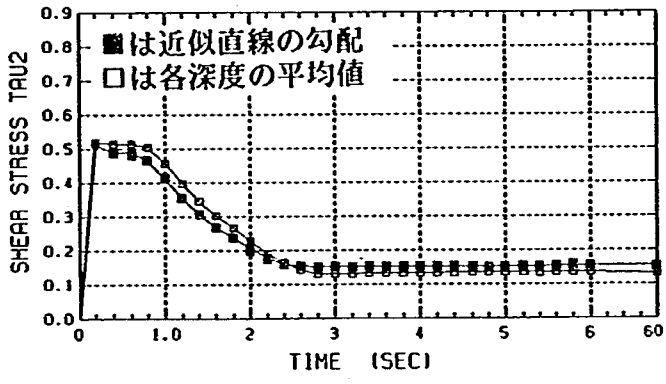
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



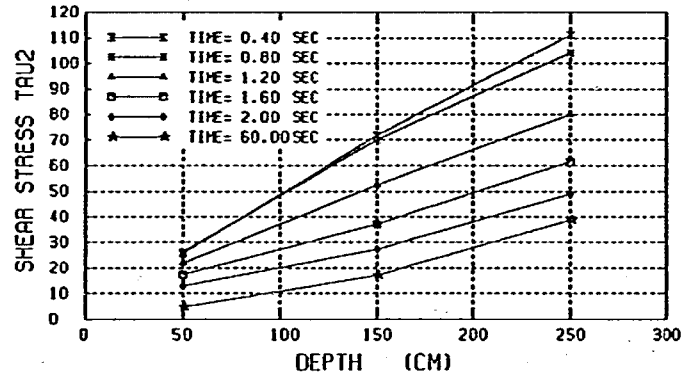
（ｂ）同左のせん断応力比



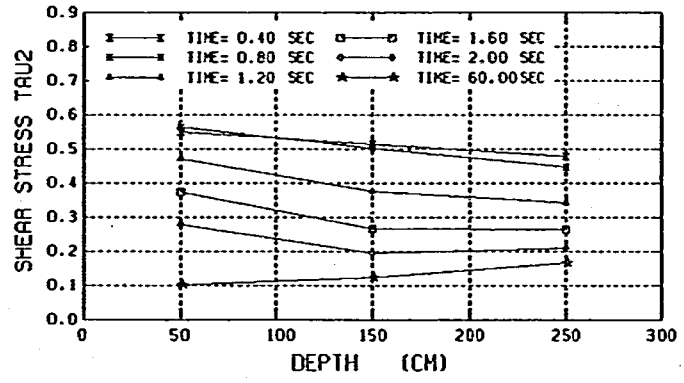
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



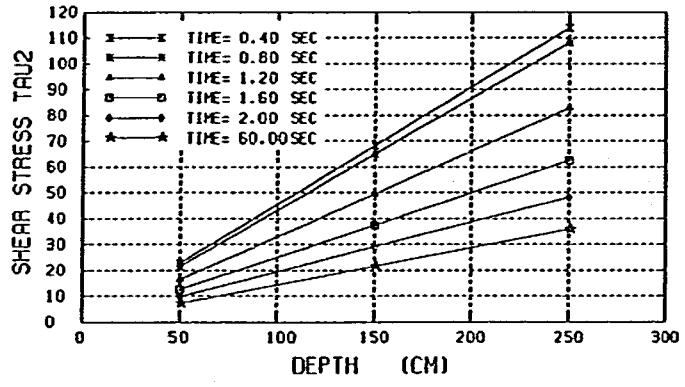
（ｄ）同左のせん断応力比



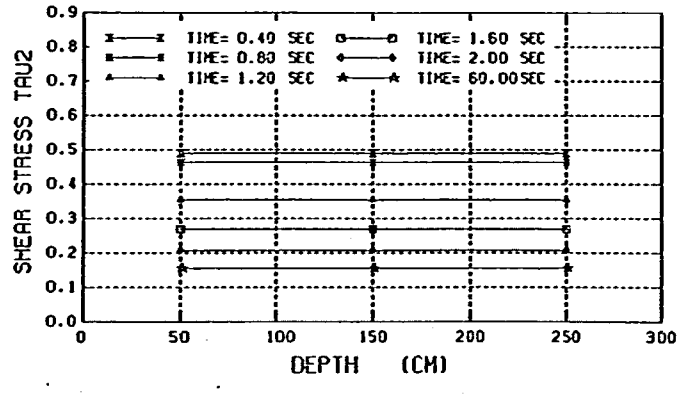
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

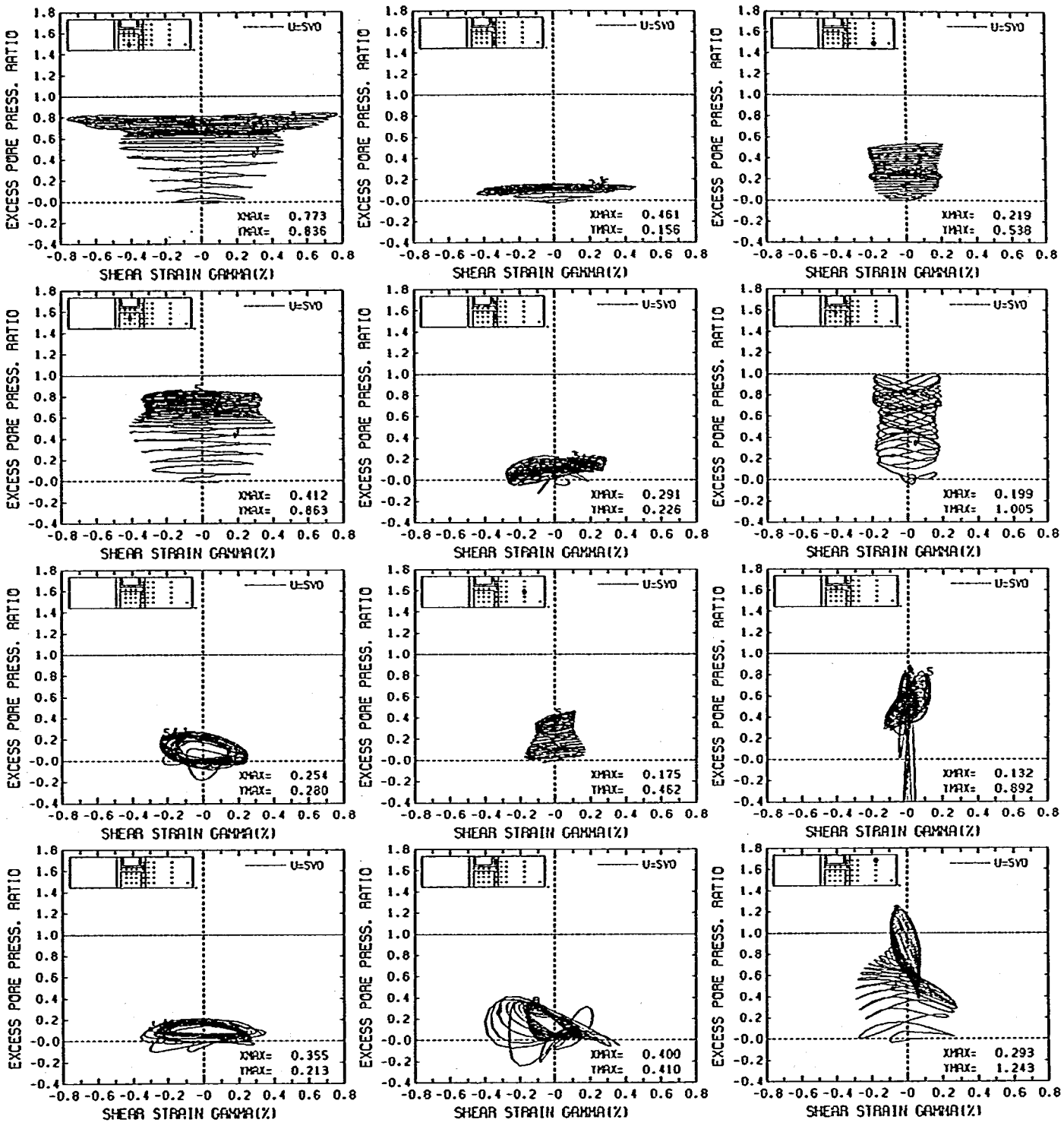


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

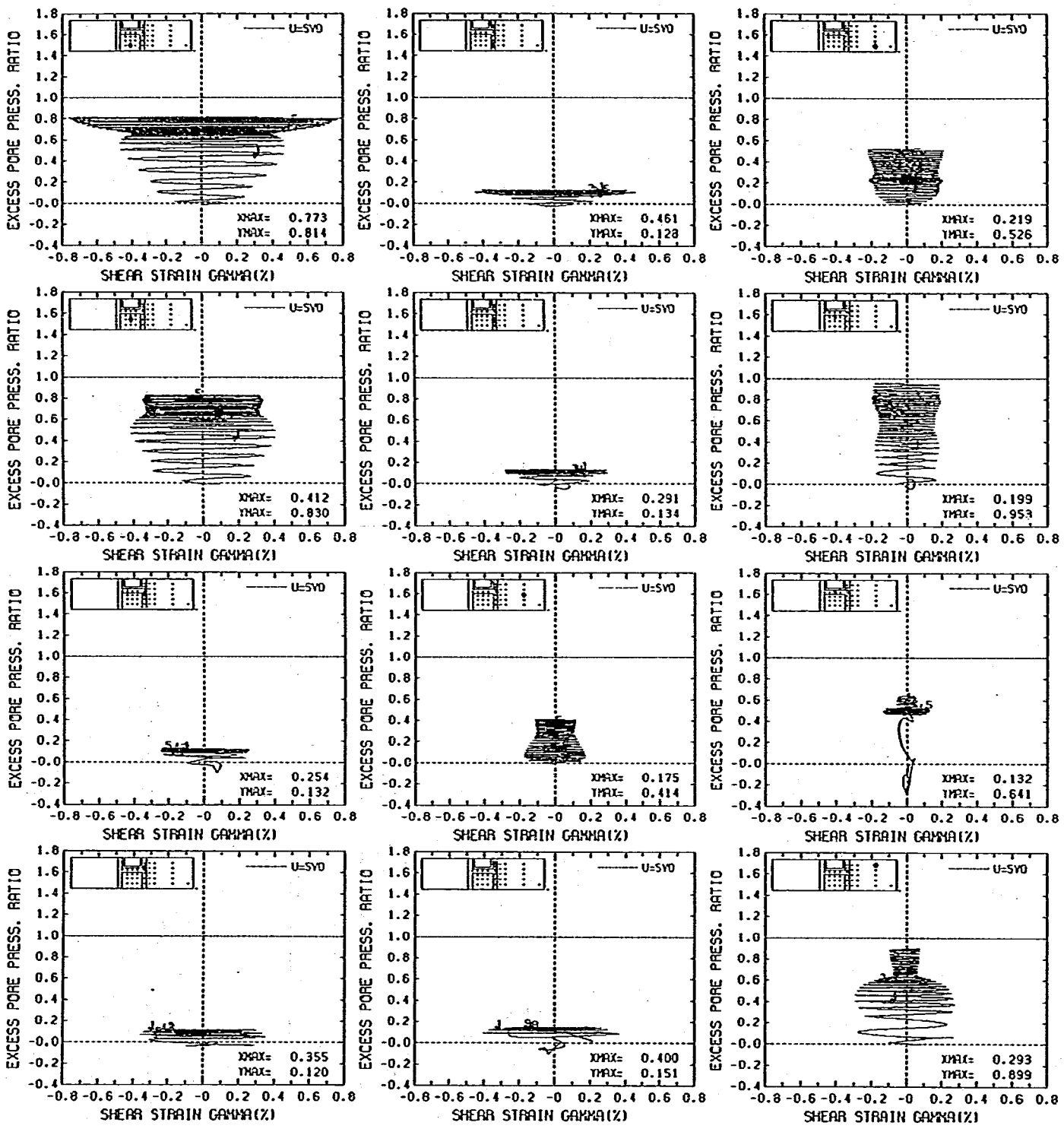


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

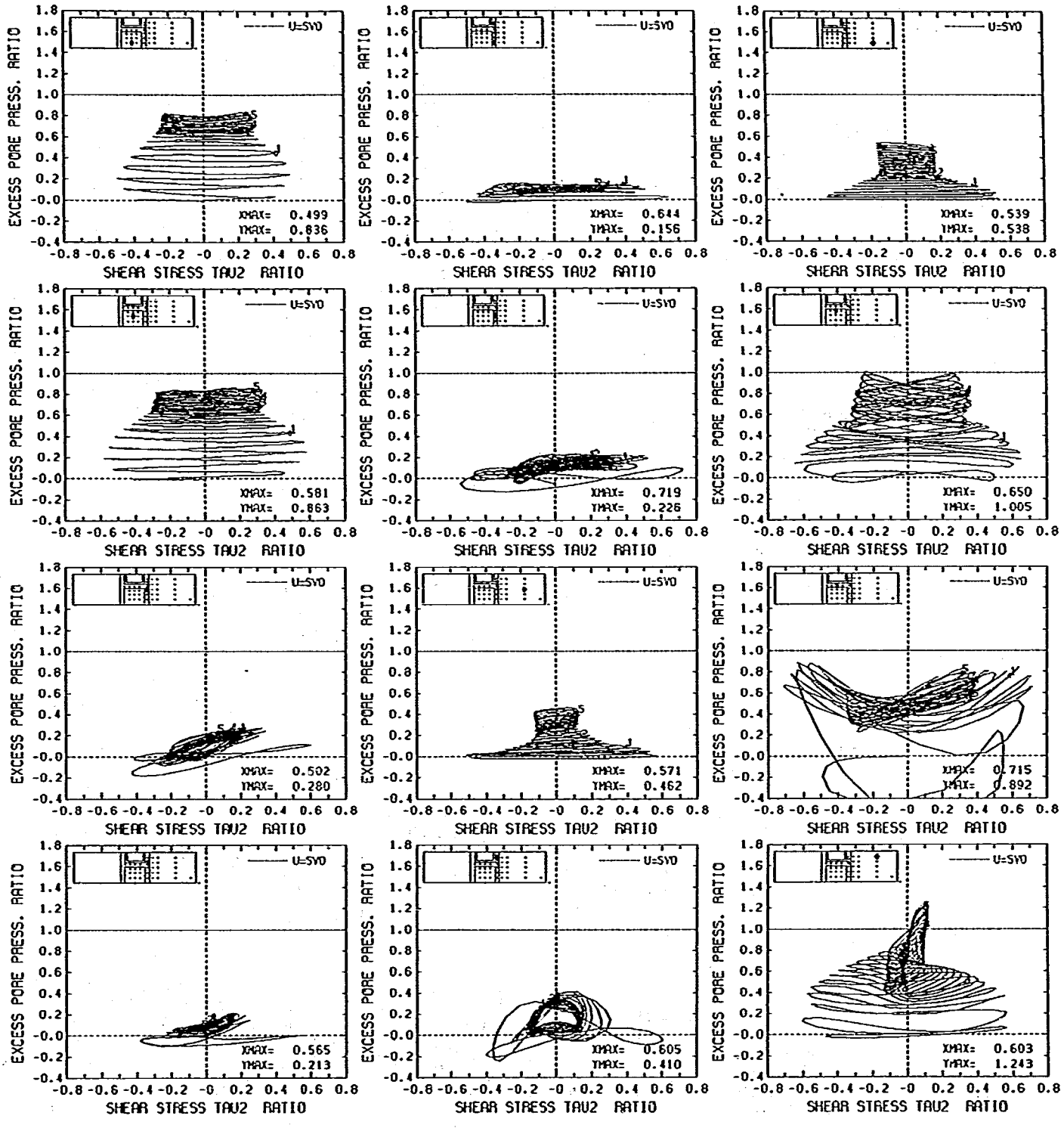
付図－５・12　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－６）



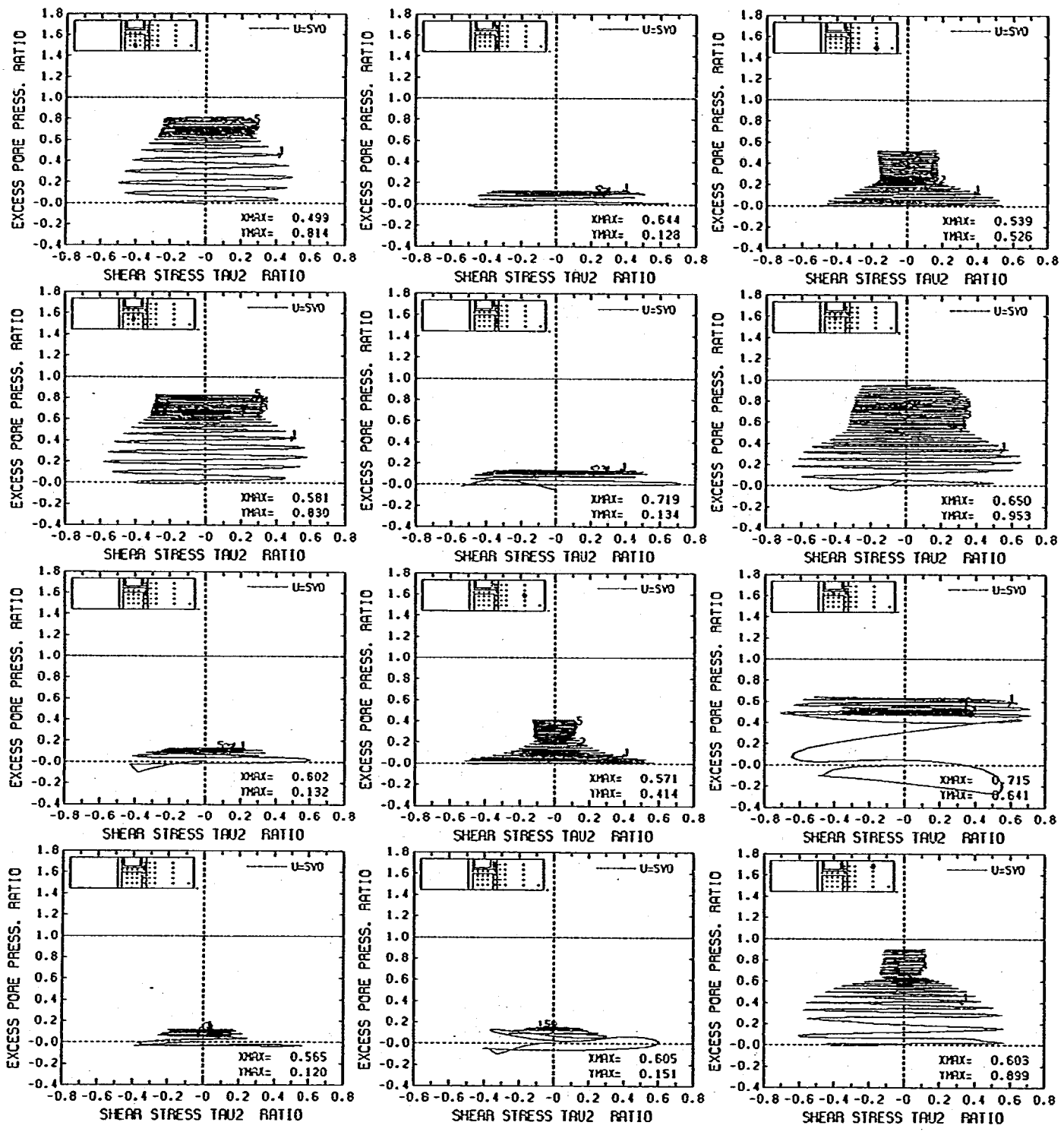
付図－５・13　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－６）



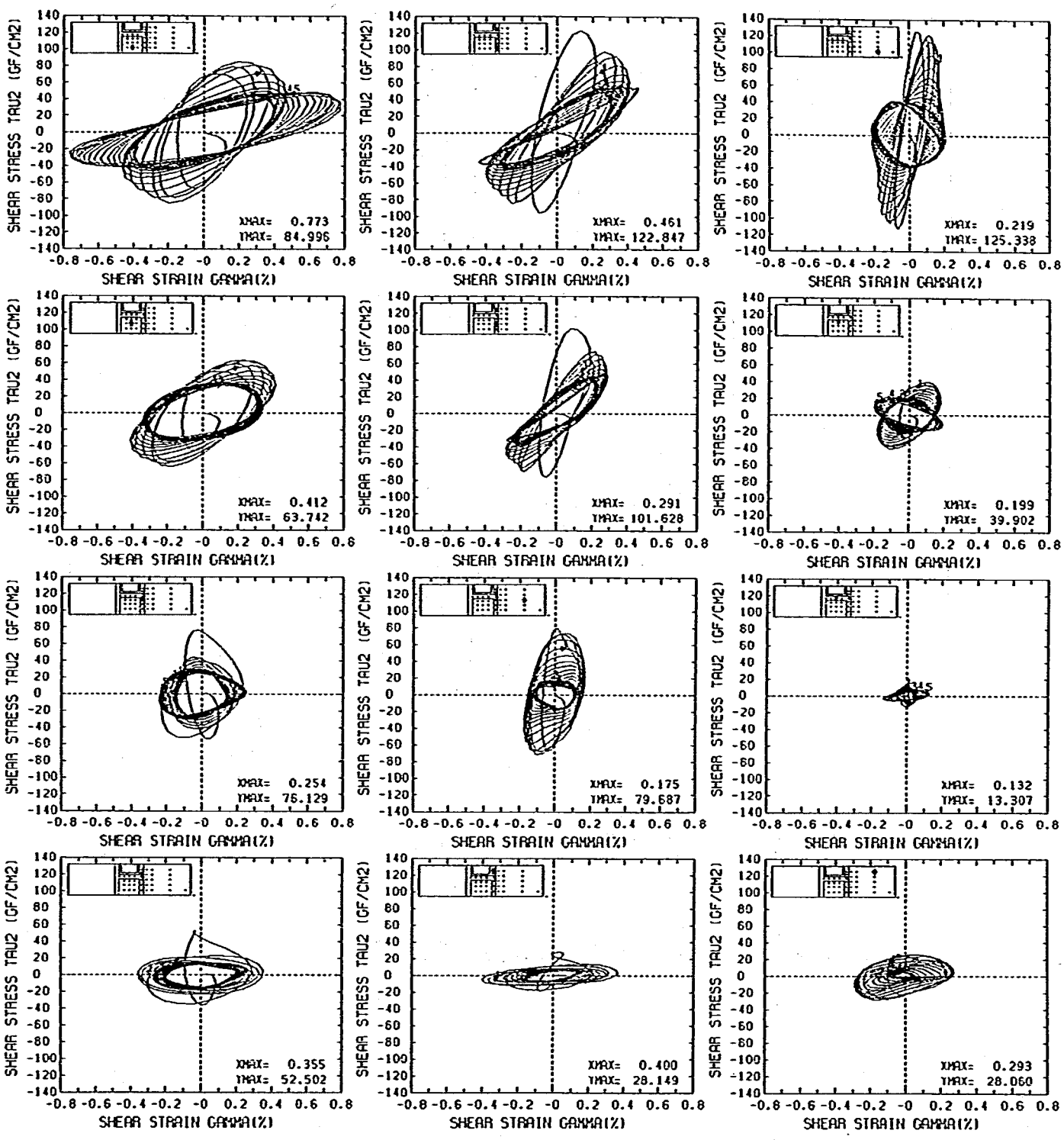
付図－５・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－６）



付図－5・15　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－6）

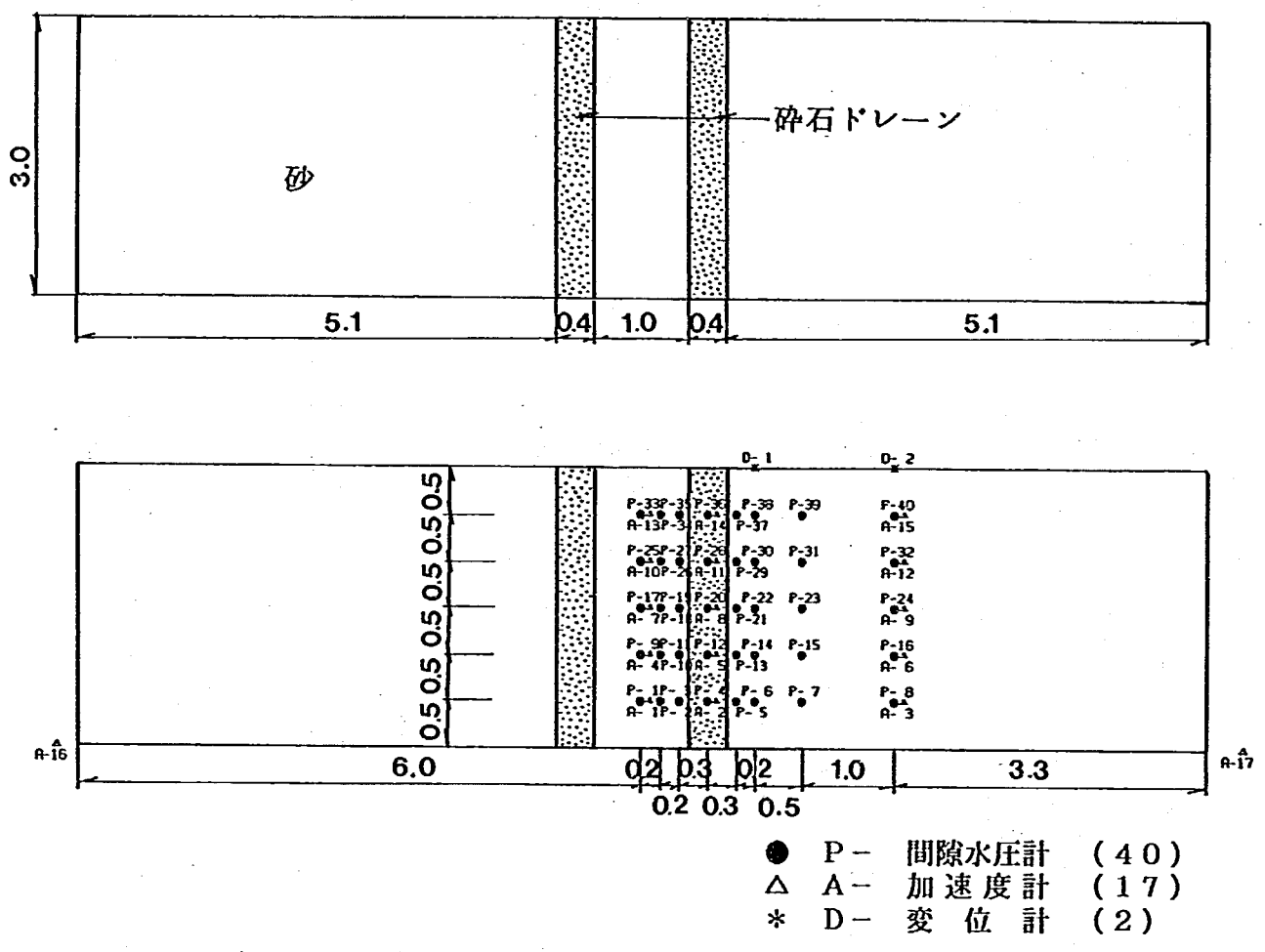


付図－5・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－6）



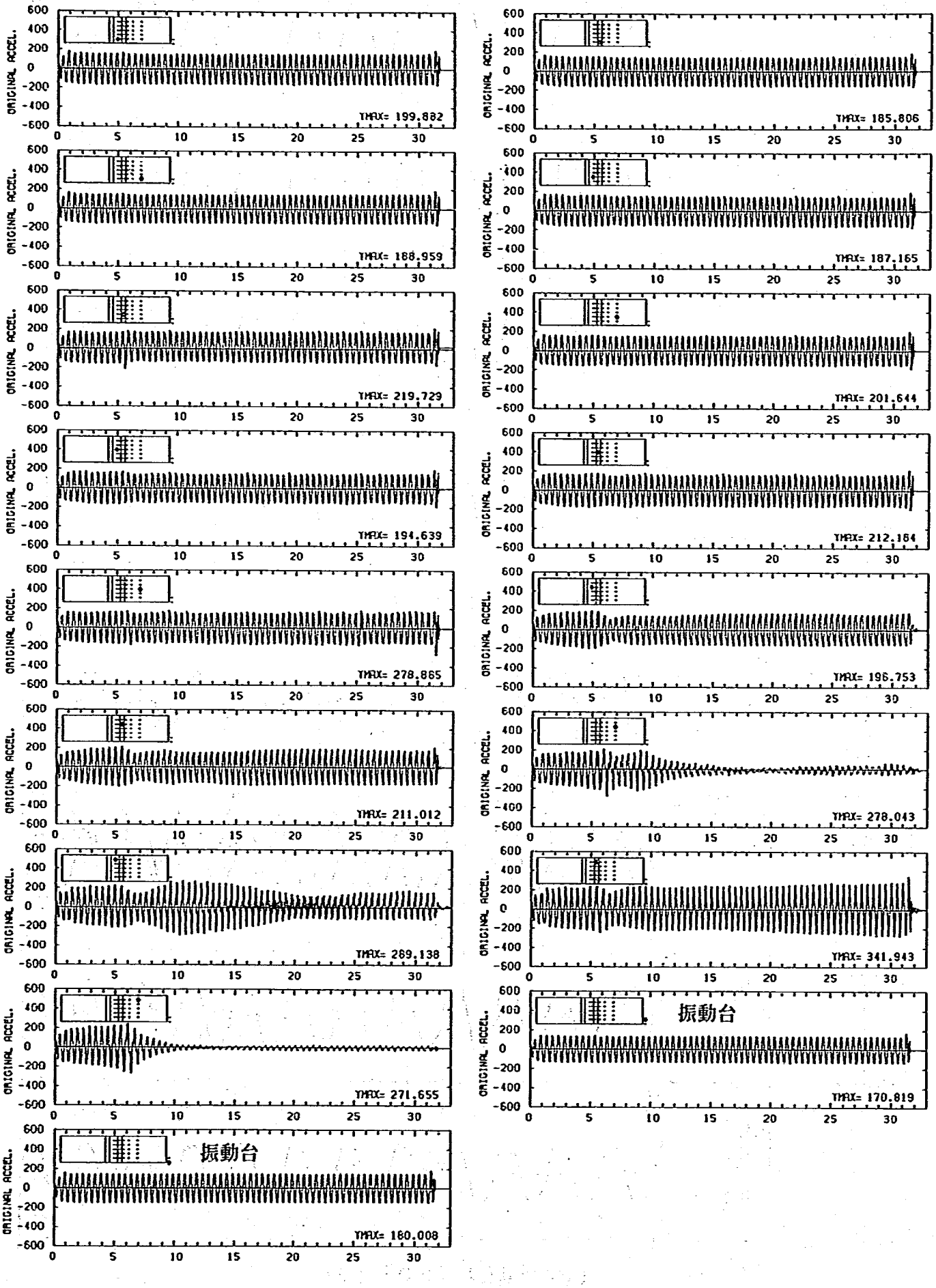
付図－５・17　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－６）

模型 7

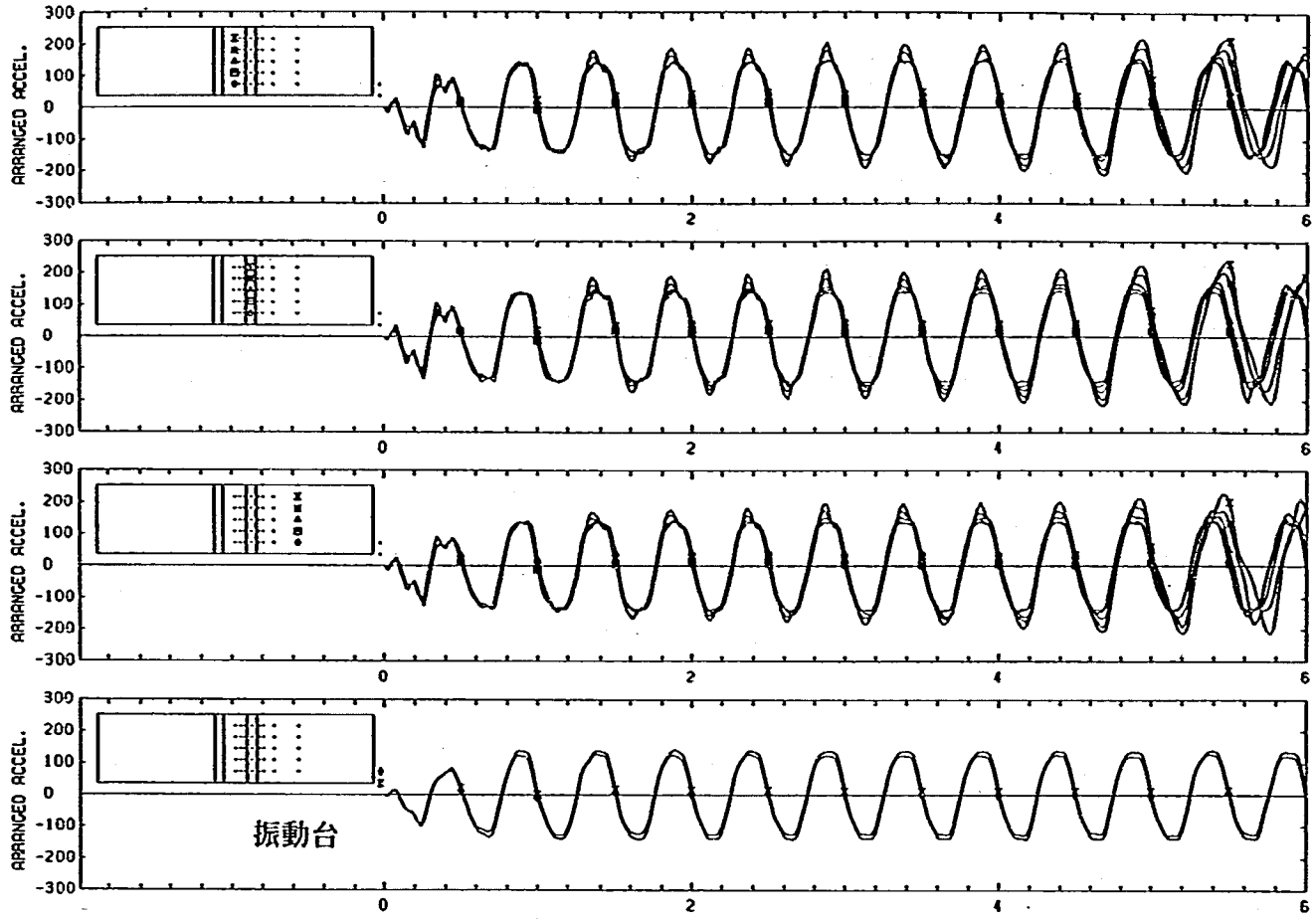


A－16，A－17は振動台加速度
P－2は欠測

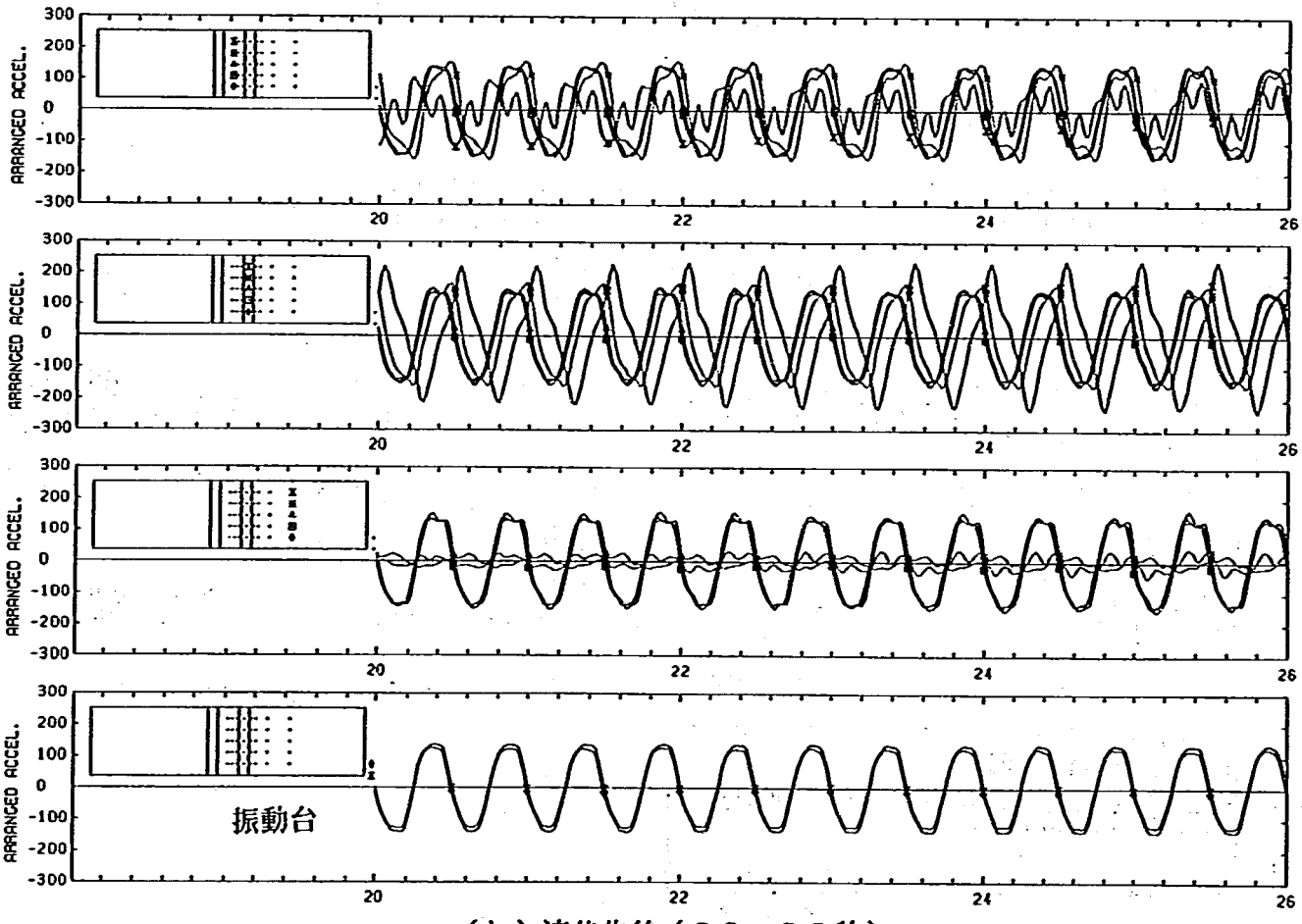
付図－6・1　模型の寸法と計測器の配置（模型－7）



付図－６・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－７）

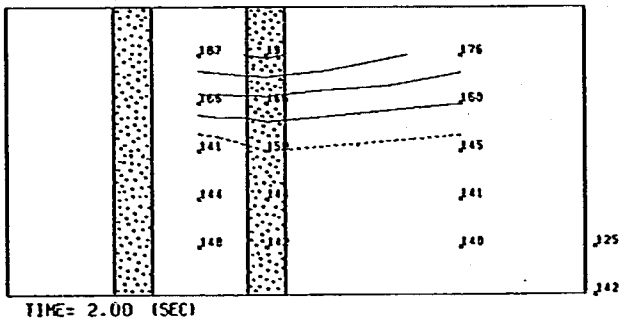


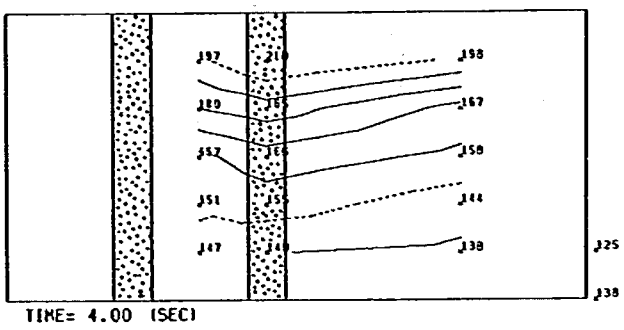
（ａ）加振開始直後（０～６秒）

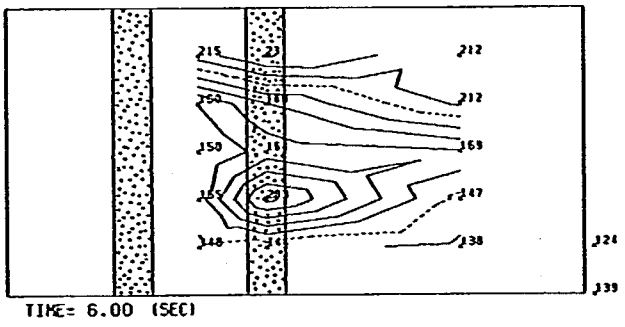


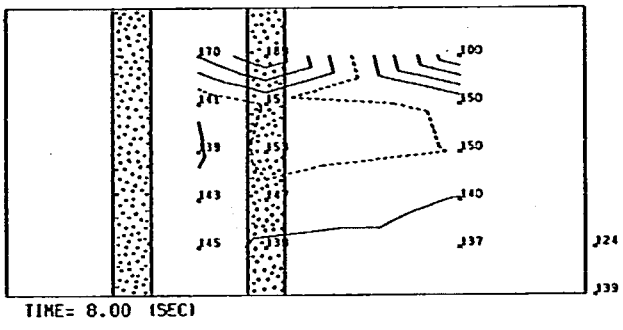
（ｂ）液状化後（２０～２６秒）

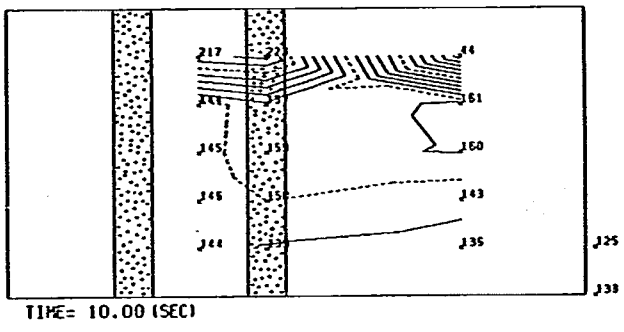
付図－６・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－７）

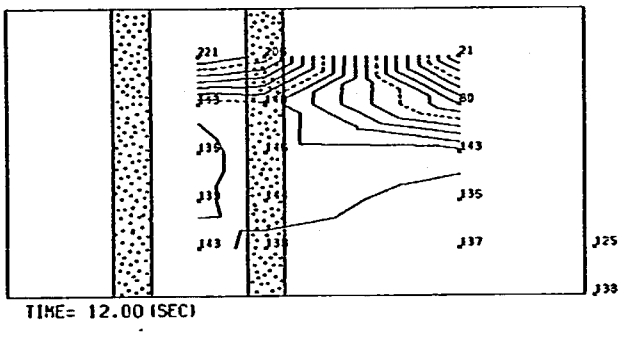


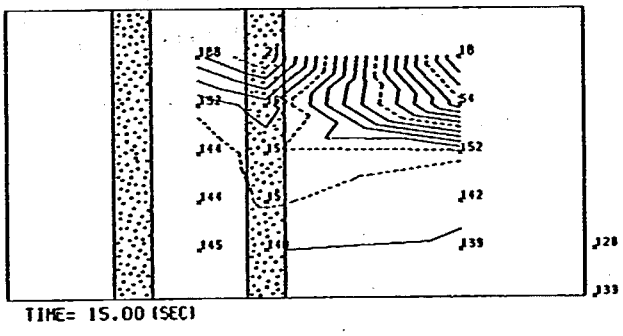


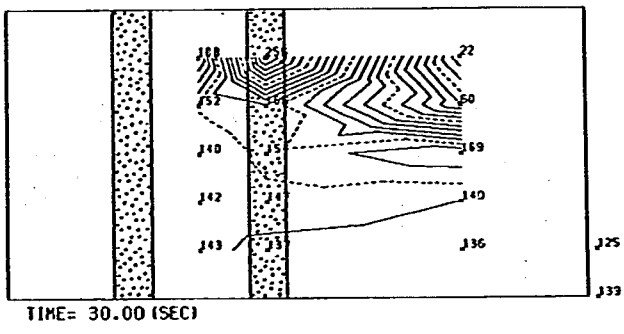




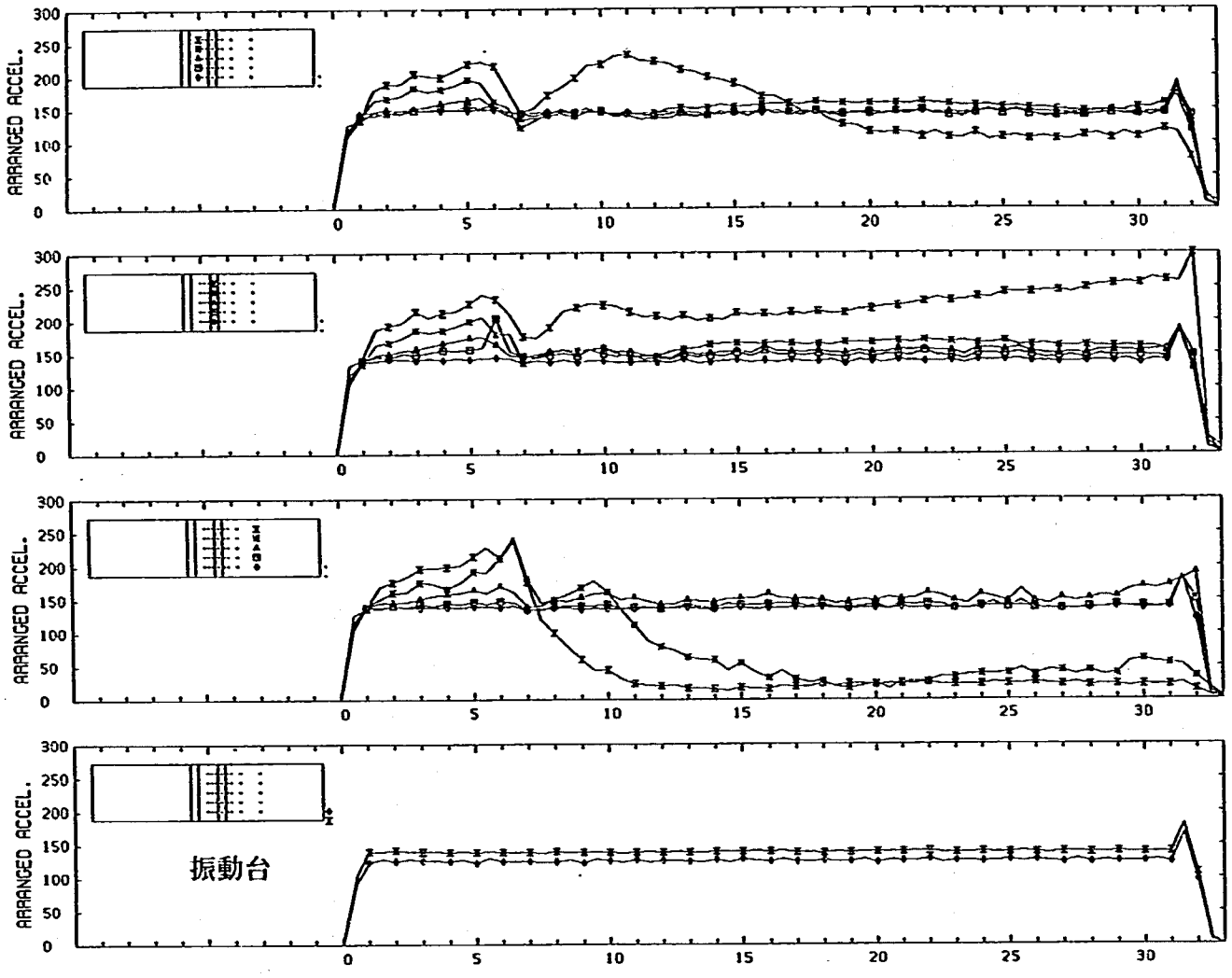




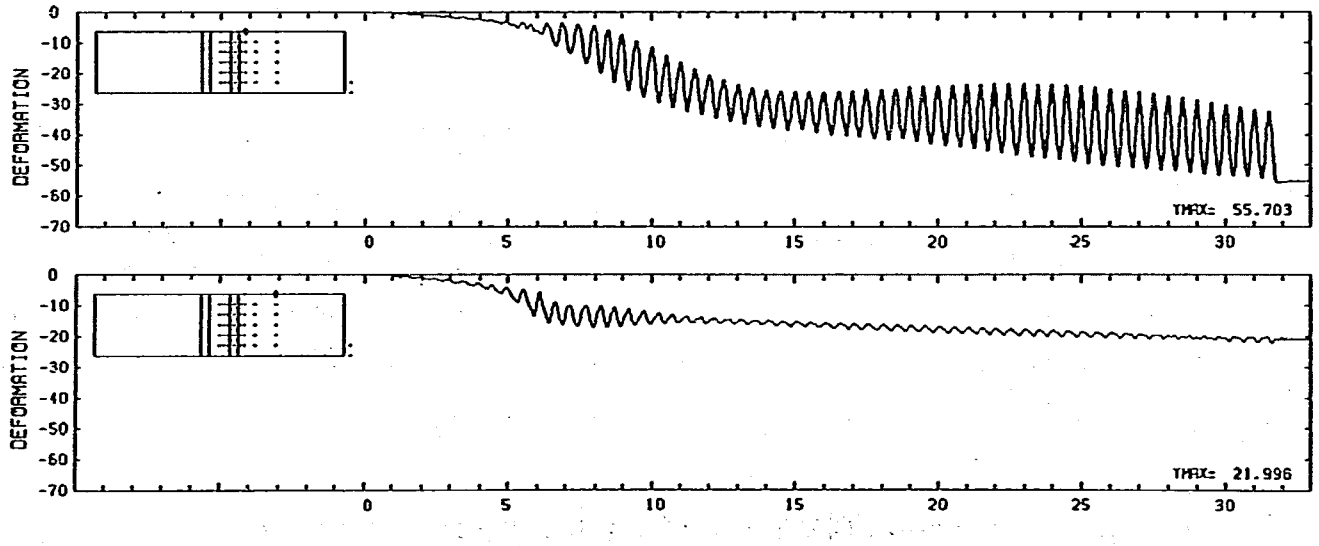




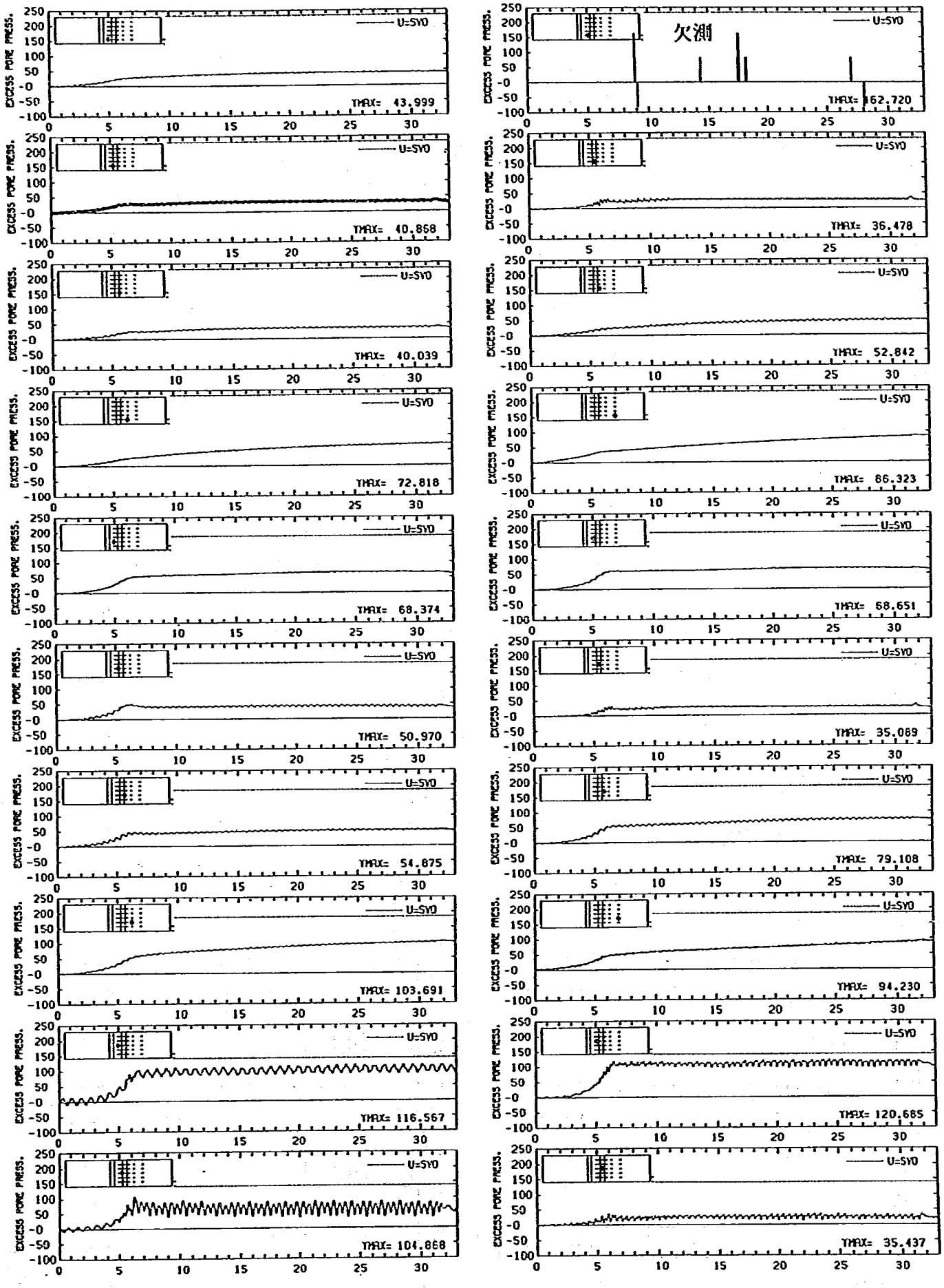
付図－６・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ10gal、模型－７）



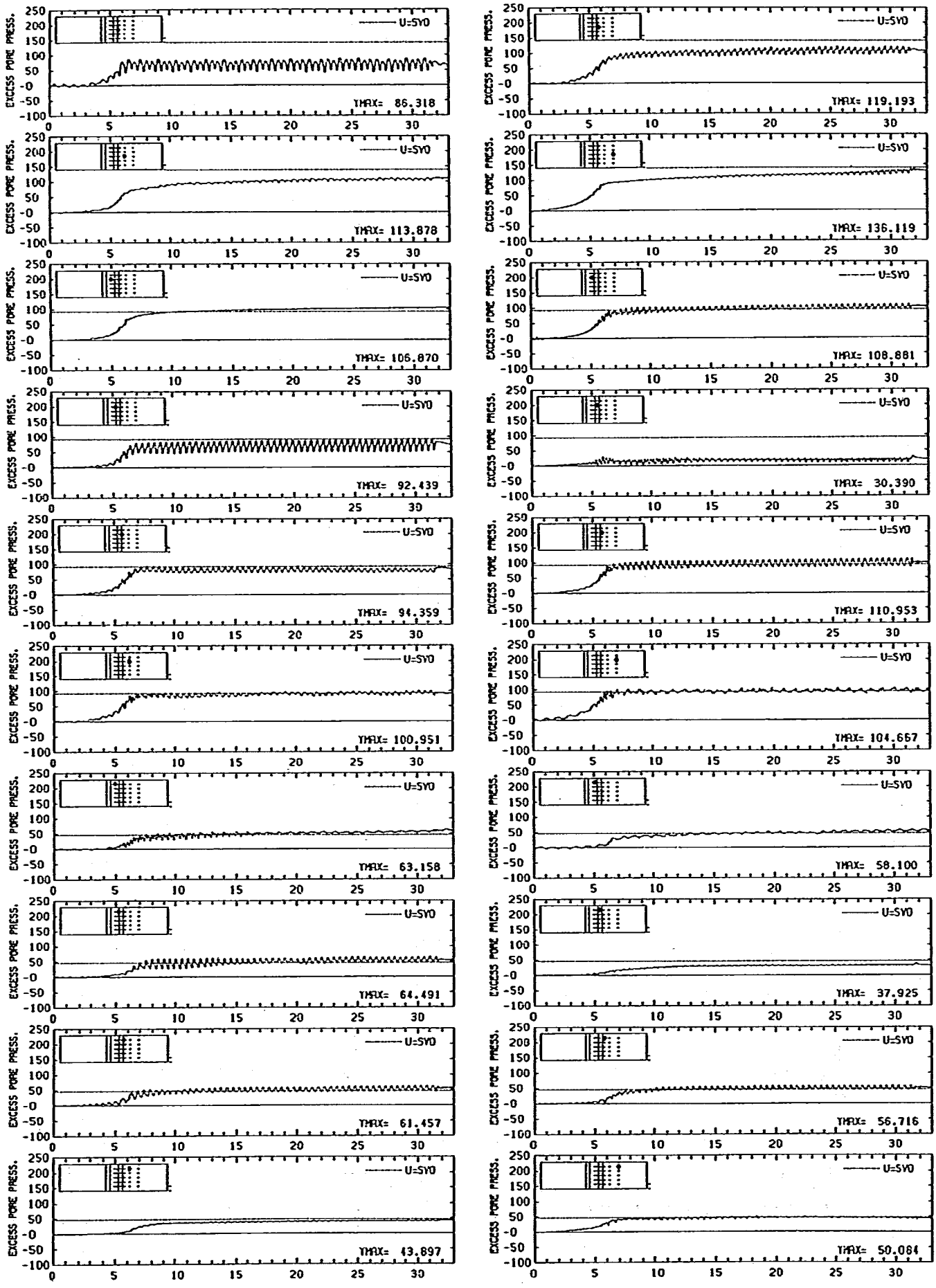
付図－６・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－７）



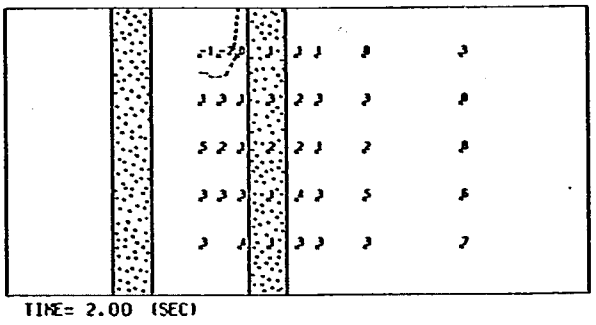
付図－６・６　変位計による地表面沈下の測定結果（単位：㎜、模型－７）

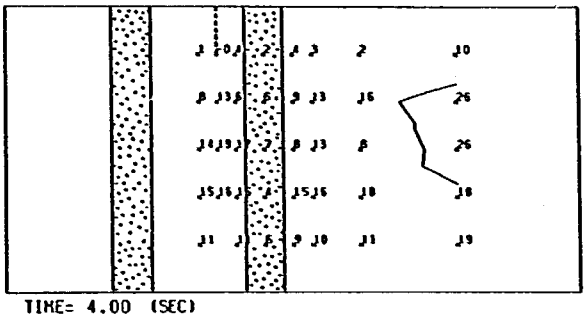


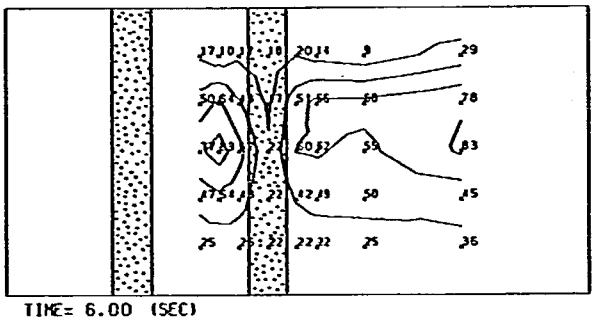
付図－６・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－７）

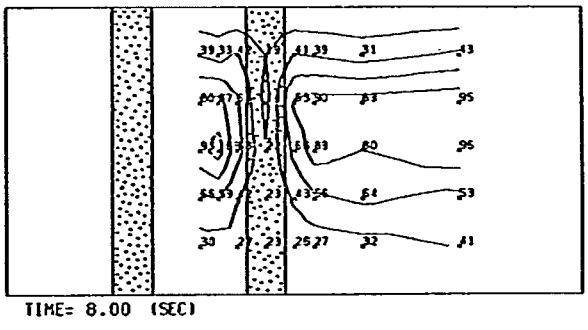


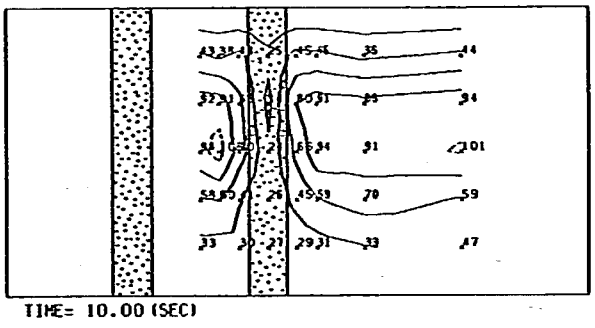
付図－６・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－７）

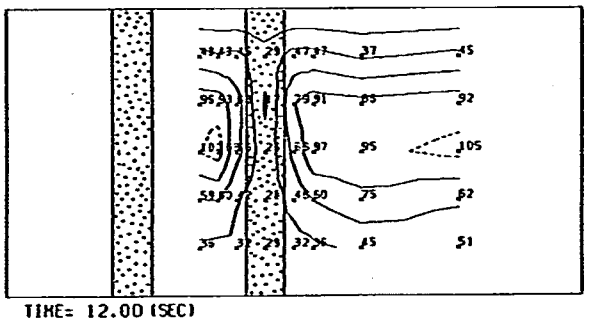


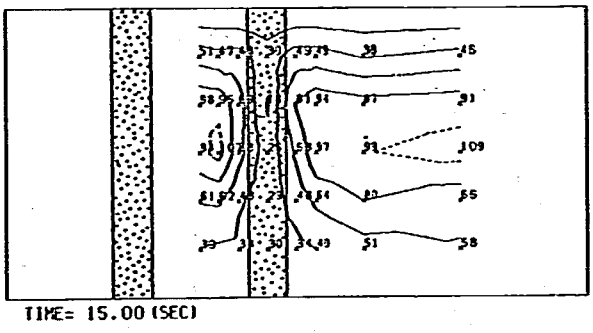


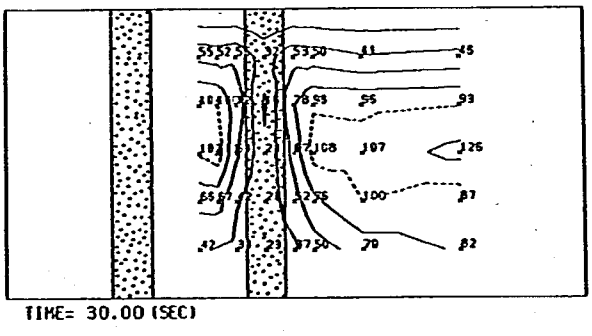




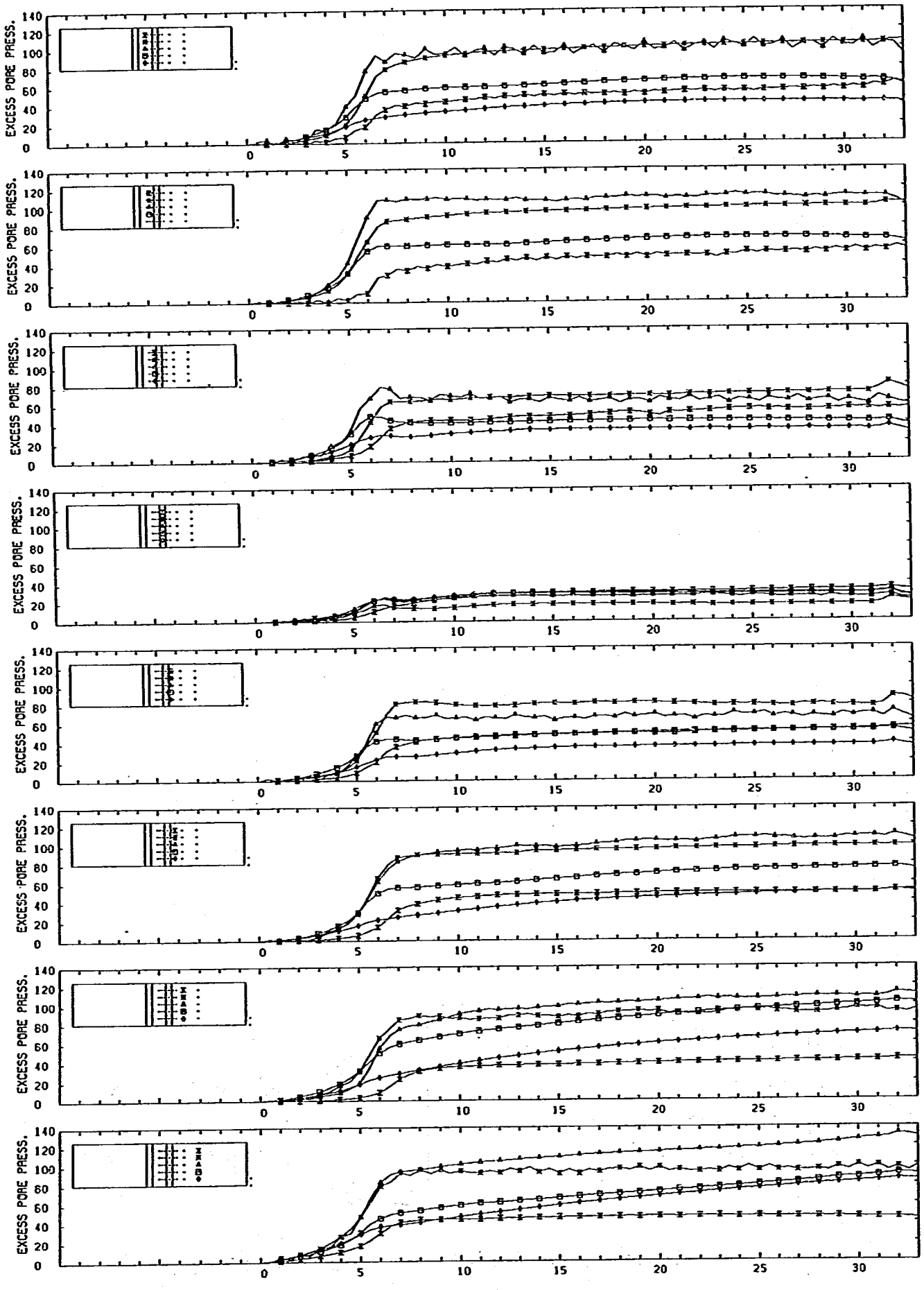




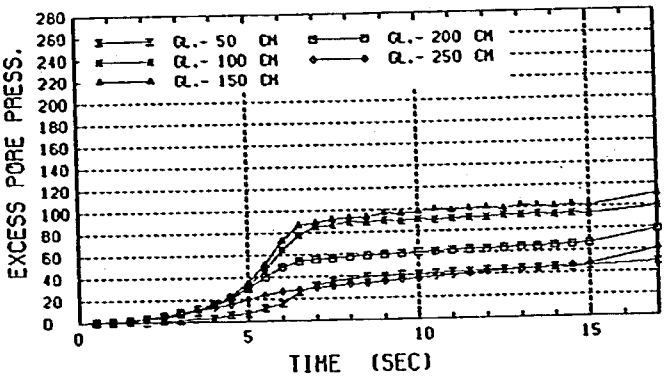




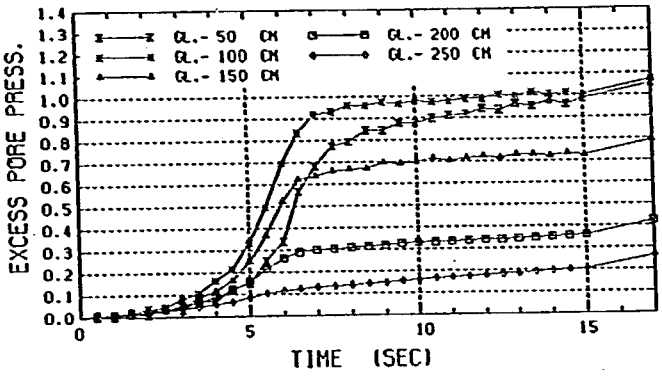
付図－６・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－７）



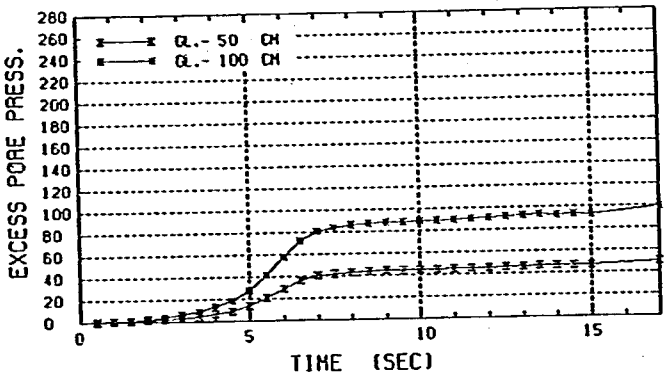
付図－6・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－7）



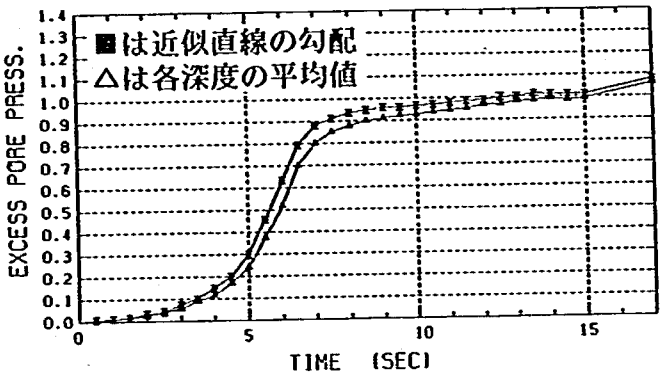
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



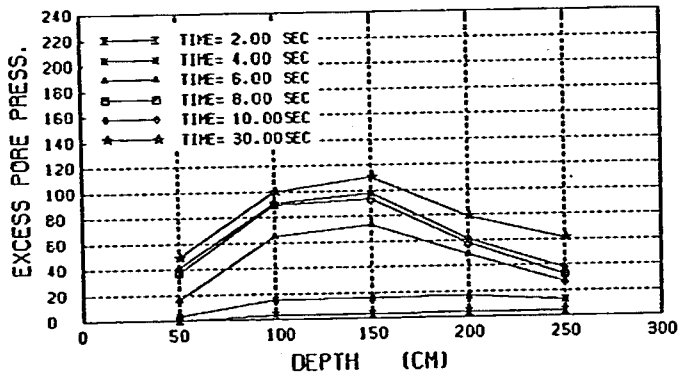
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



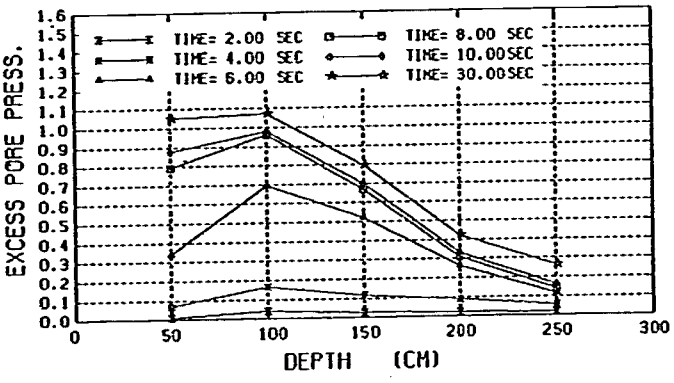
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



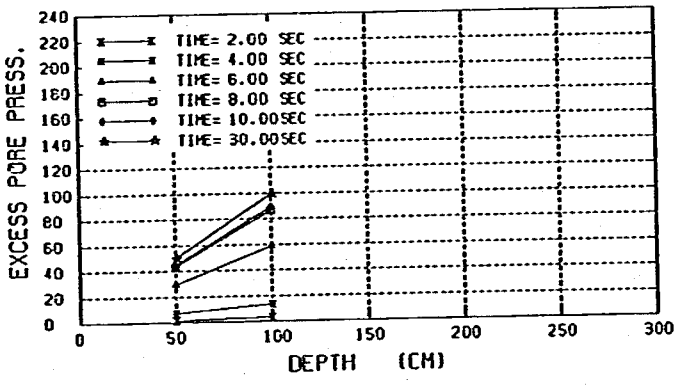
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



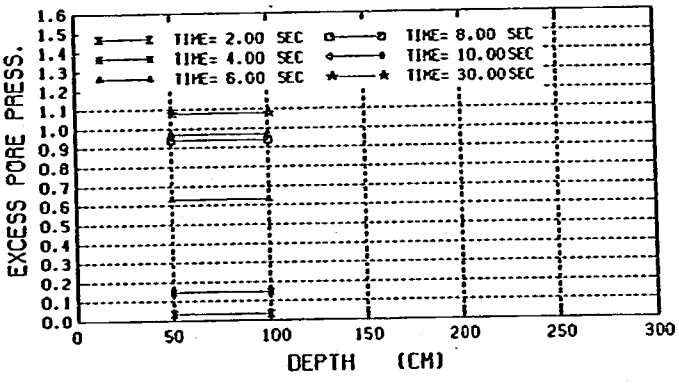
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

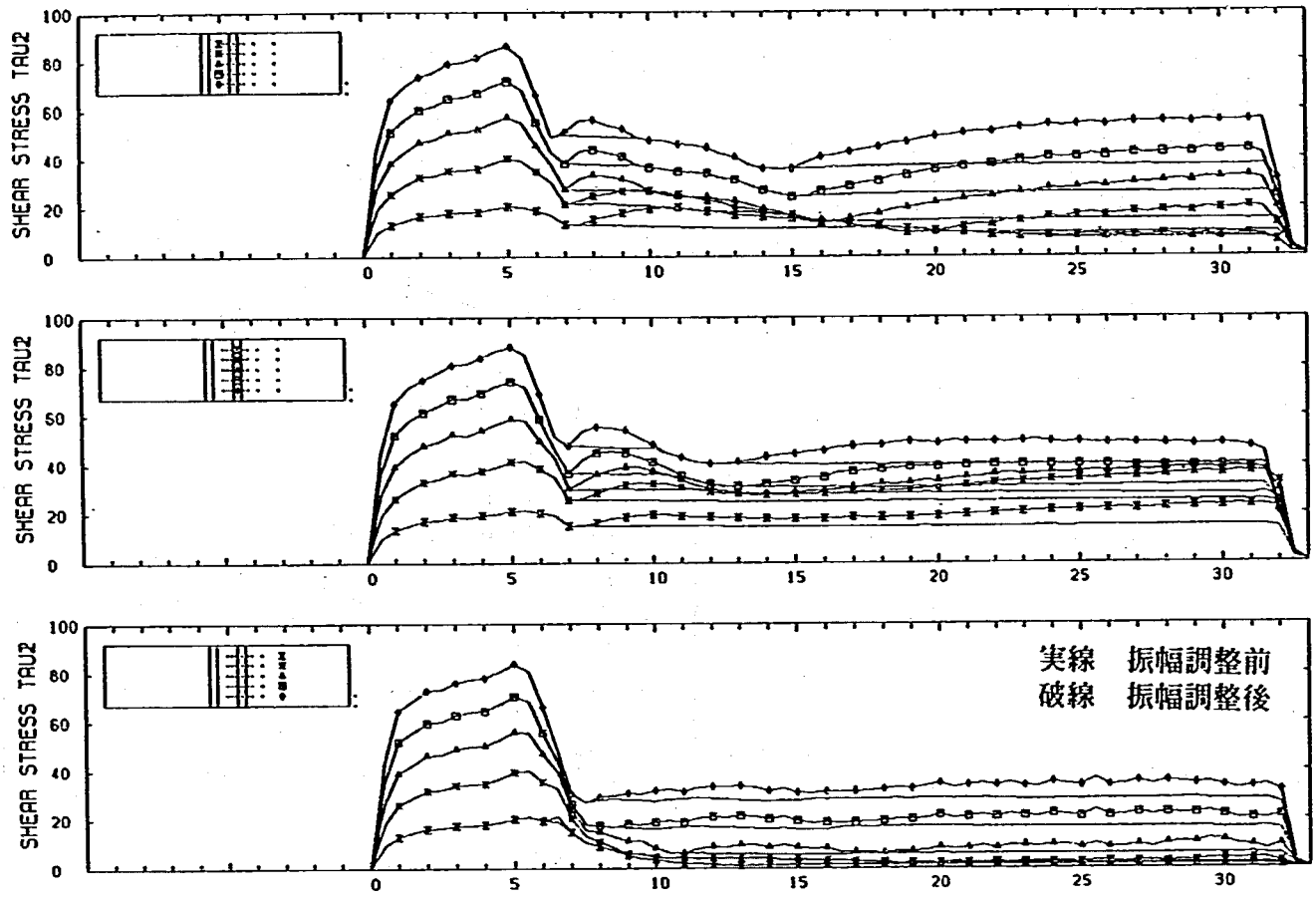


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

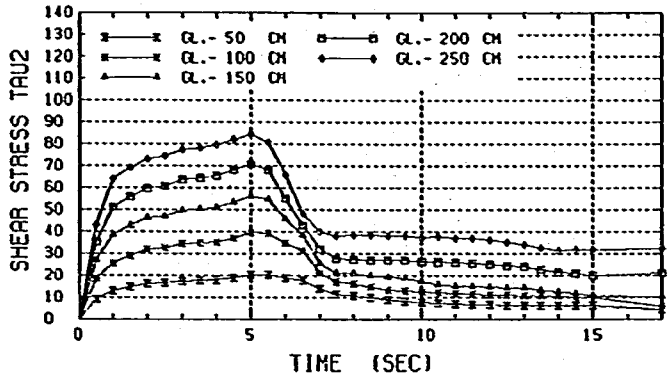


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

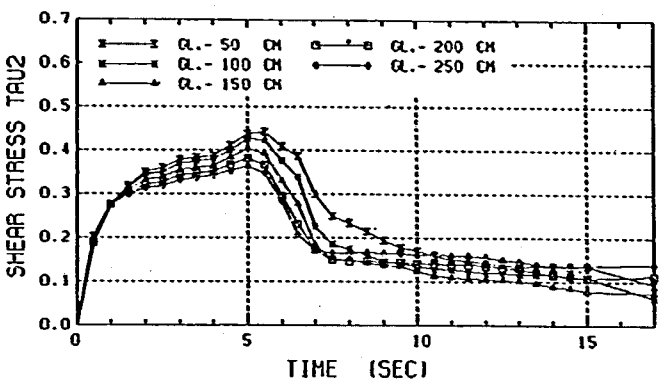
付図－６・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－７）



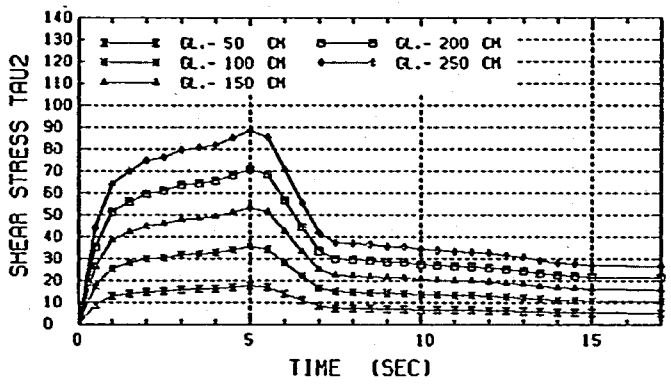
付図－６・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－７）



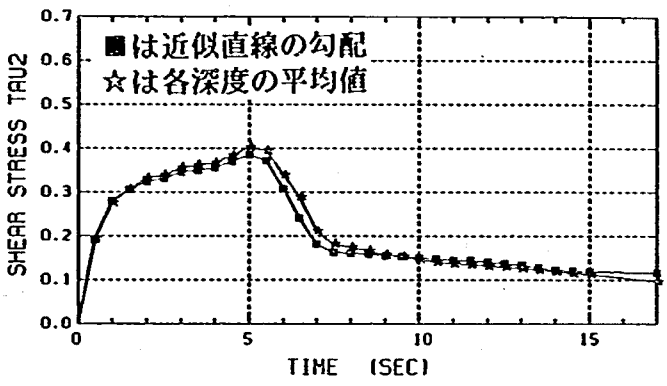
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



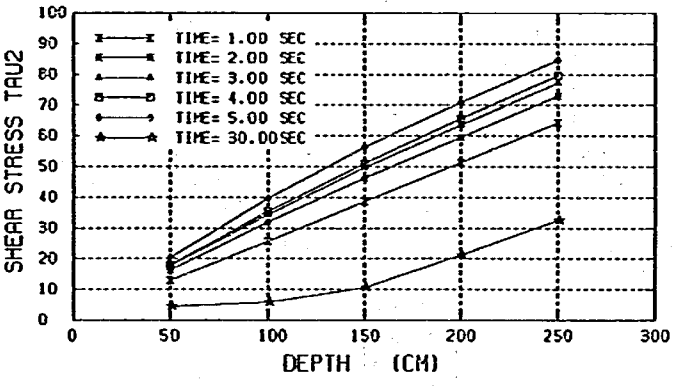
（ｂ）同左のせん断応力比



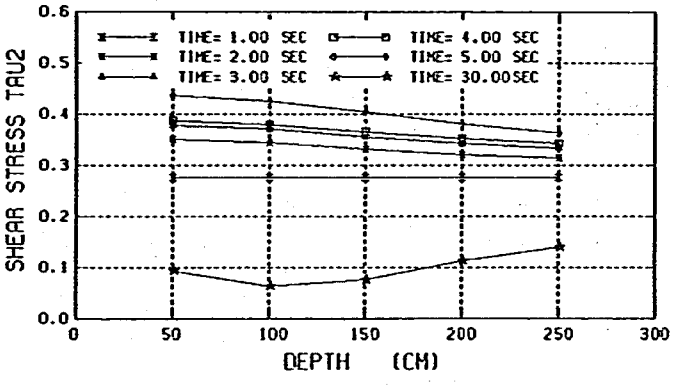
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



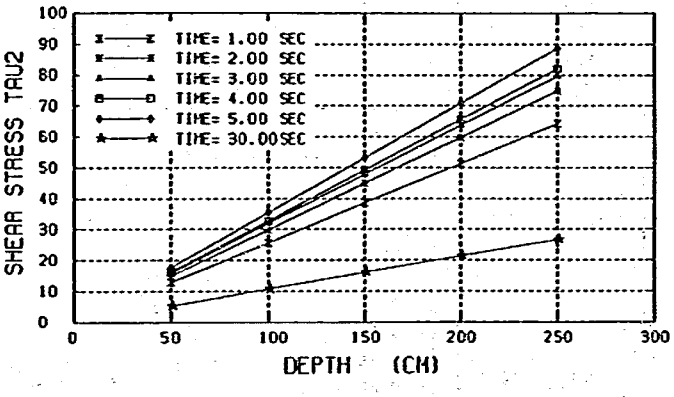
（ｄ）同左のせん断応力比



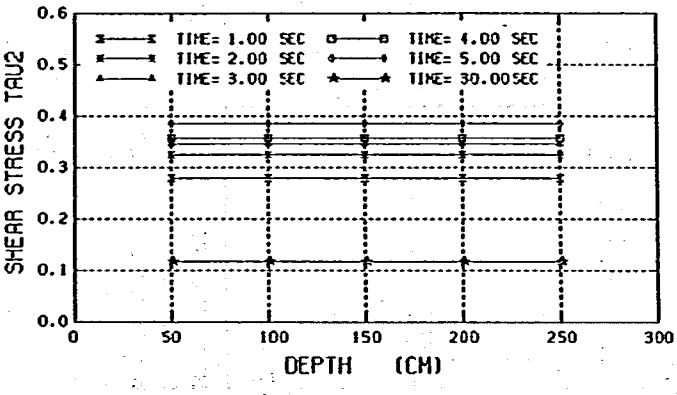
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

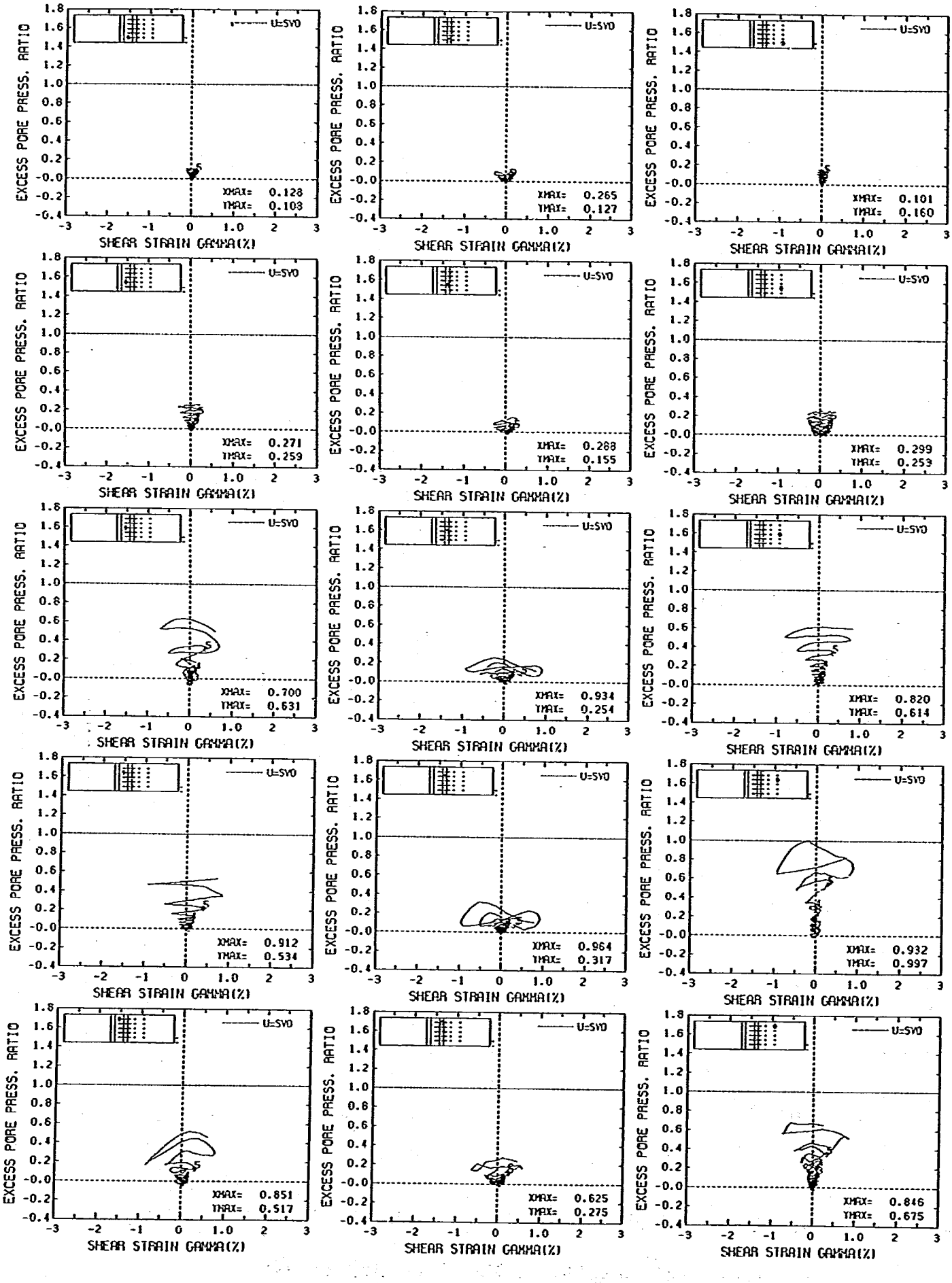


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

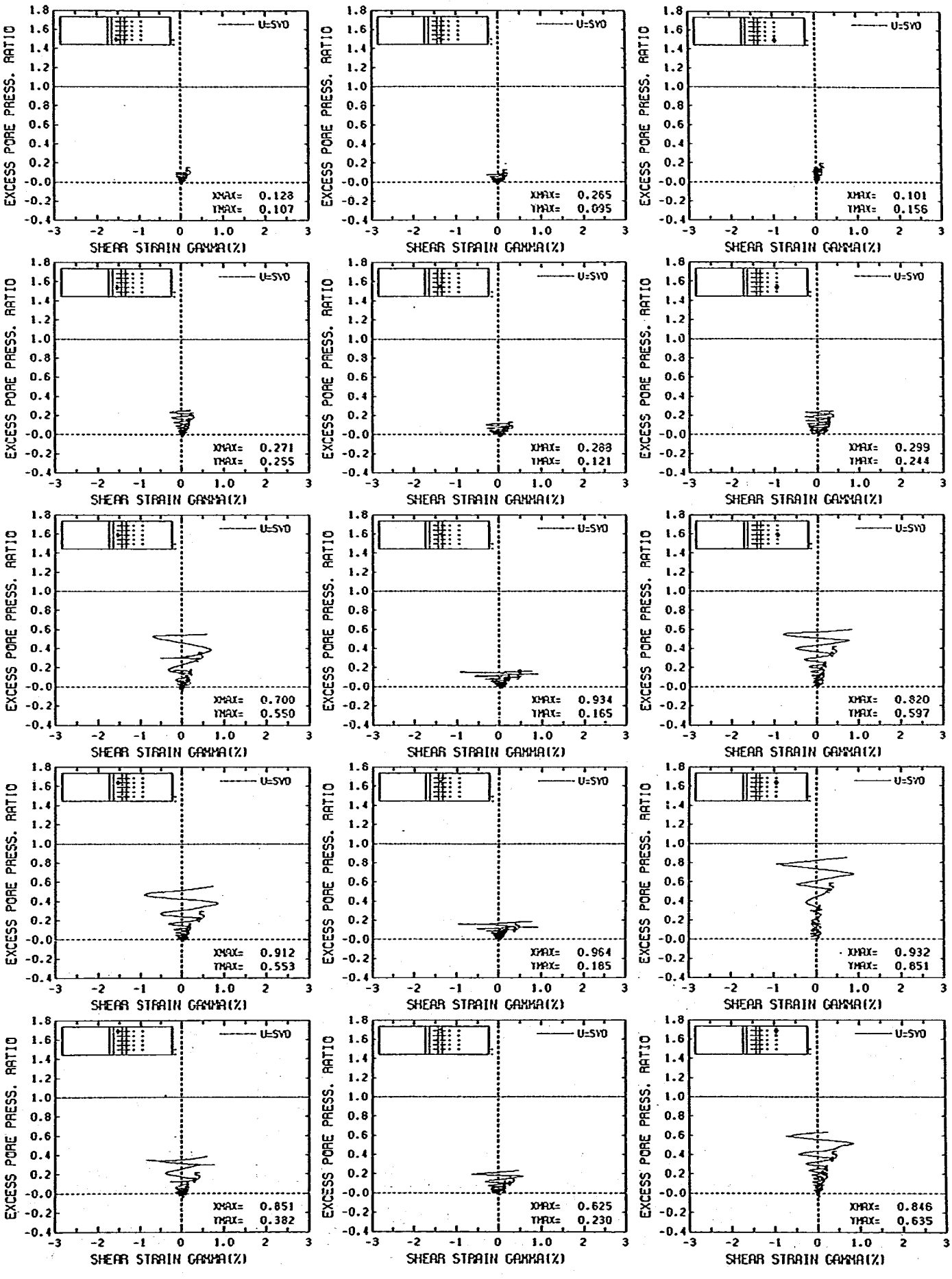


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

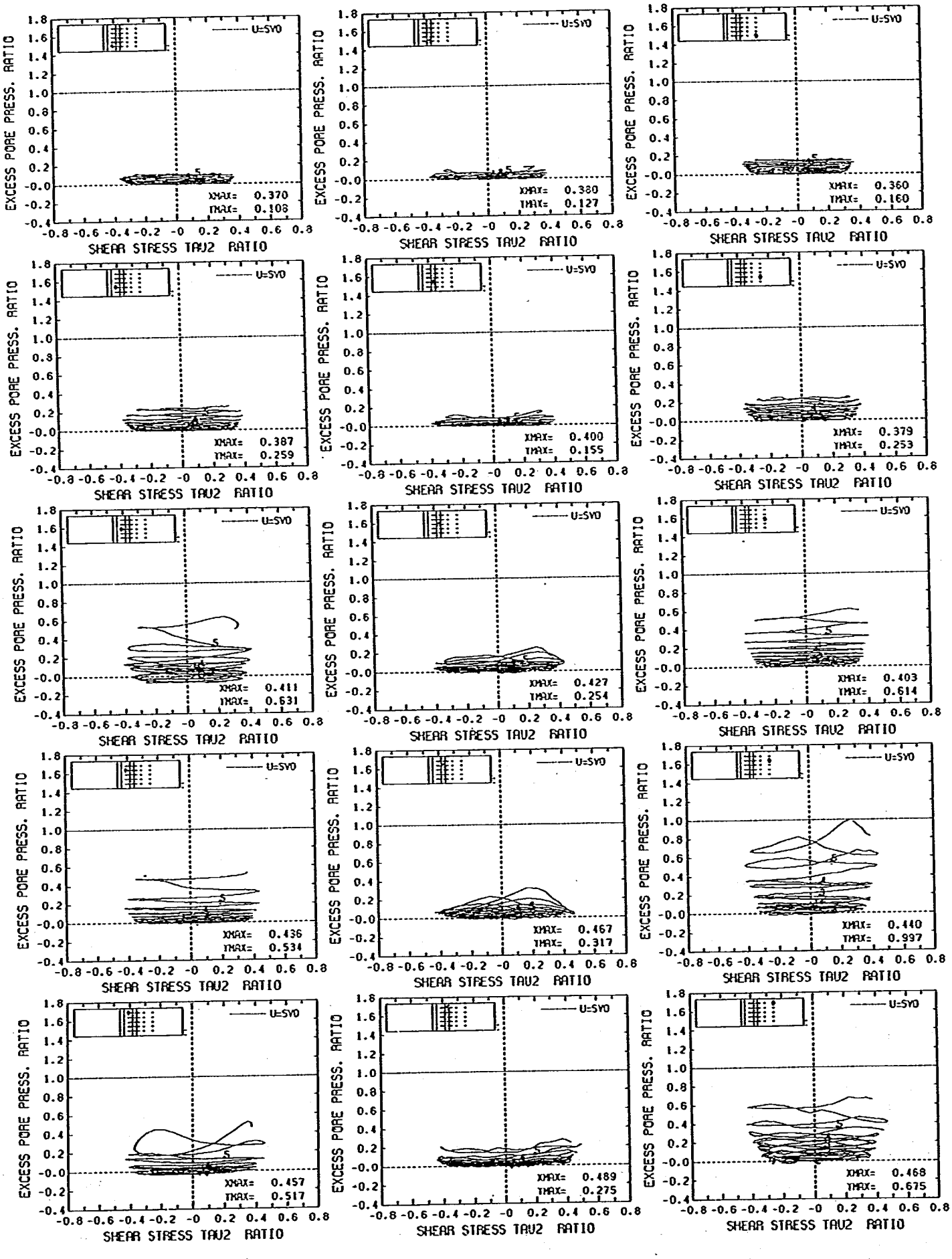
付図－６・13　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－７）



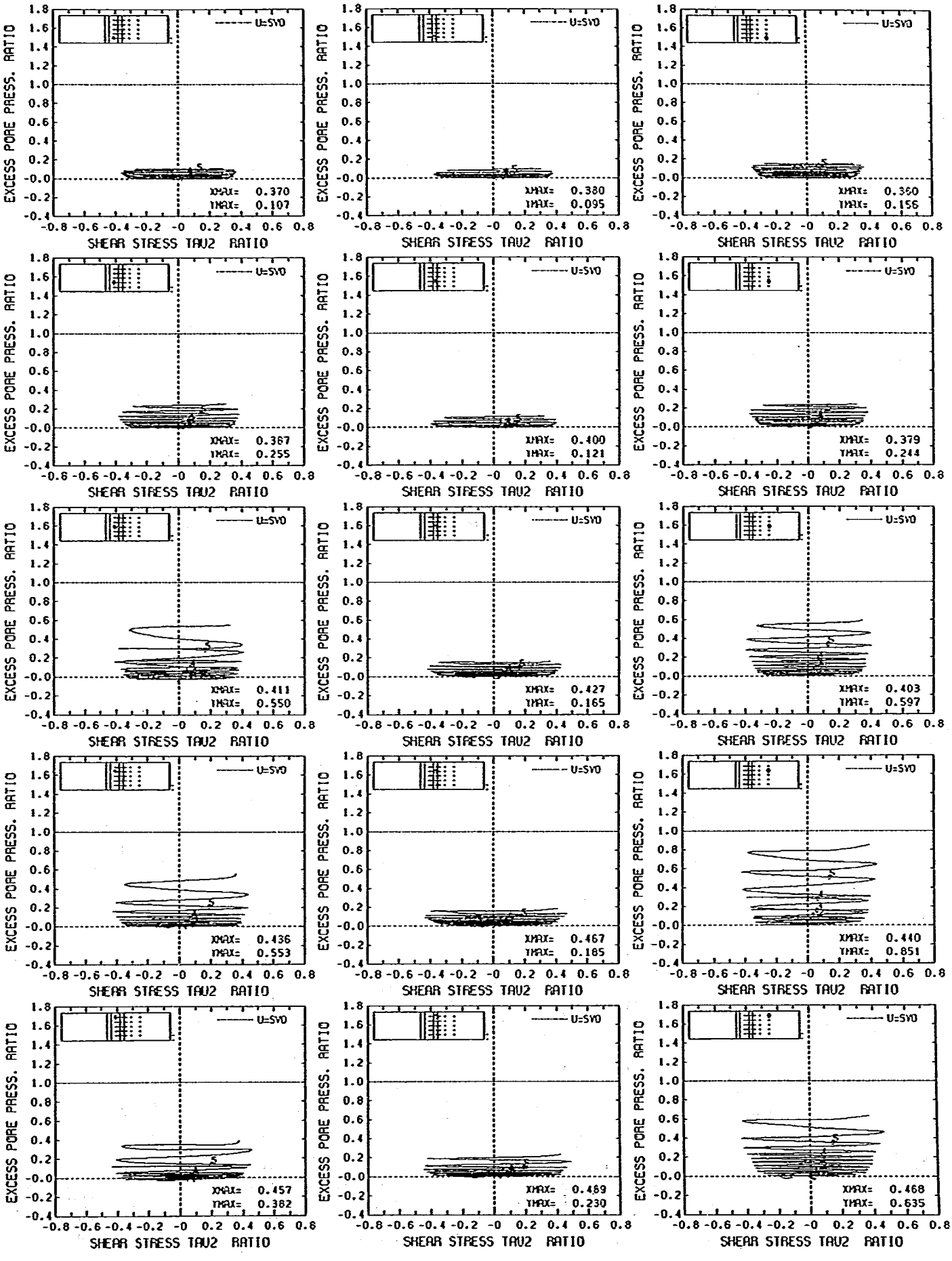
付図－6・14　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－7）



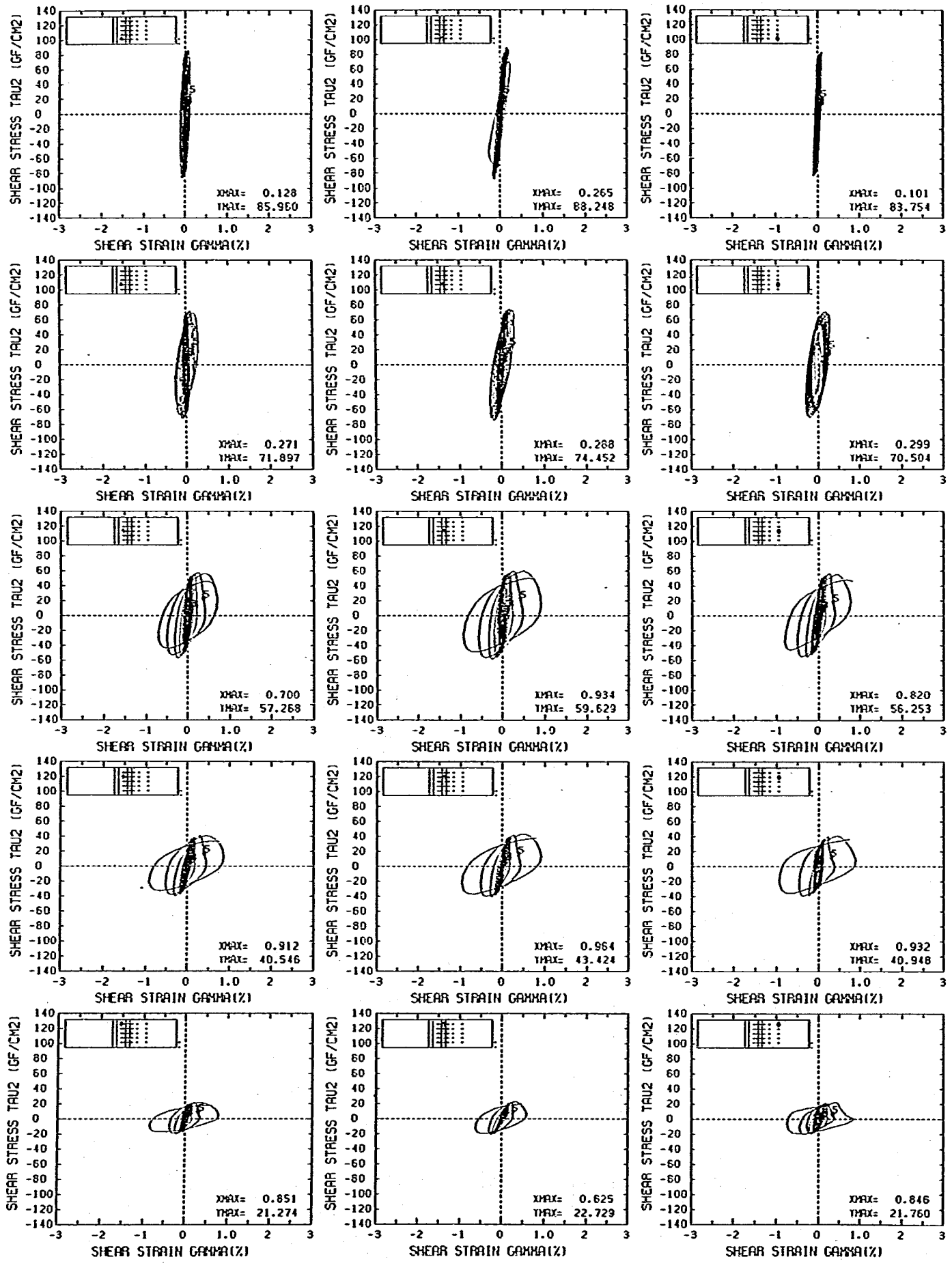
付図－6・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－7）



付図－６・16　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－７）

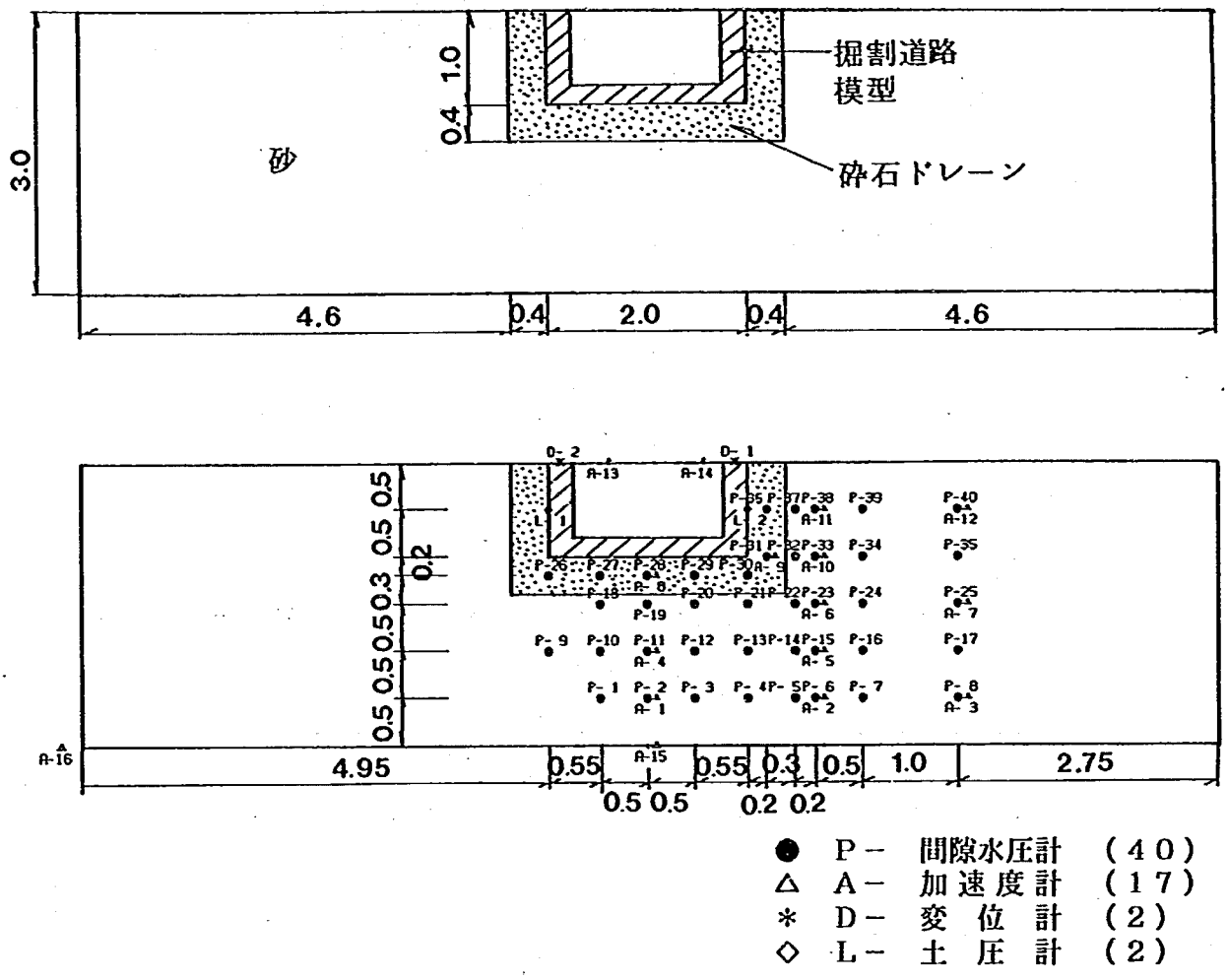


付図－６・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－７）



付図－6・18　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－7）

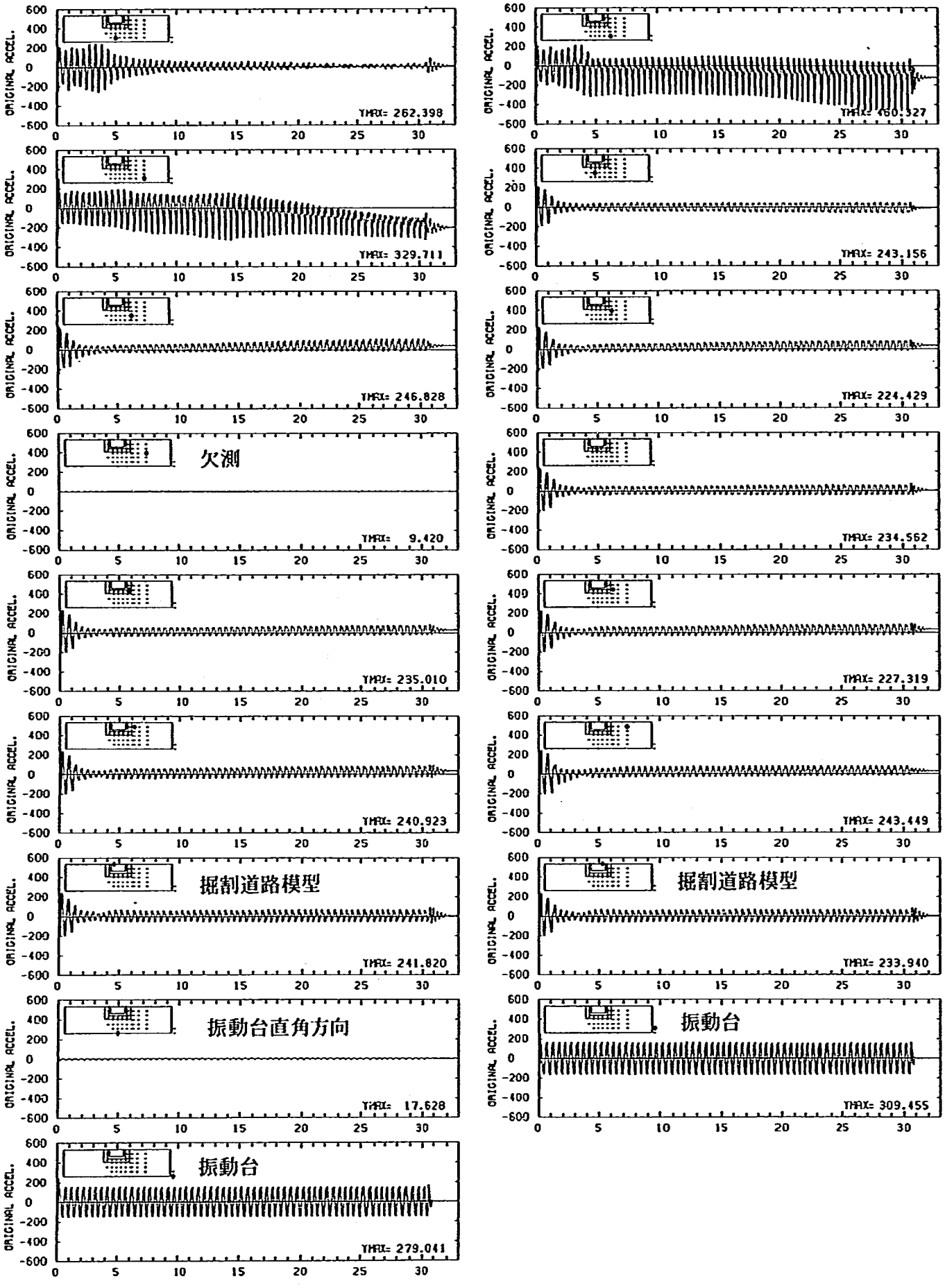
模型 8



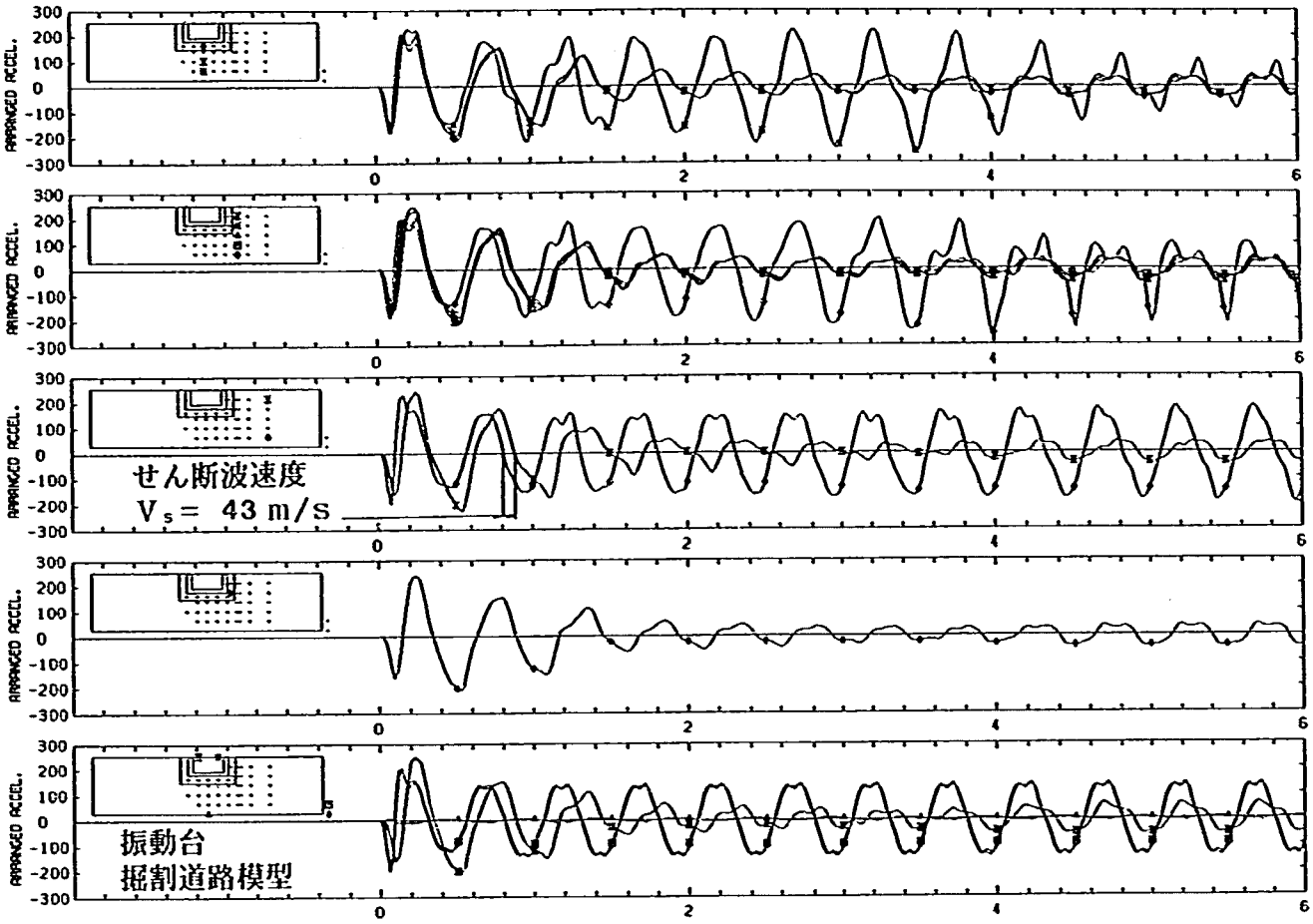
● P－ 間隙水圧計 （４０）
△ A－ 加速度計 （１７）
＊ D－ 変 位 計 （２）
◇ L－ 土 圧 計 （２）

A－１６，A－１７は振動台加速度
A－１５は加振直角方向
A－１３，A－１４は掘割道路模型上の手前側と奥側
A－７は欠測

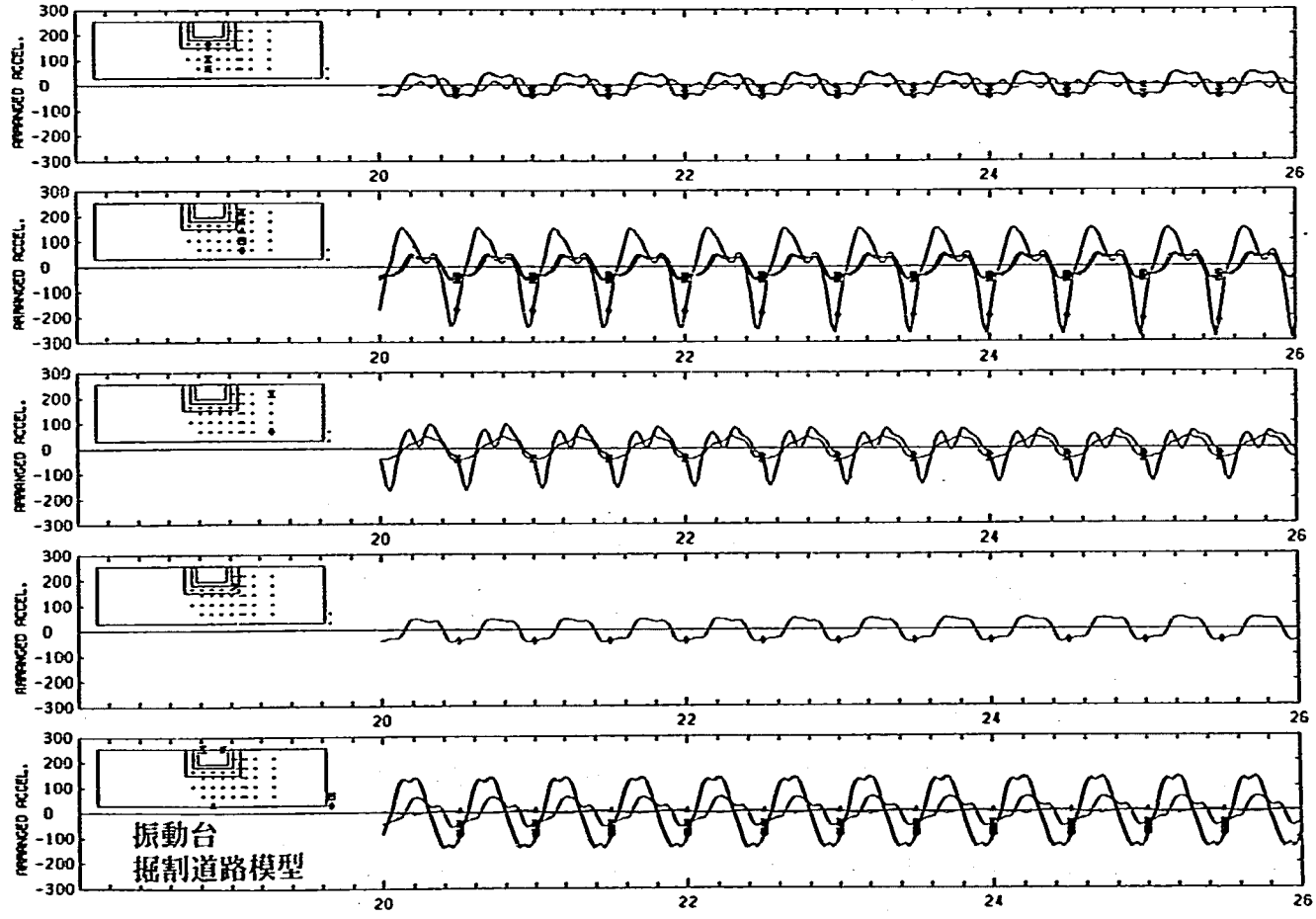
付図－７・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－８）



付図－７・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－８）

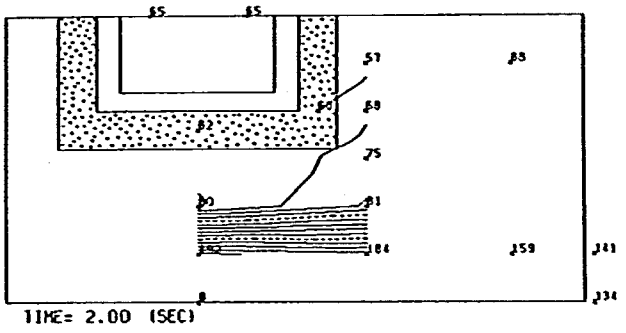


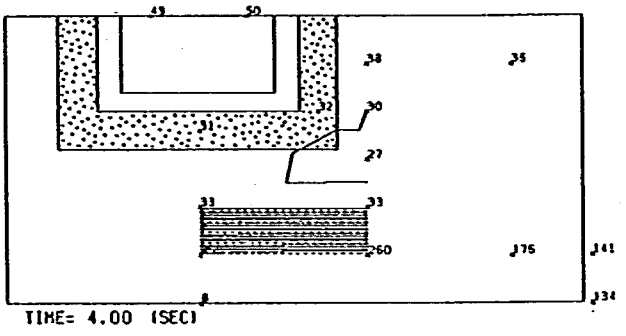
（a）加振開始直後（０～６秒）

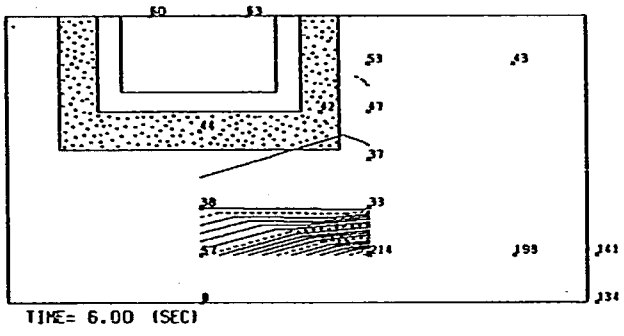


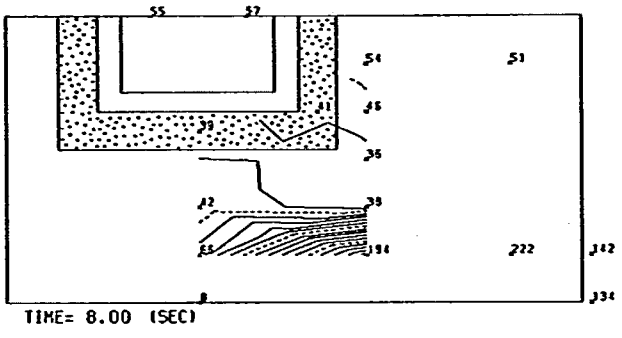
（b）液状化後（２０～２６秒）

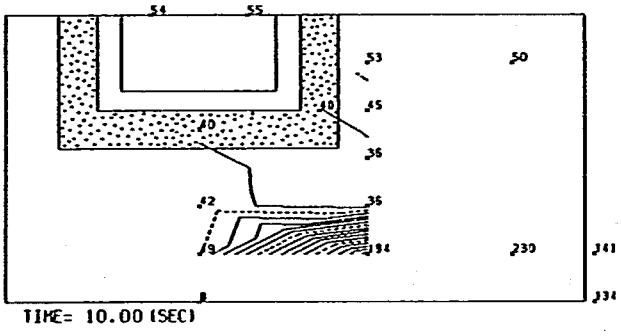
付図－７・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－８）

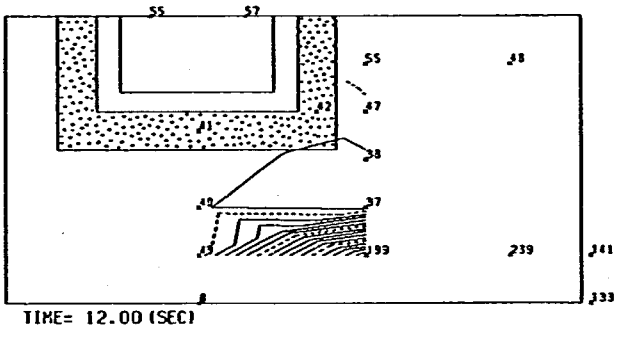


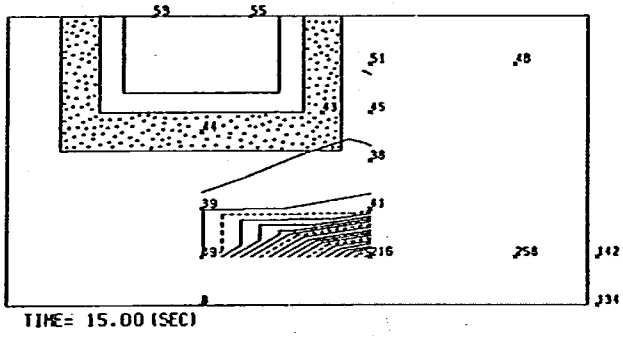


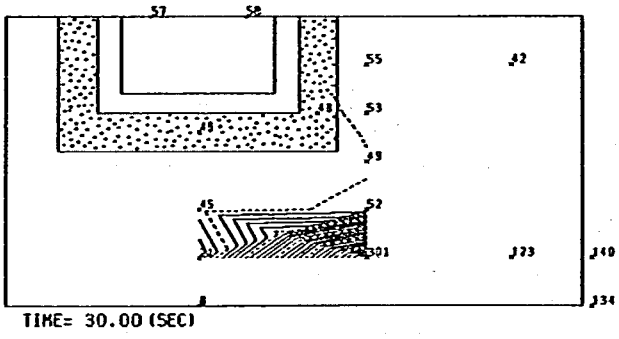




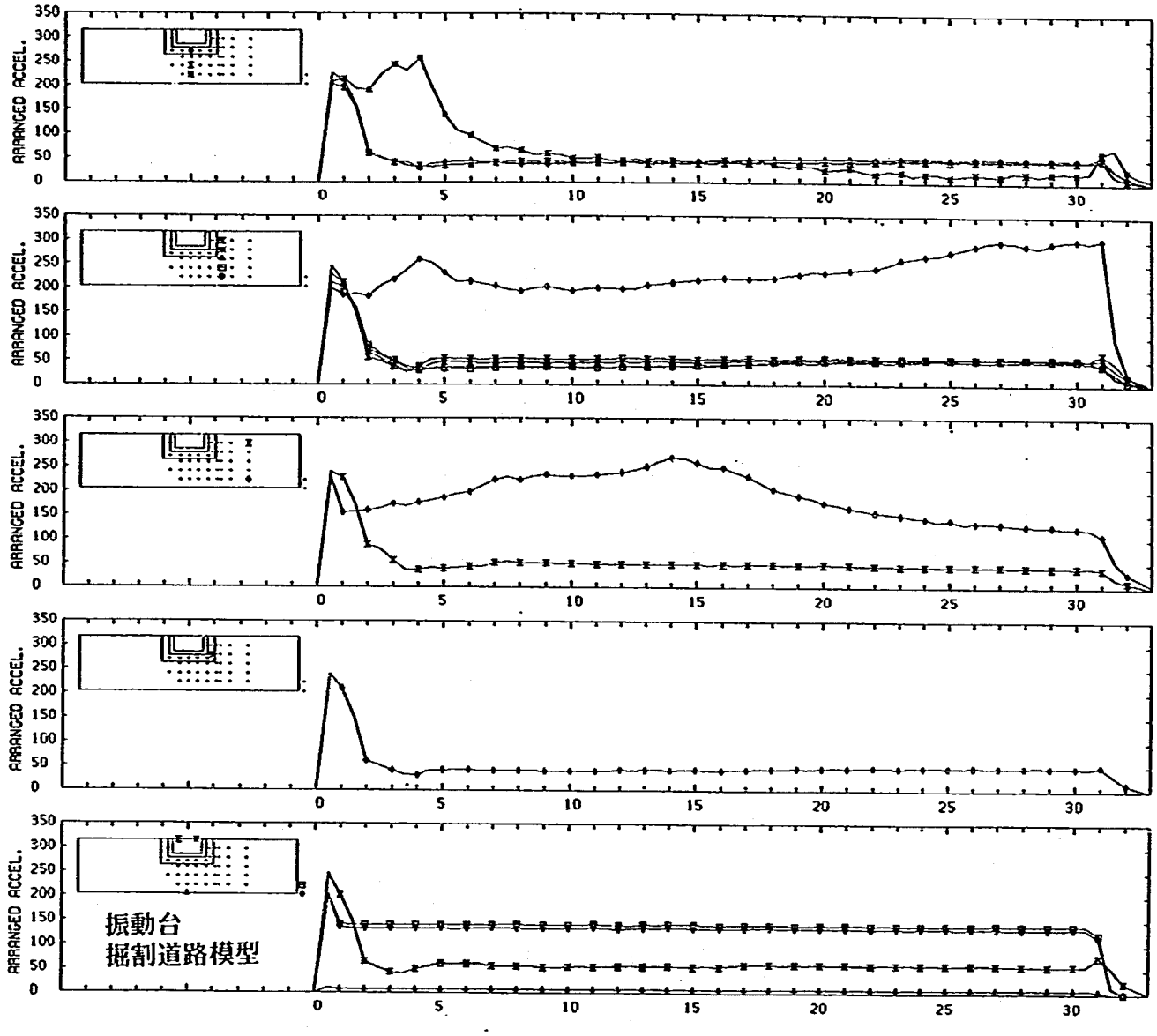




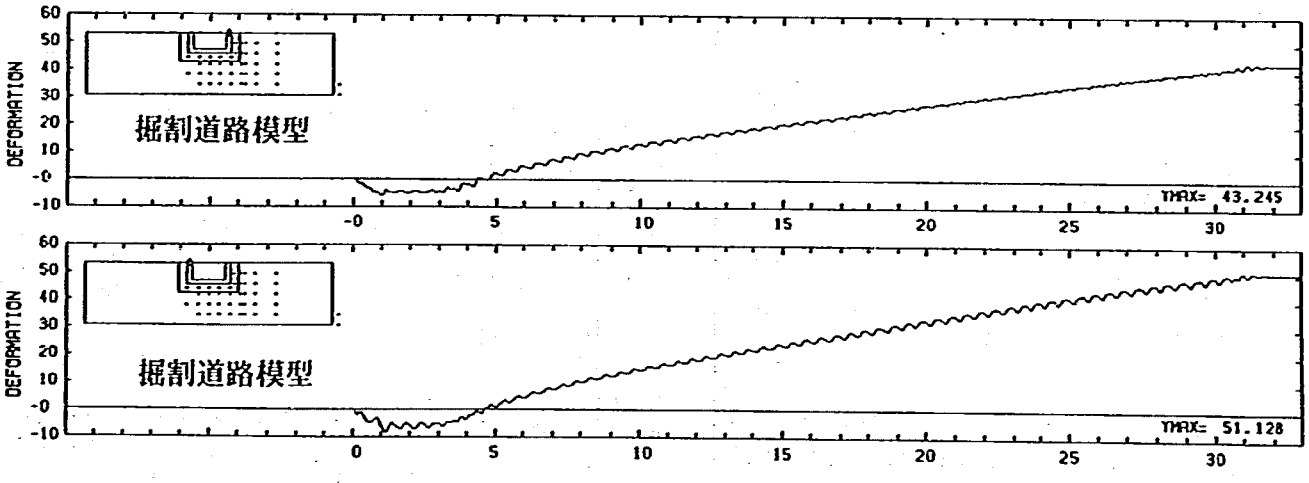




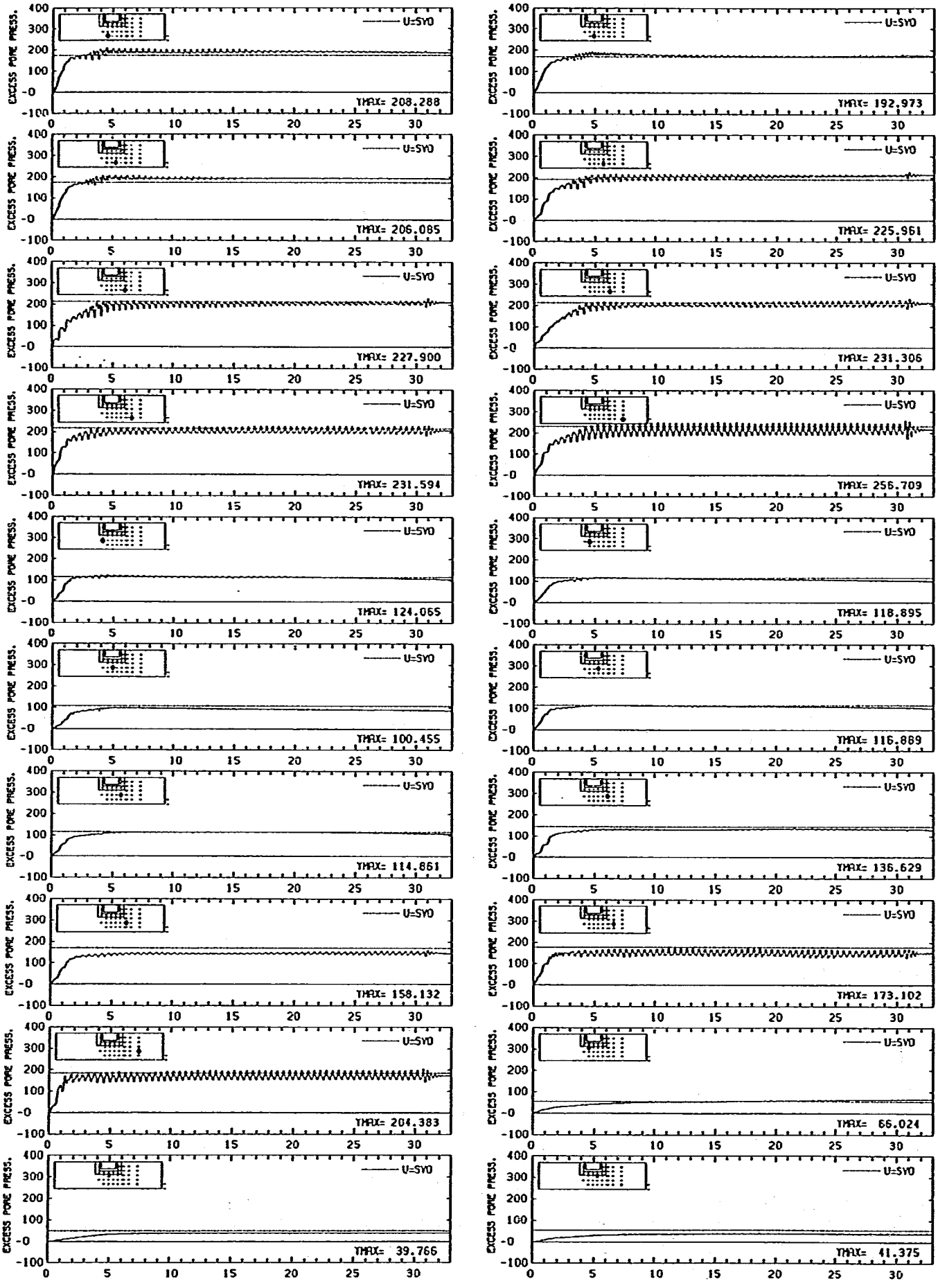
付図－７・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ10gal、模型－８）



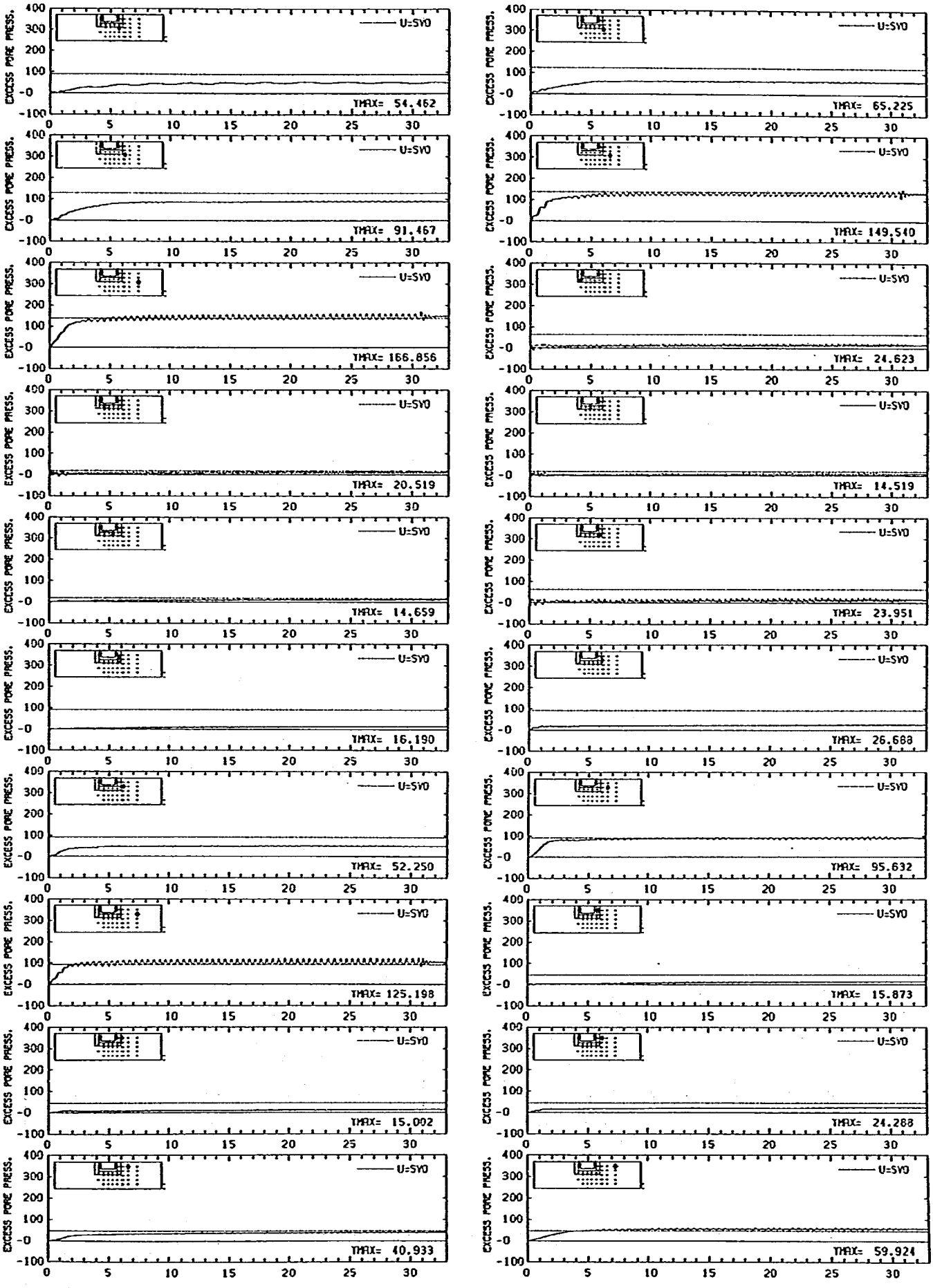
付図－７・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－８）



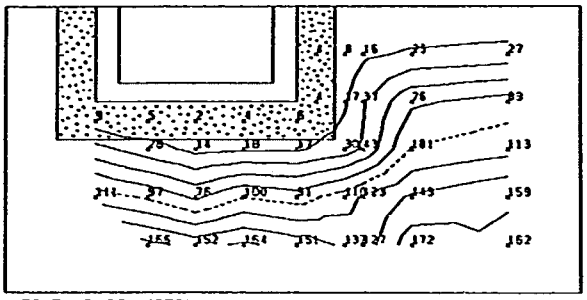
付図－７・６　変位計による掘割道路模型の浮上量の測定結果（単位：㎜、模型－８）



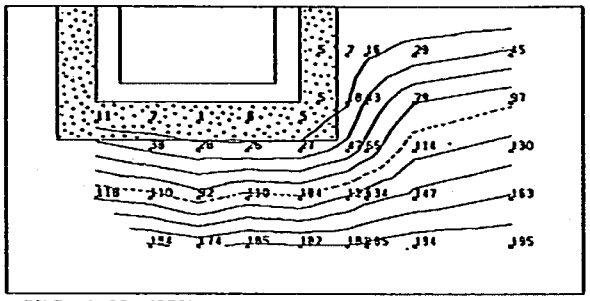
付図－７・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－８）



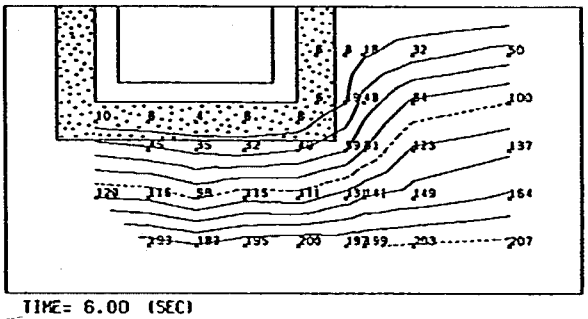
付図－７・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－８）



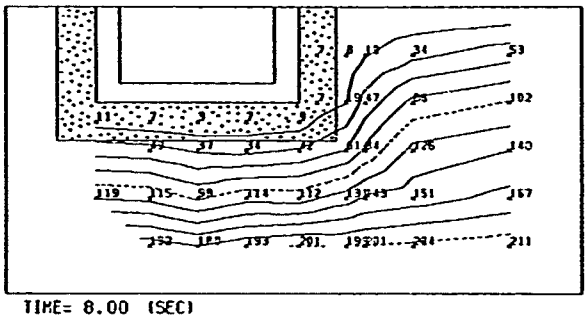
TIME= 2.00 (SEC)



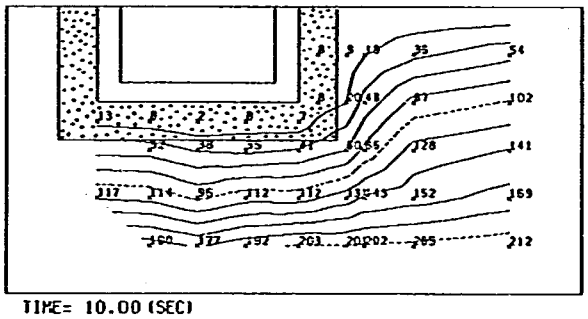
TIME= 4.00 (SEC)



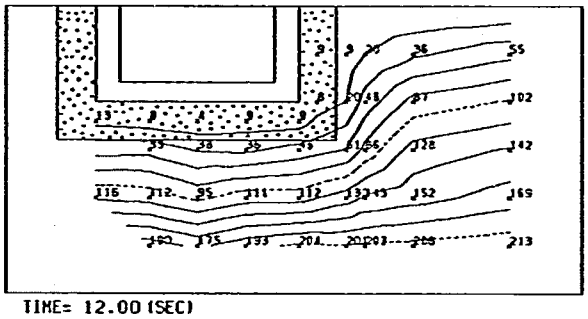
TIME= 6.00 (SEC)



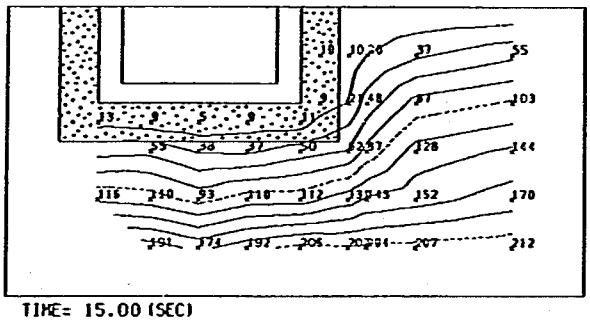
TIME= 8.00 (SEC)



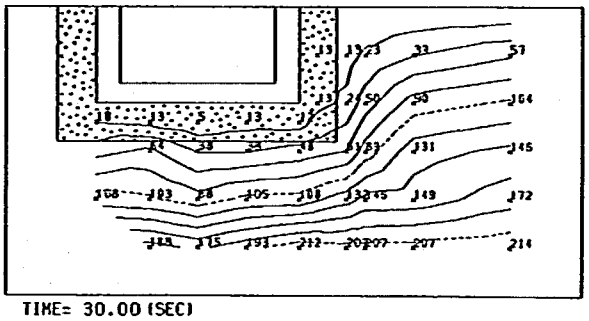
TIME= 10.00 (SEC)



TIME= 12.00 (SEC)

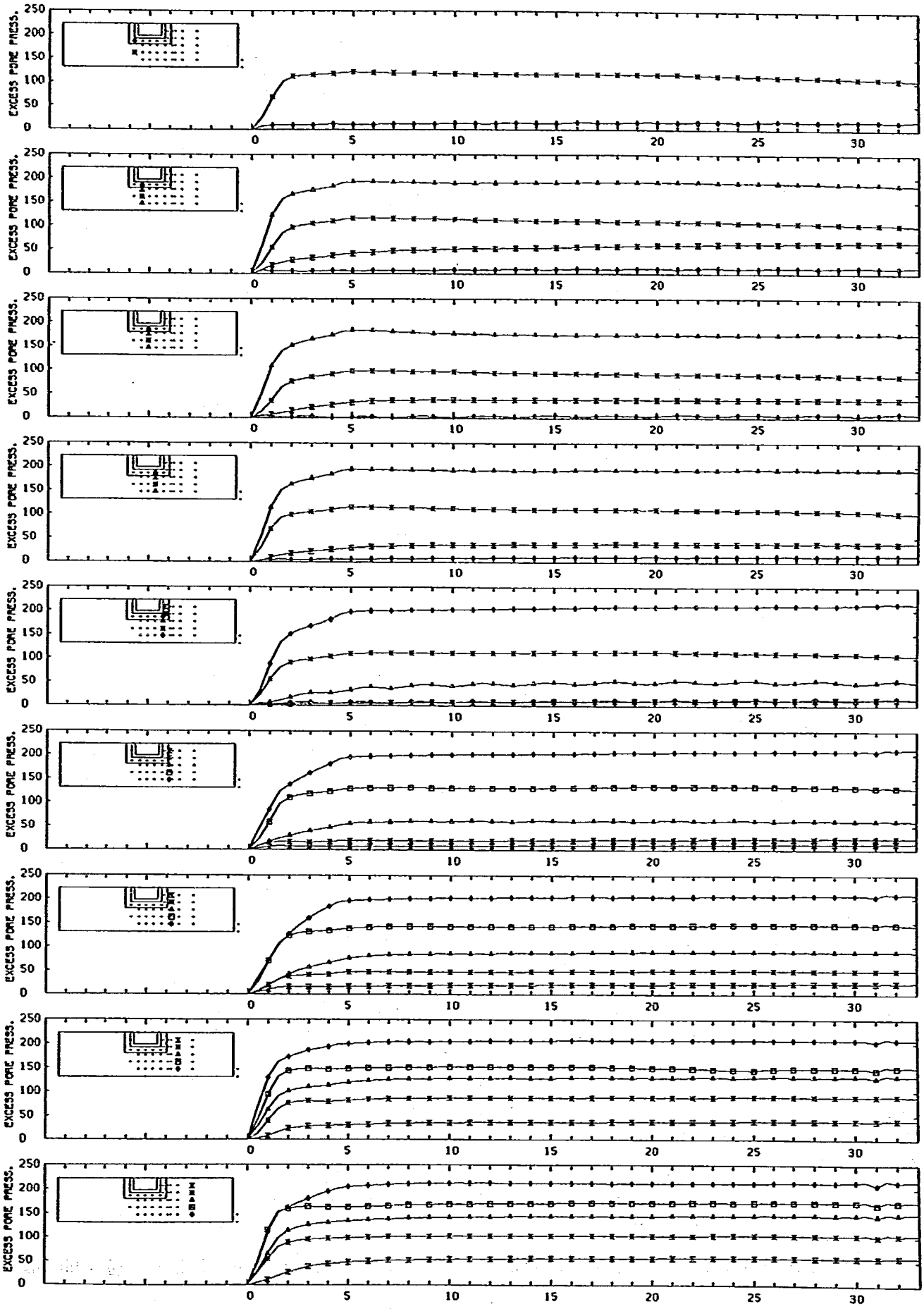


TIME= 15.00 (SEC)

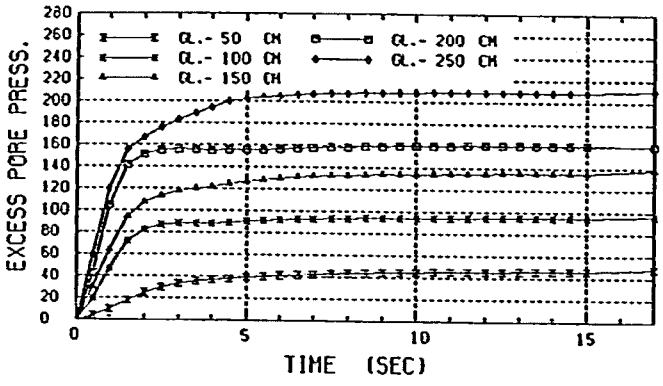


TIME= 30.00 (SEC)

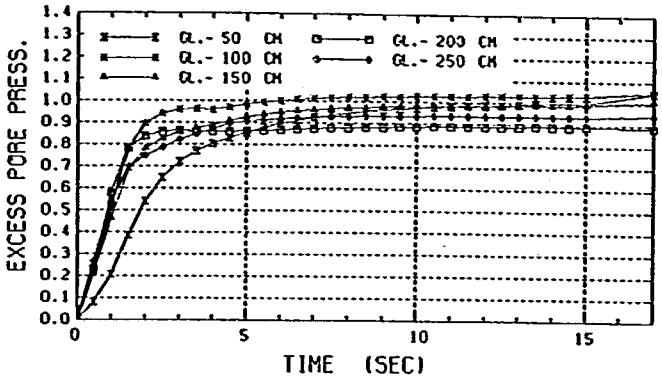
付図－７・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm²、模型－８）



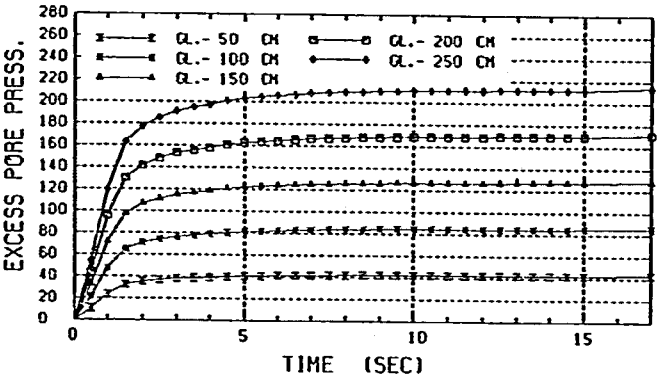
付図－７・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－８）



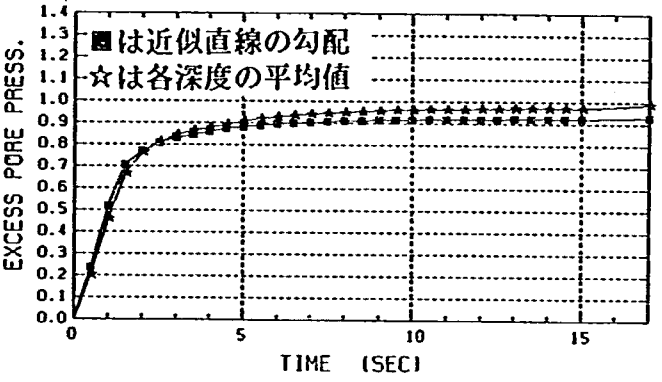
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



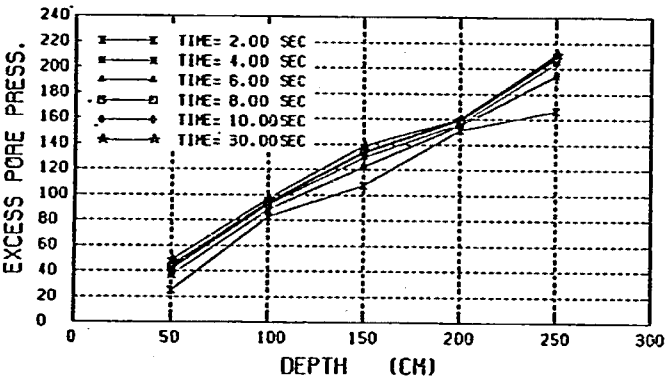
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



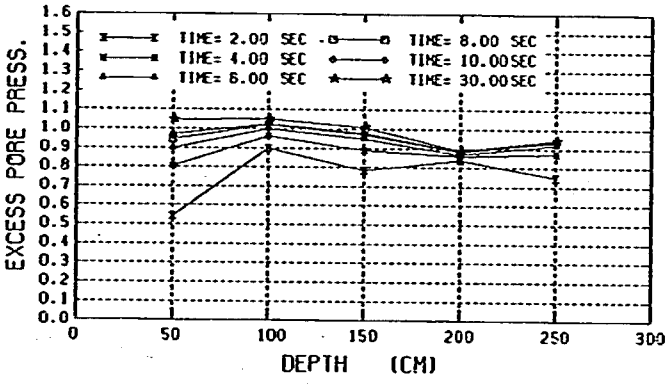
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



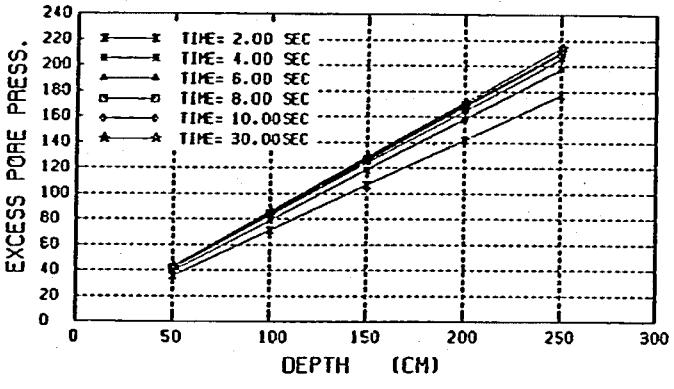
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



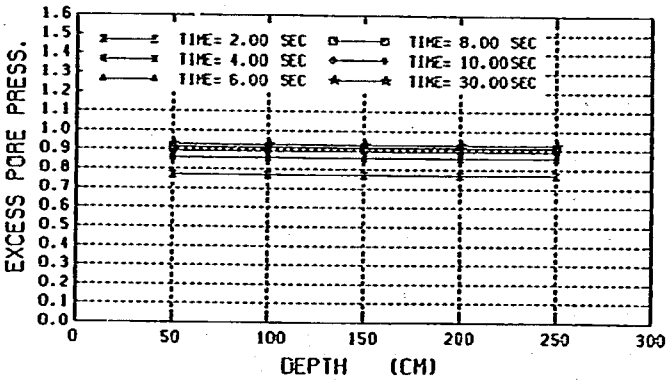
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

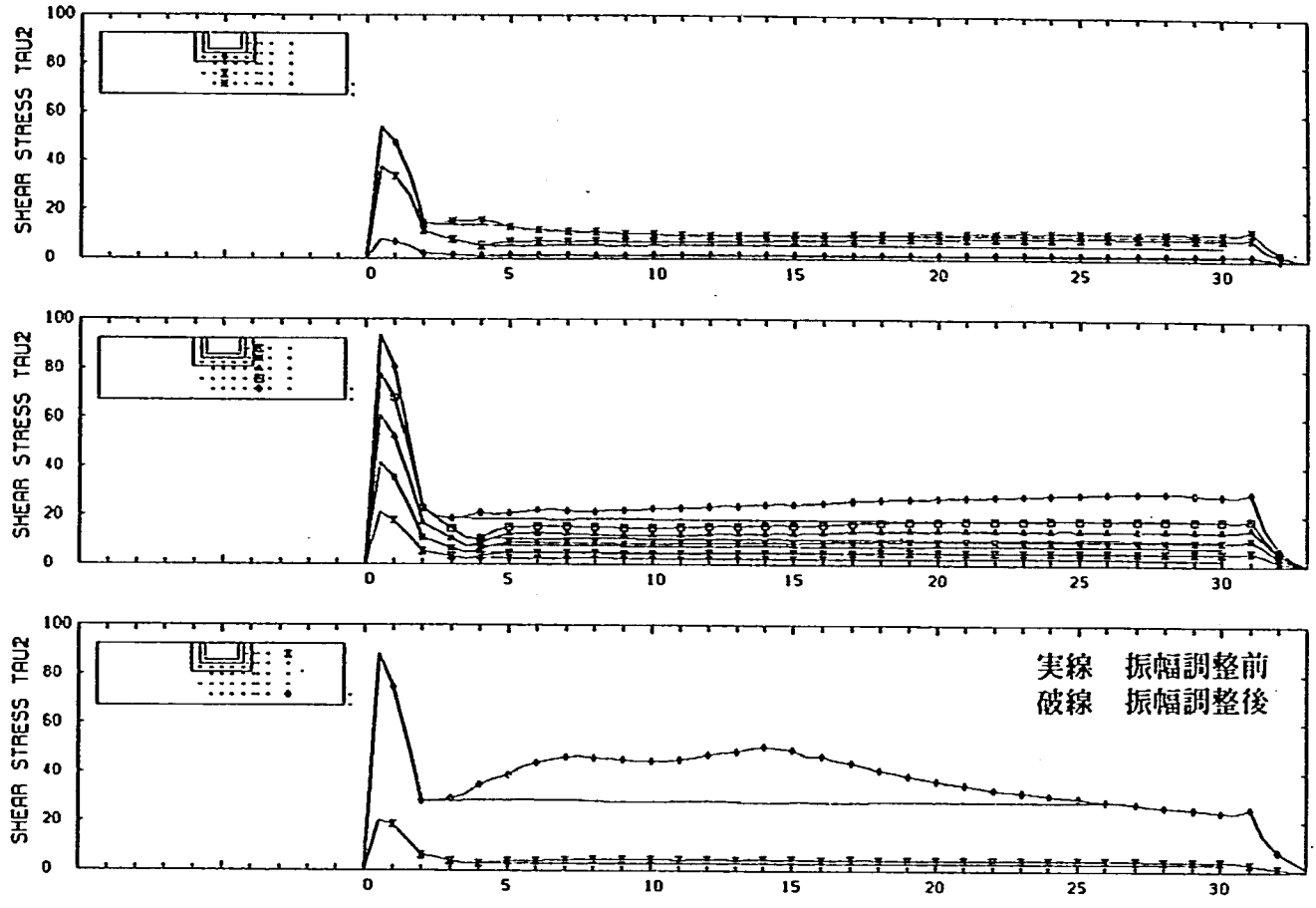


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

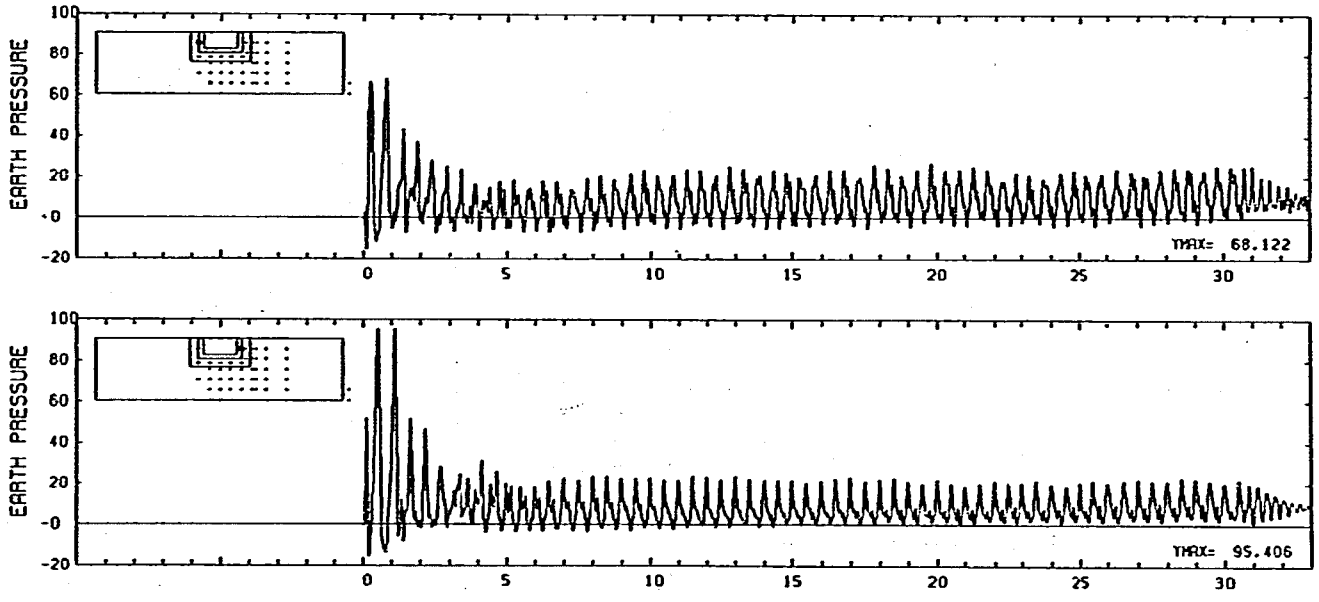


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

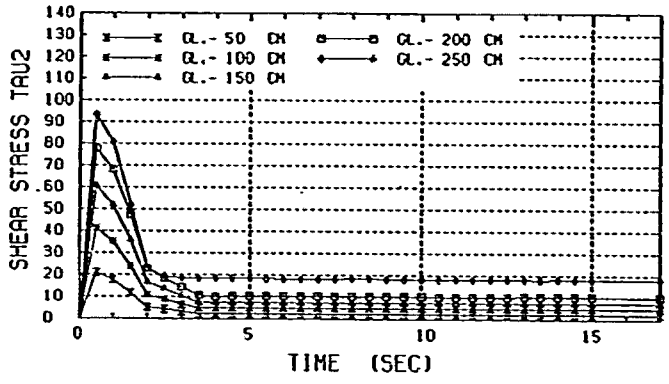
付図－７・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－８）



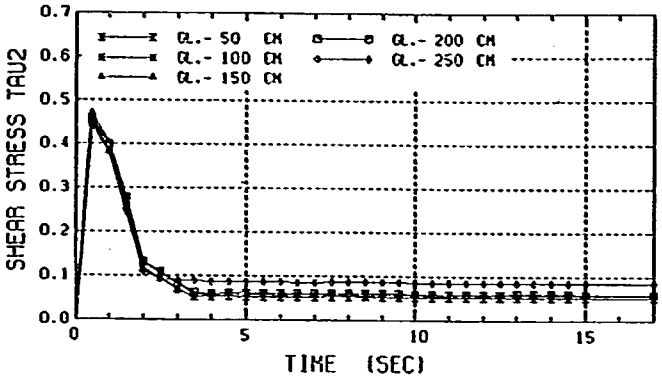
付図－７・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－８）



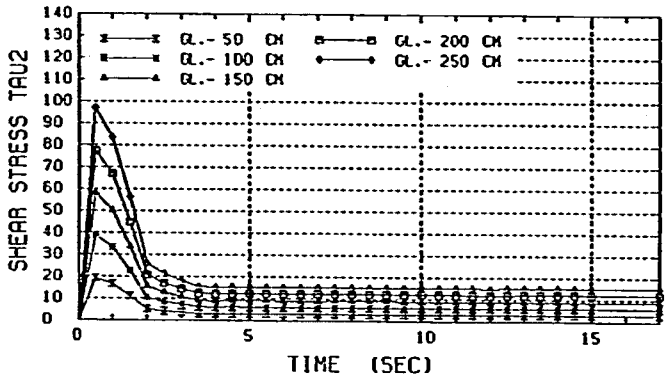
付図－７・13　掘割道路模型に作用する土圧の計測結果（単位：gf/cm²、模型－８）



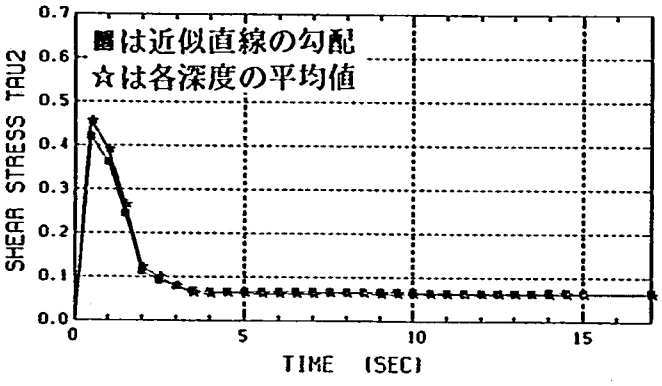
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



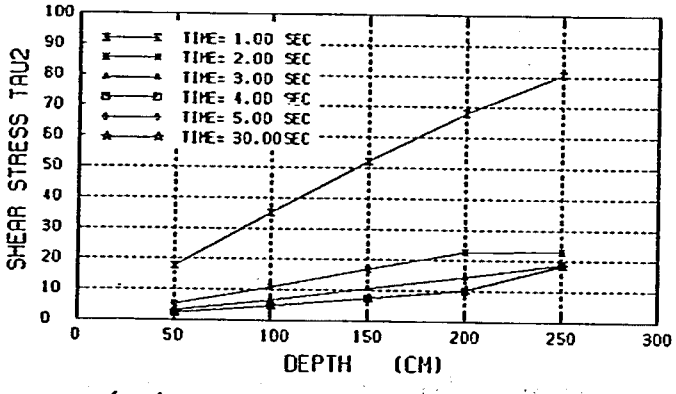
（ｂ）同左のせん断応力比



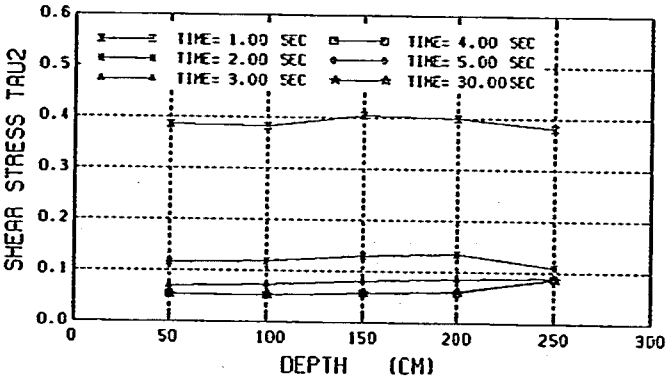
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



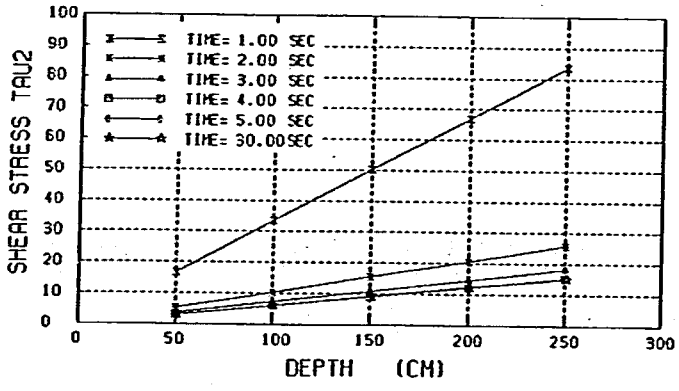
（ｄ）同左のせん断応力比



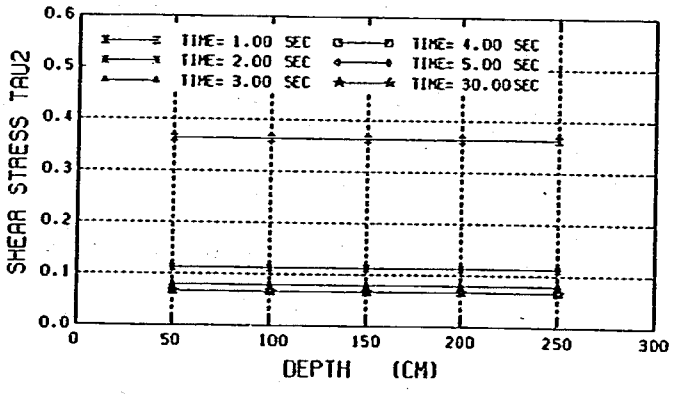
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

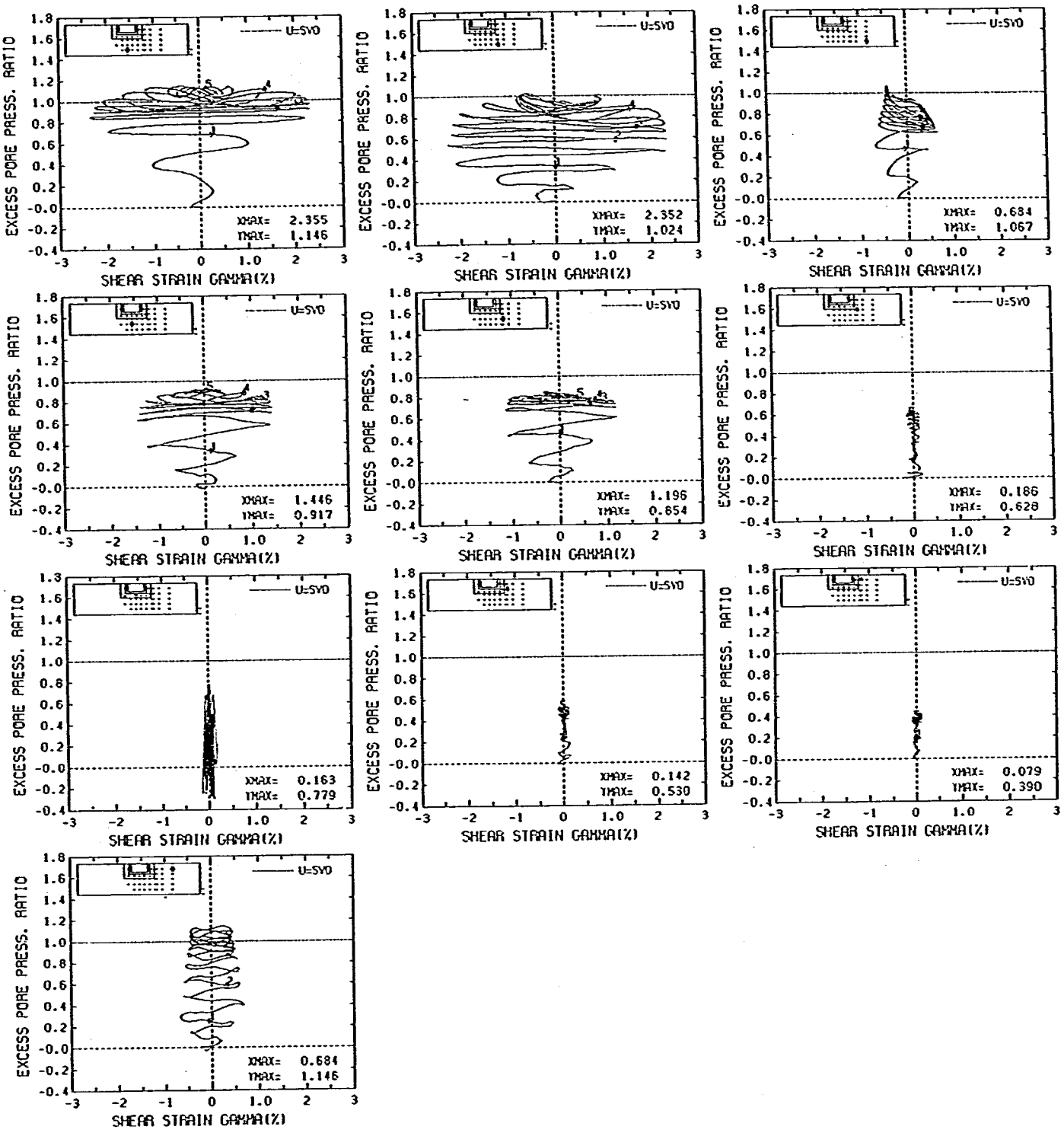


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

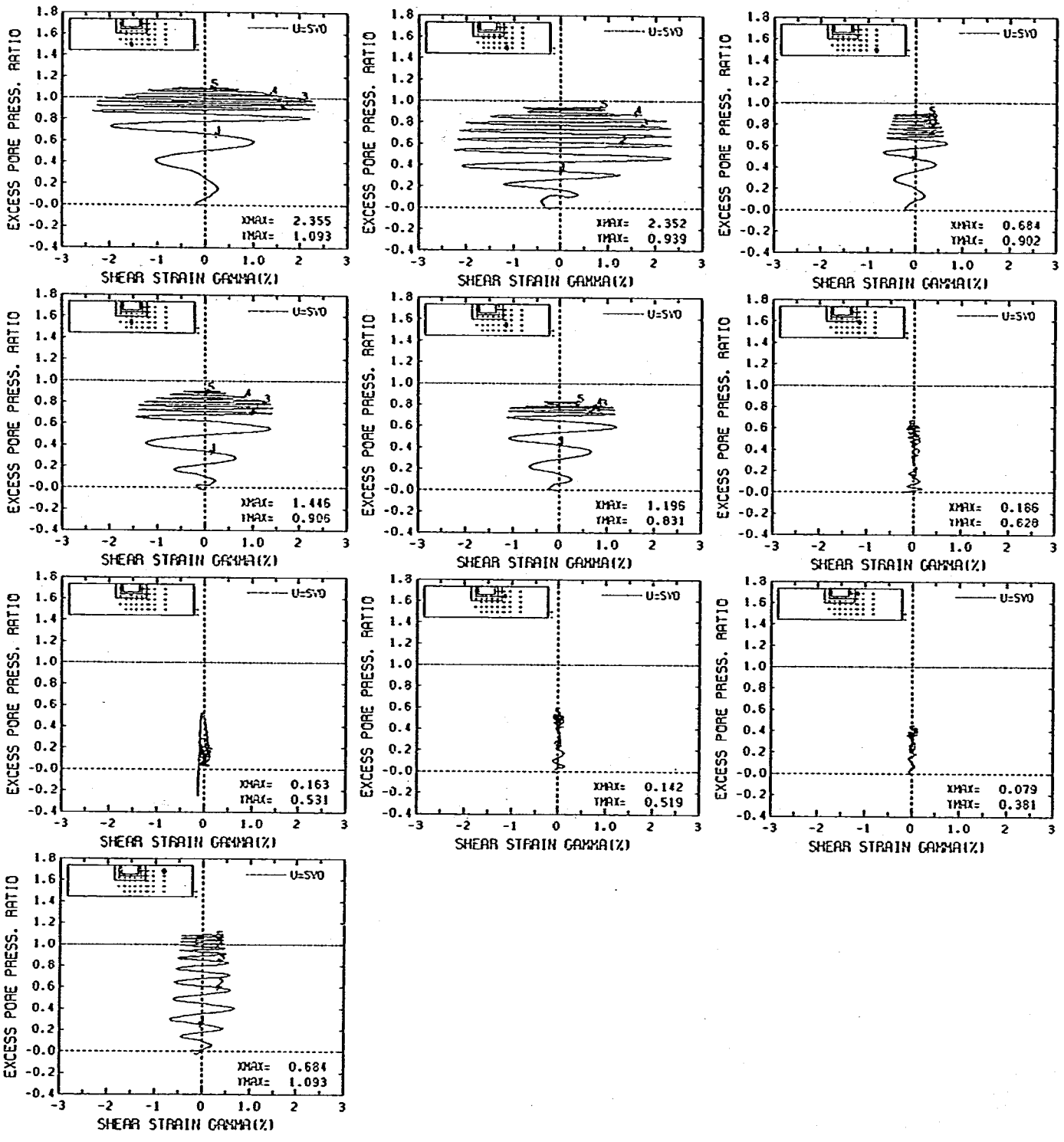


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

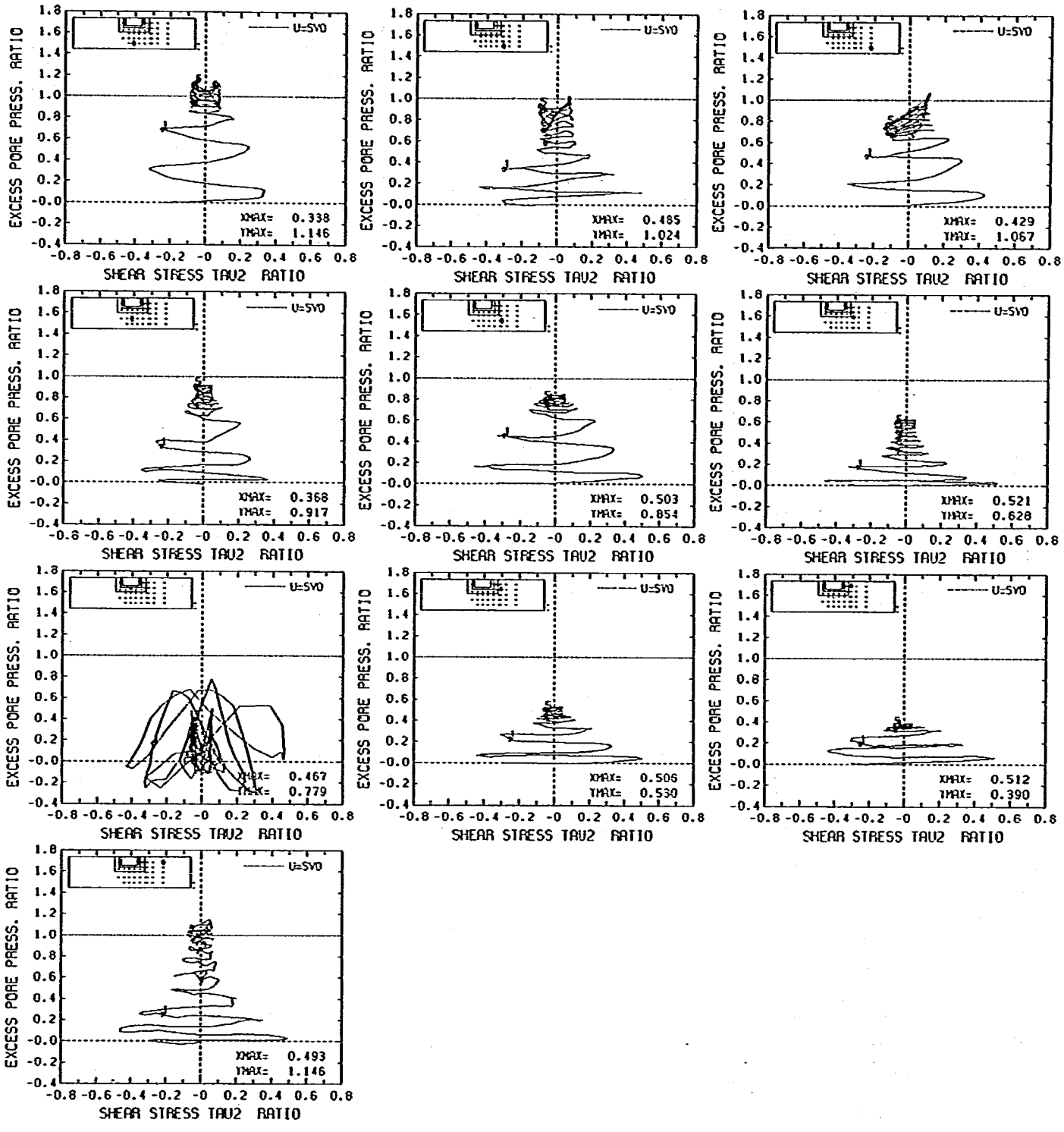
付図－７・14　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－８）



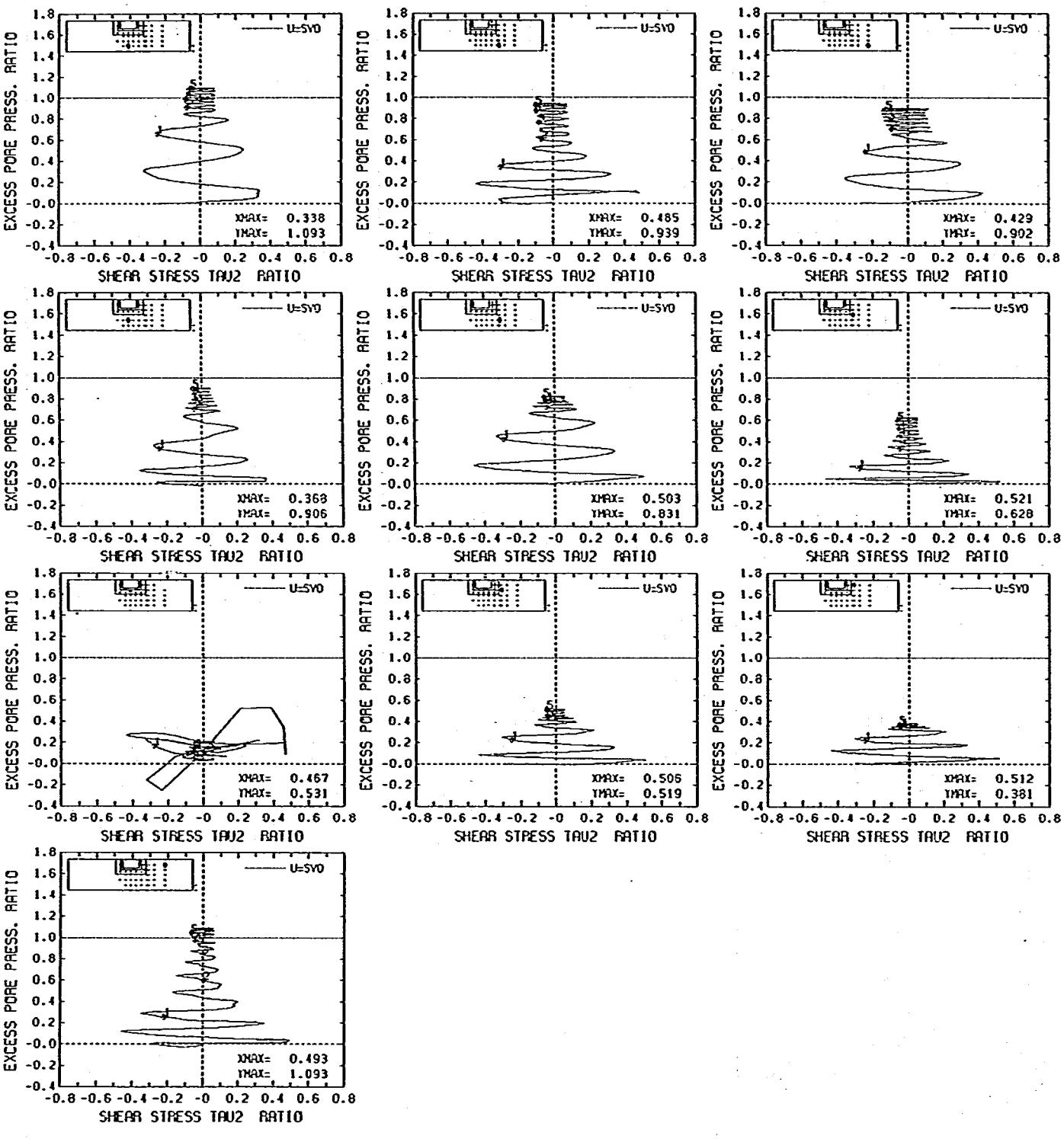
付図－7・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－8）



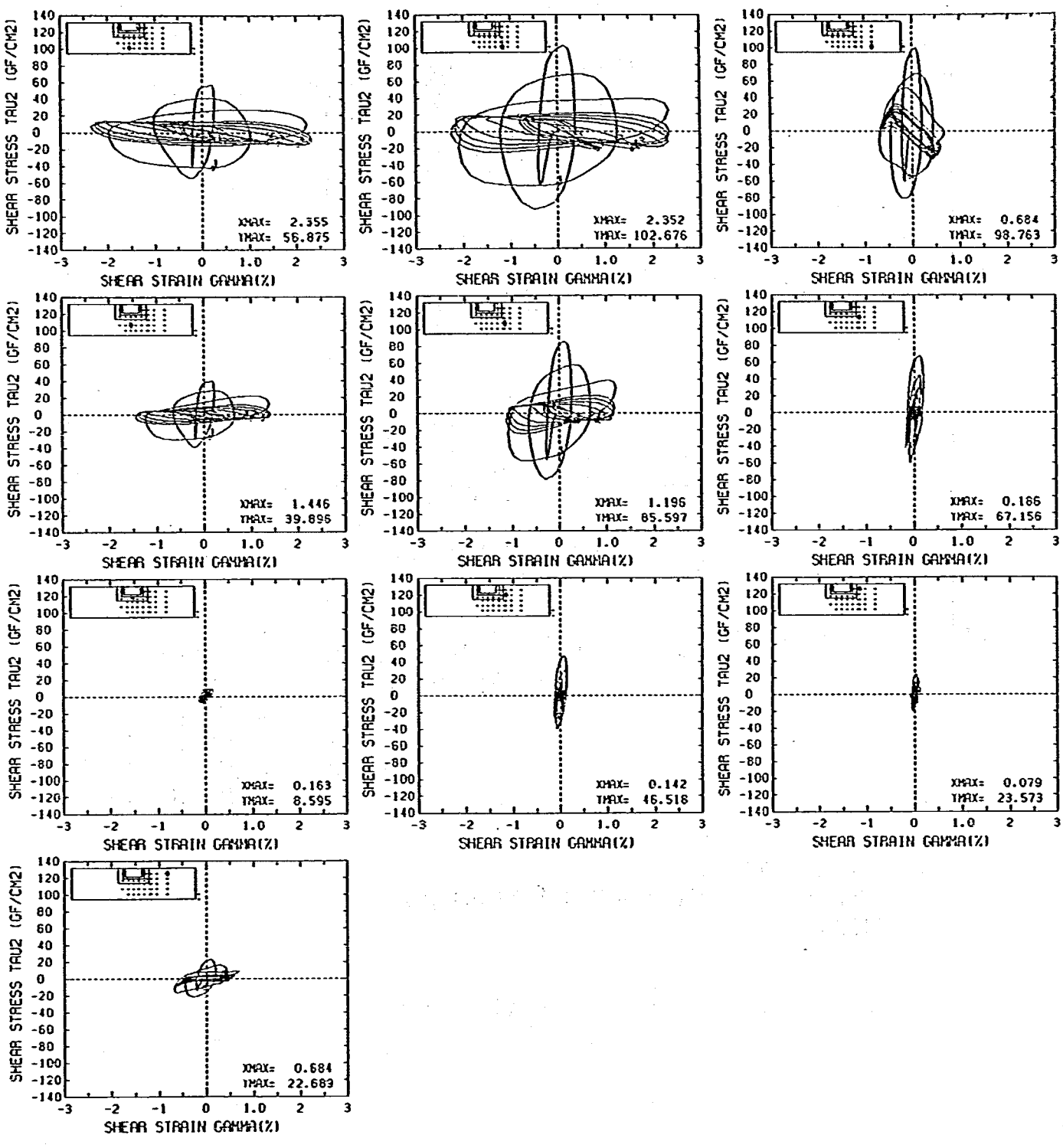
付図－７・16　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－８）



付図－7・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－8）

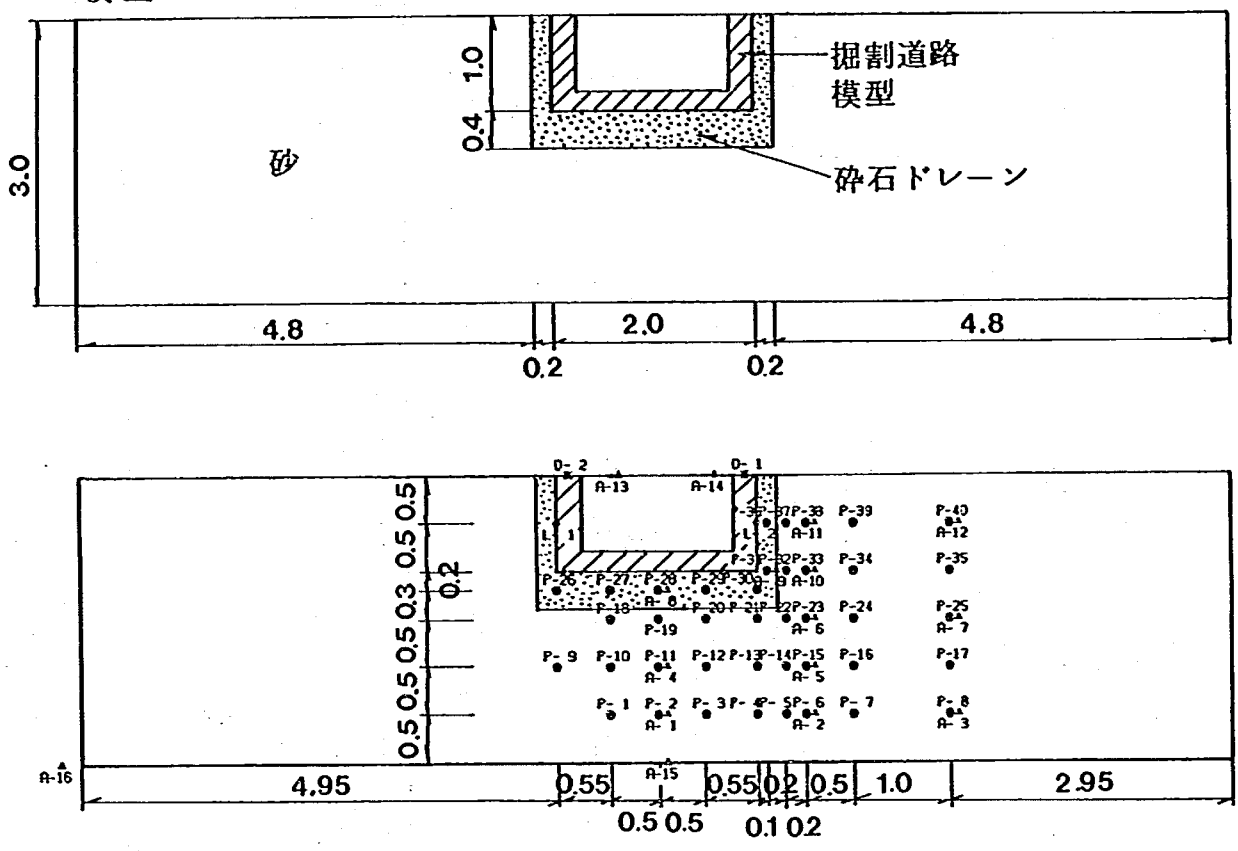


付図－７・18　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－８）



付図－７・19　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－８）

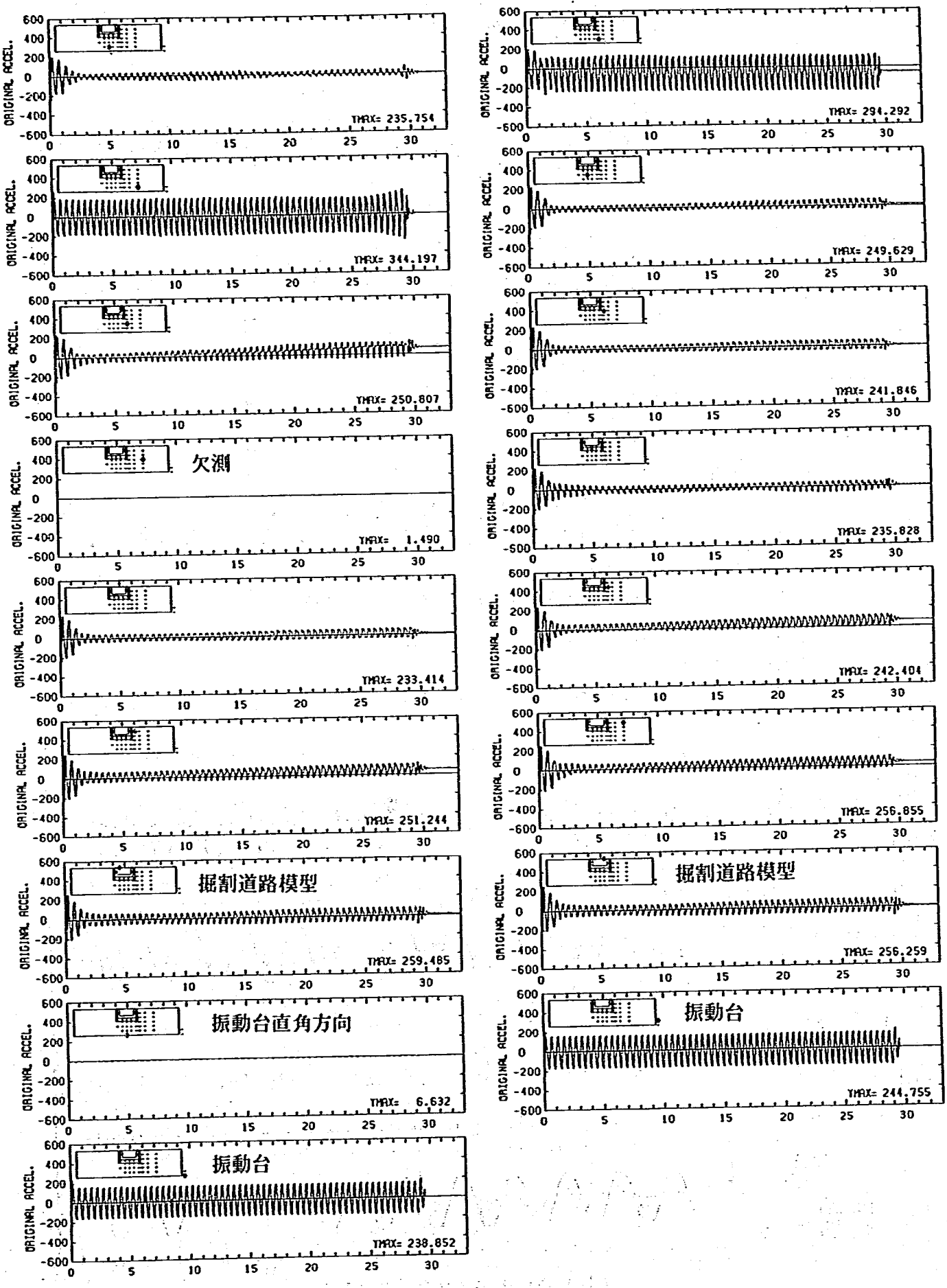
模型 9



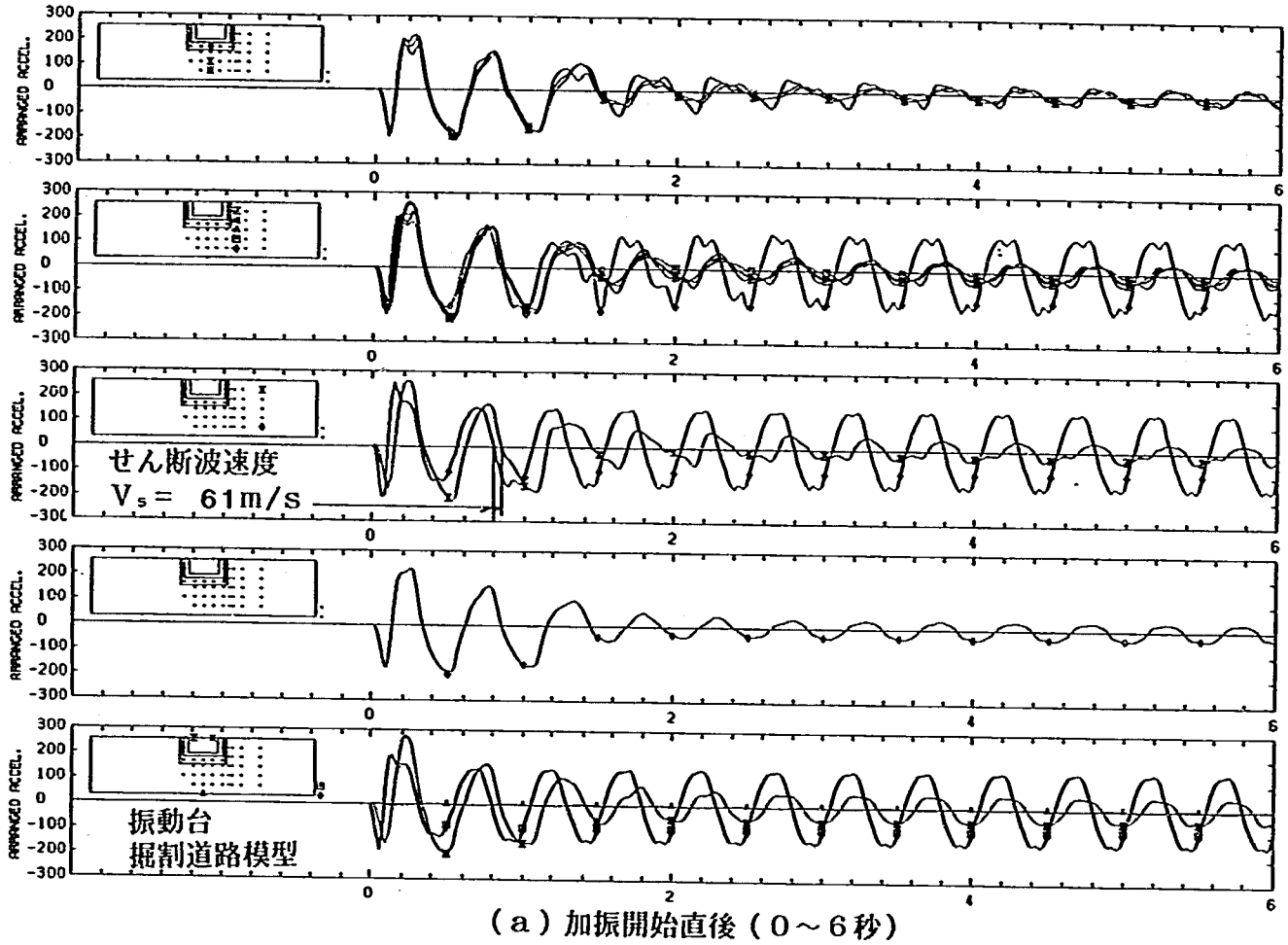
● P－ 間隙水圧計 （４０）
△ A－ 加速度計 （１７）
＊ D－ 変位計 （２）
◇ L－ 土圧計 （２）

A－１６，A－１７は振動台加速度
A－１５は加振直角方向
A－１３，A－１４は掘割道路模型上の手前側と奥側
A－７は欠測

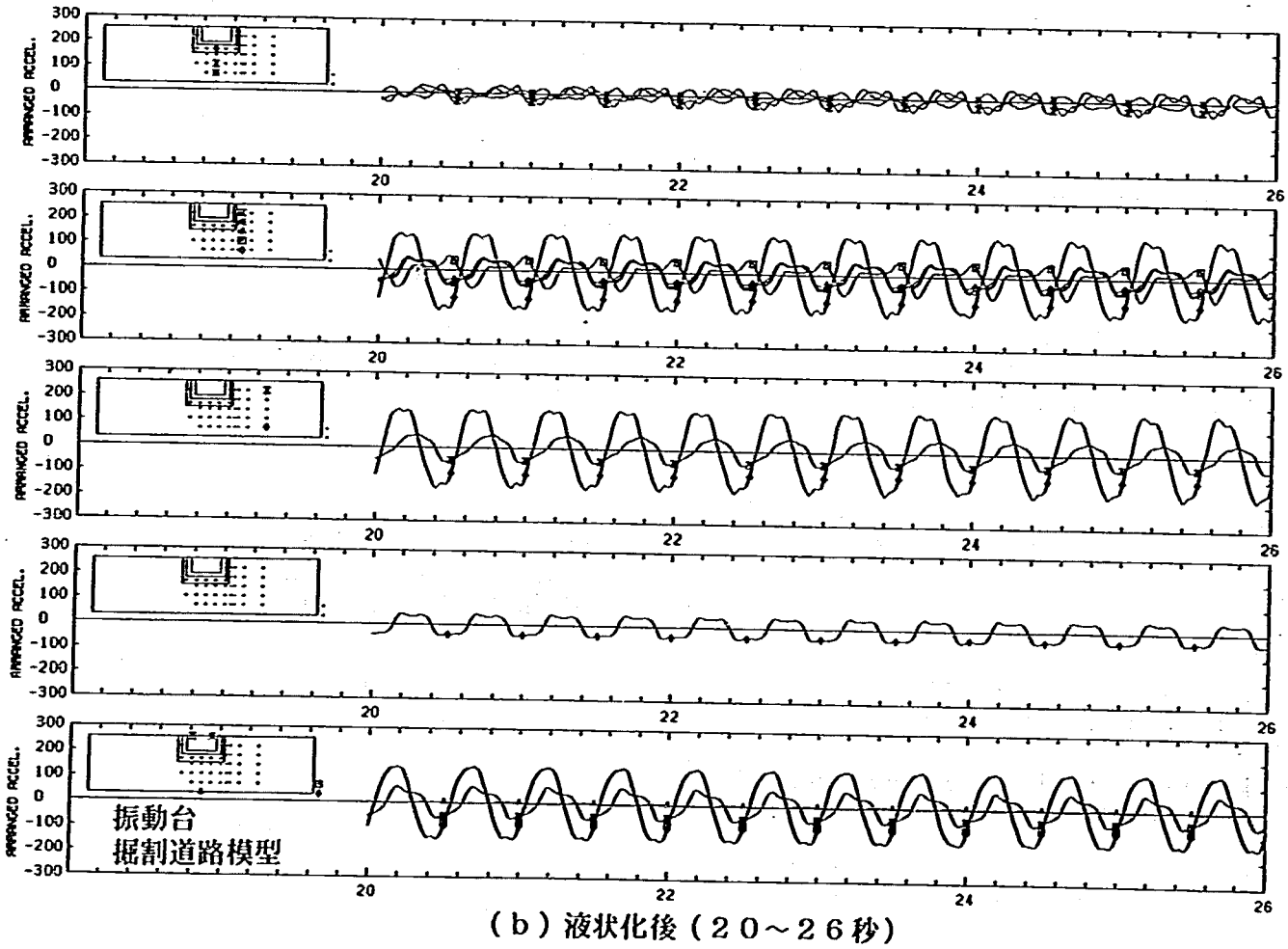
付図－８・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－９）



付図－８・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－９）

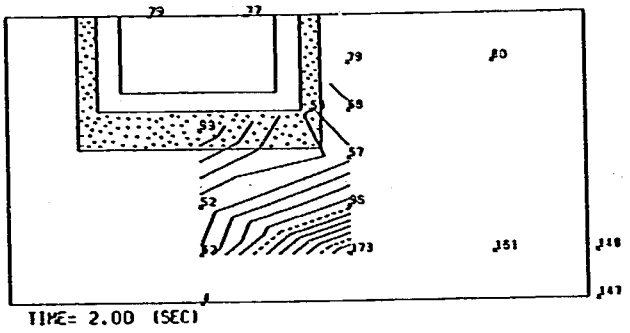


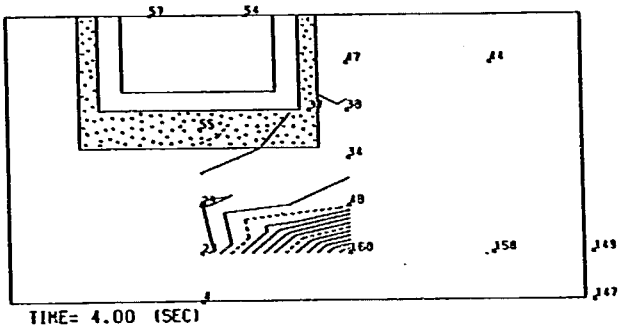
（a）加振開始直後（0～6秒）

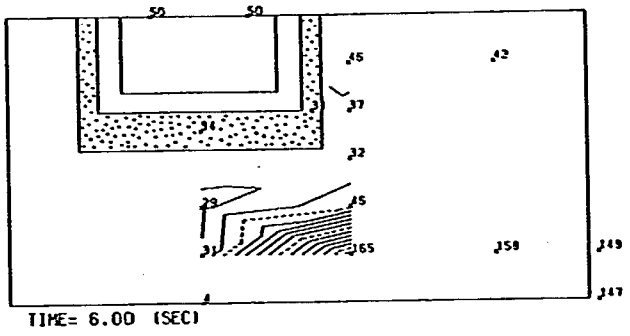


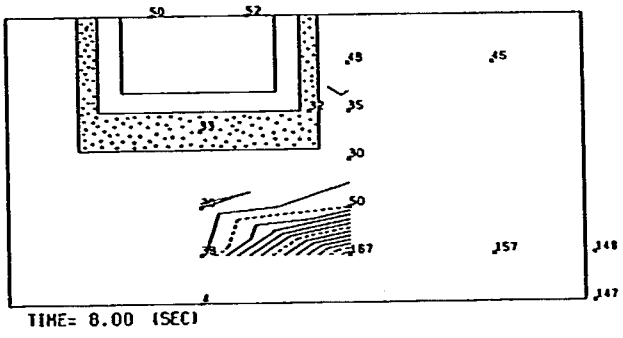
（b）液状化後（20～26秒）

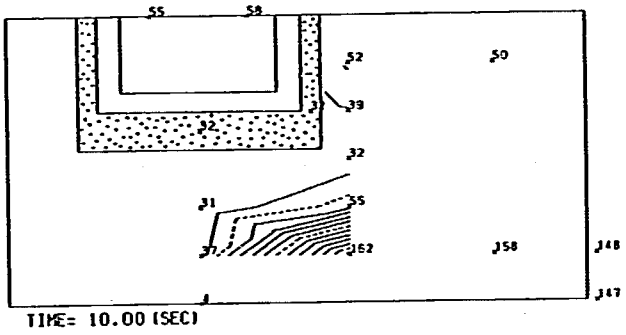
付図－8・3　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－9）

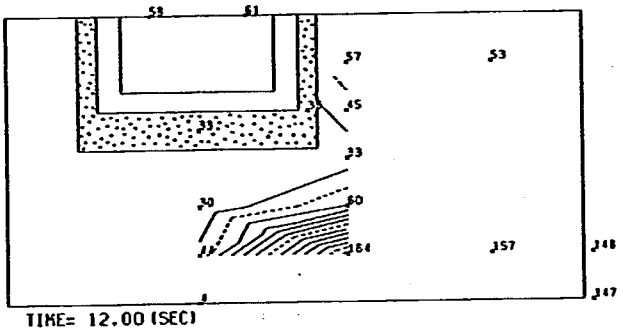


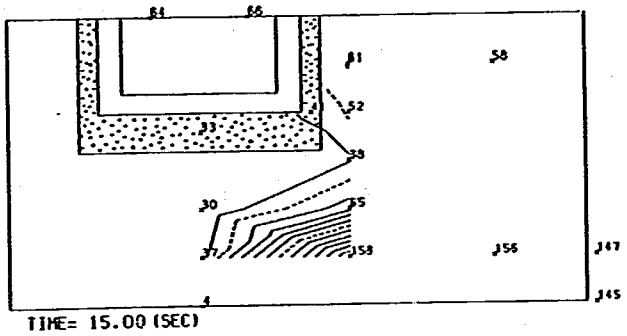


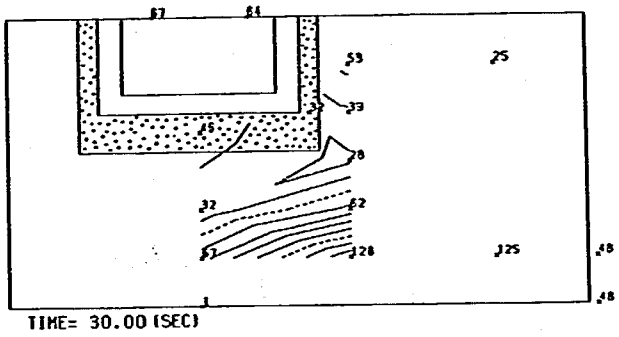




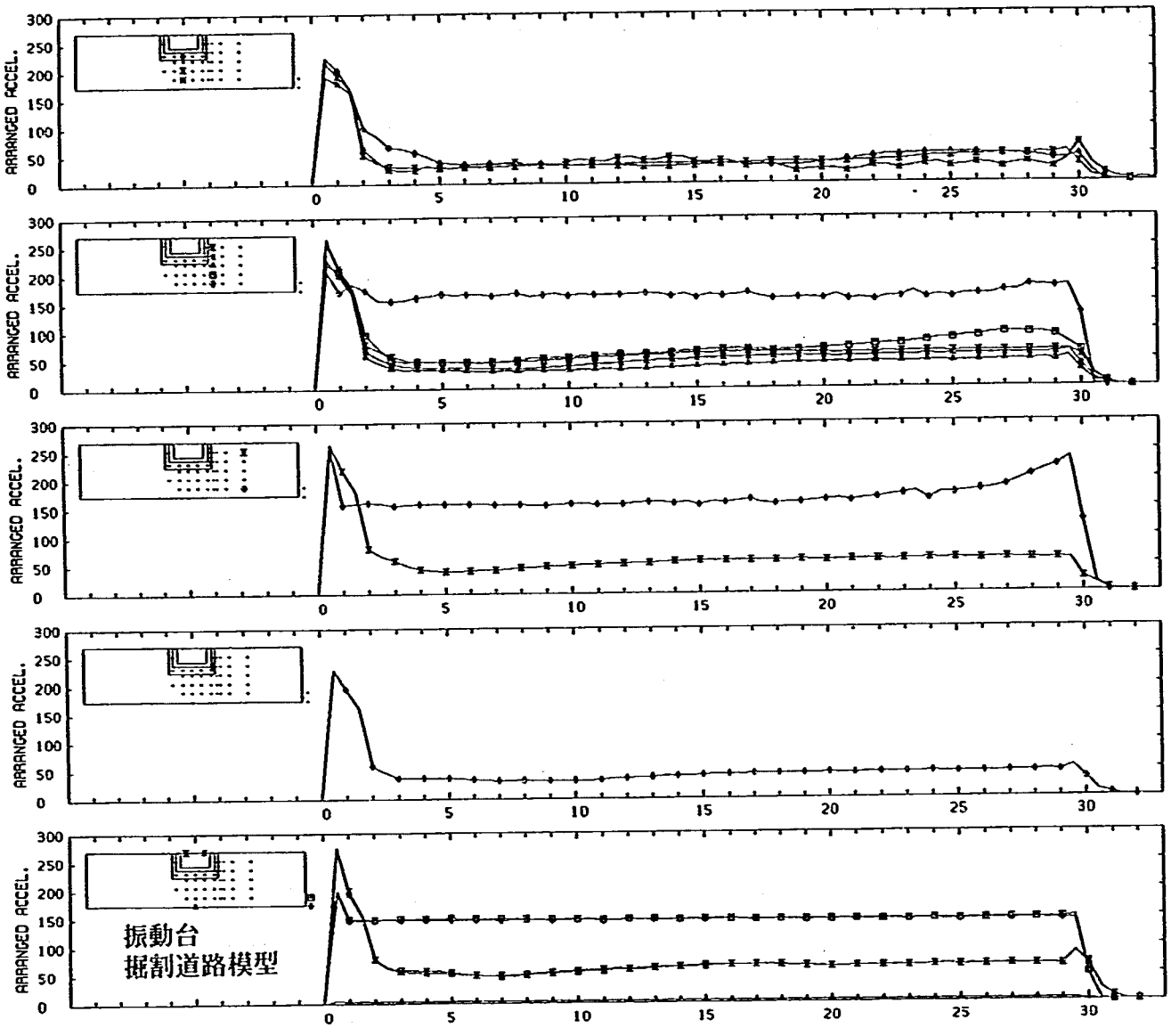




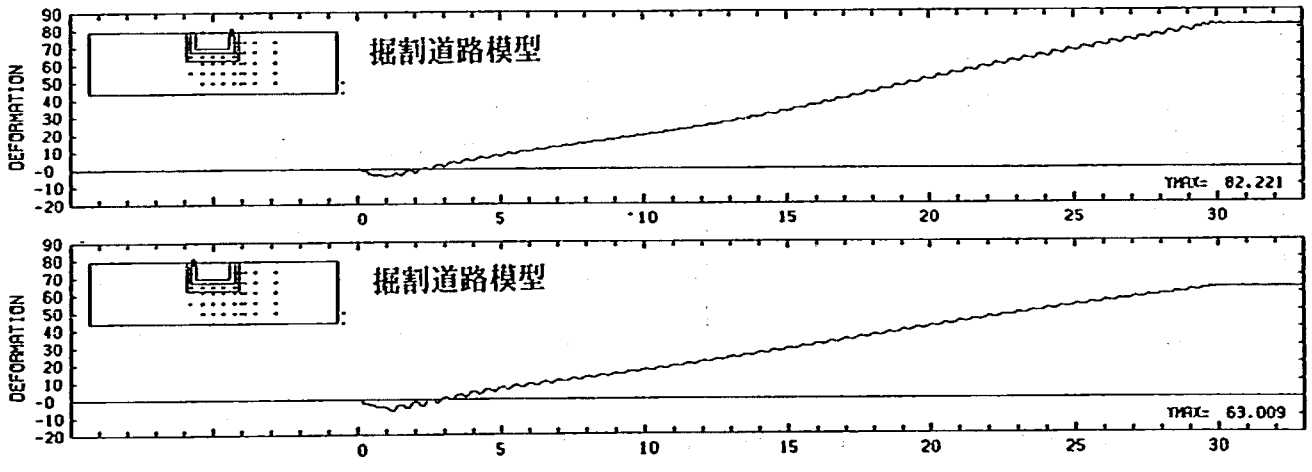




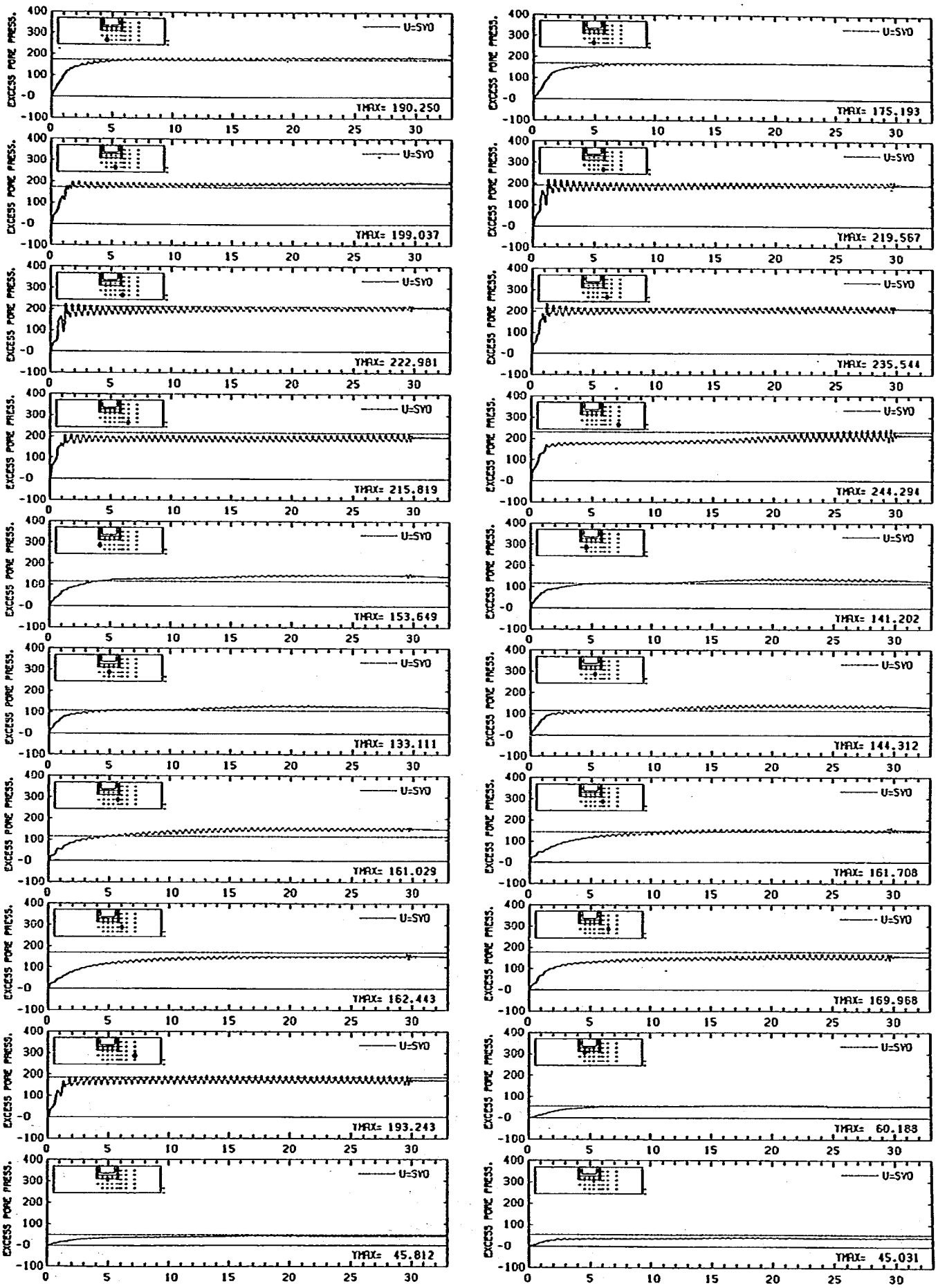
付図－８・４　加速度の空間分布（コンターのピッチ10gal、模型－９）



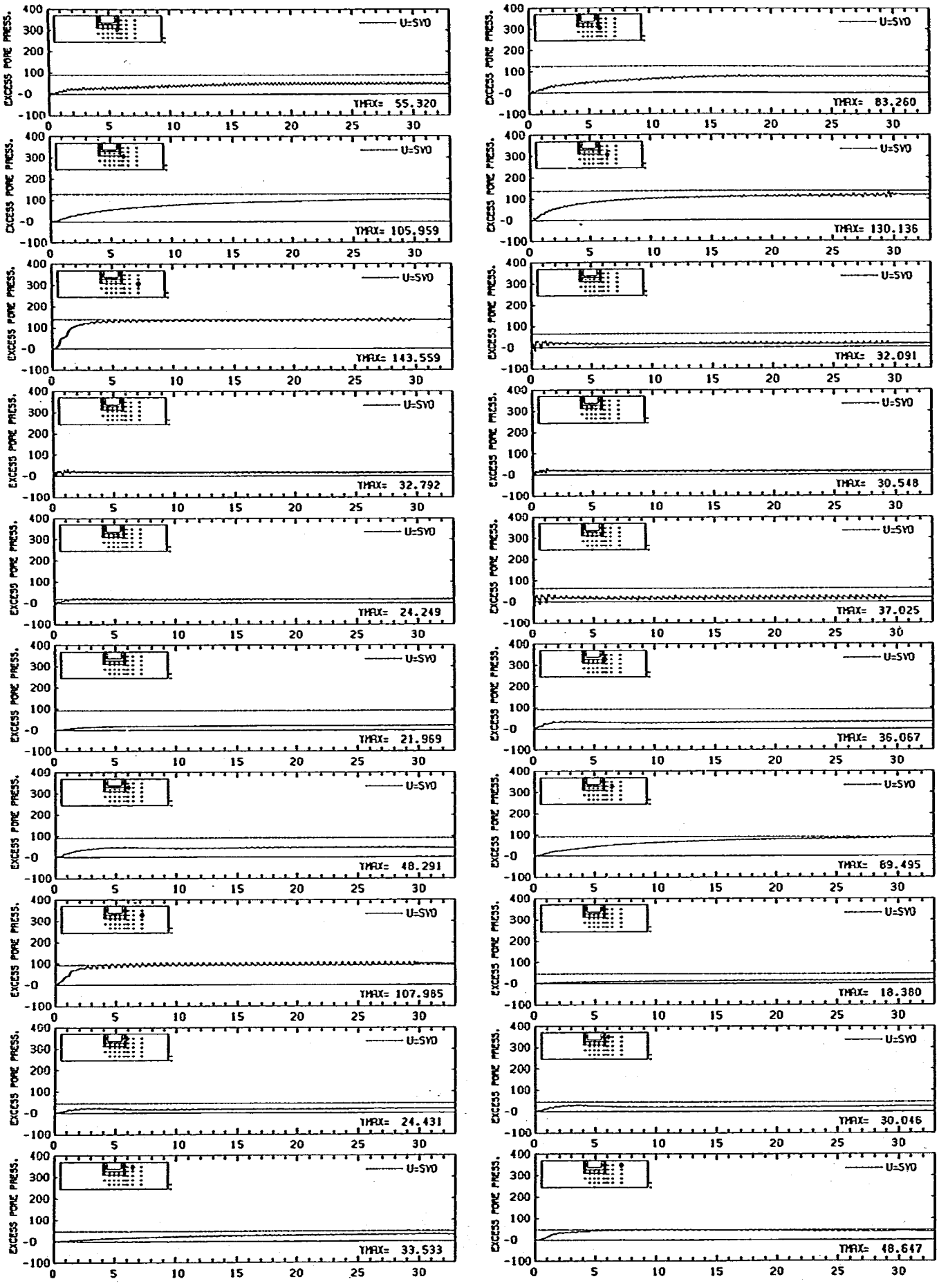
付図－８・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－９）



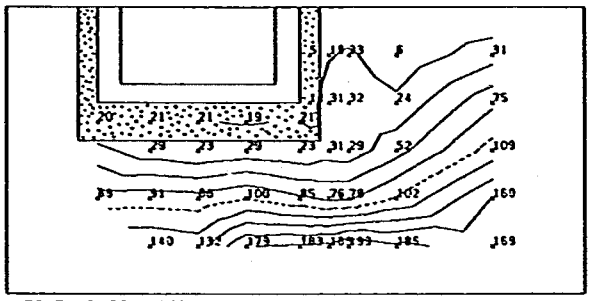
付図－８・６　変位計による掘割道路模型の浮上量の測定結果（単位：㎜、模型－９）



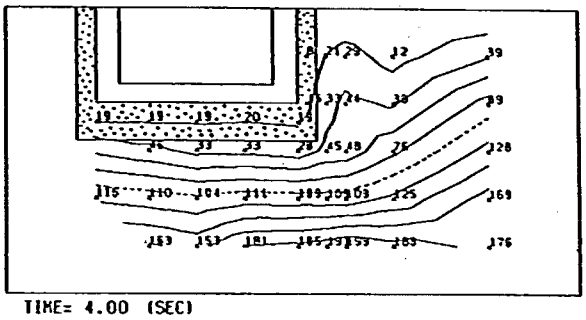
付図－８・７　過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－９）



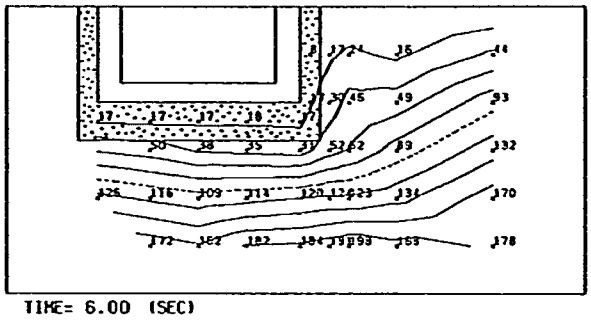
付図－８・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－９）



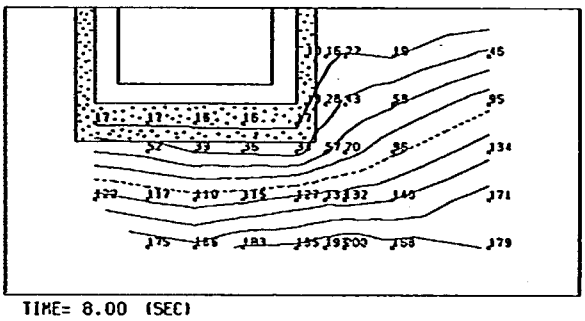
TIME= 2.00 (SEC)



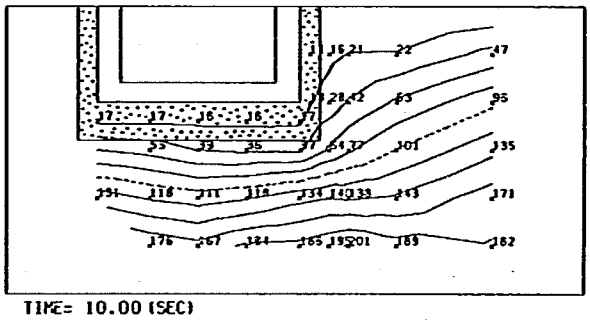
TIME= 4.00 (SEC)



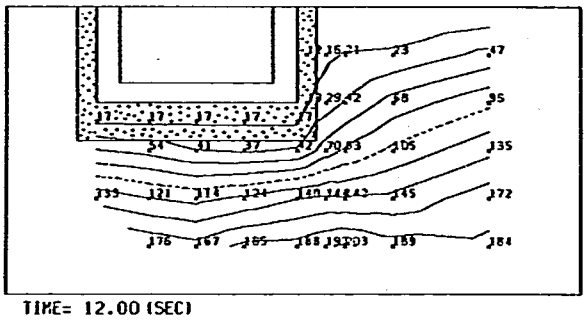
TIME= 6.00 (SEC)



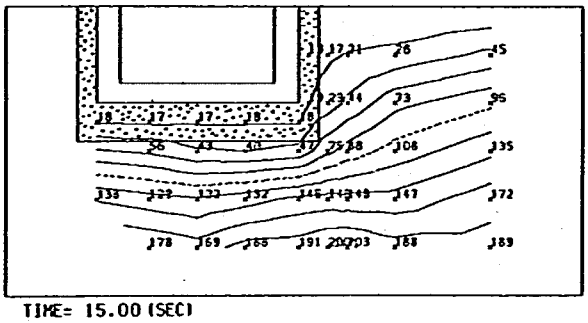
TIME= 8.00 (SEC)



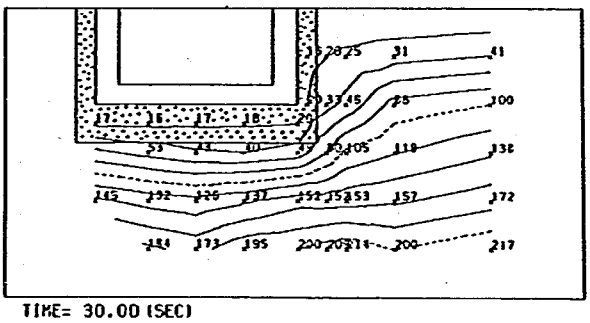
TIME= 10.00 (SEC)



TIME= 12.00 (SEC)

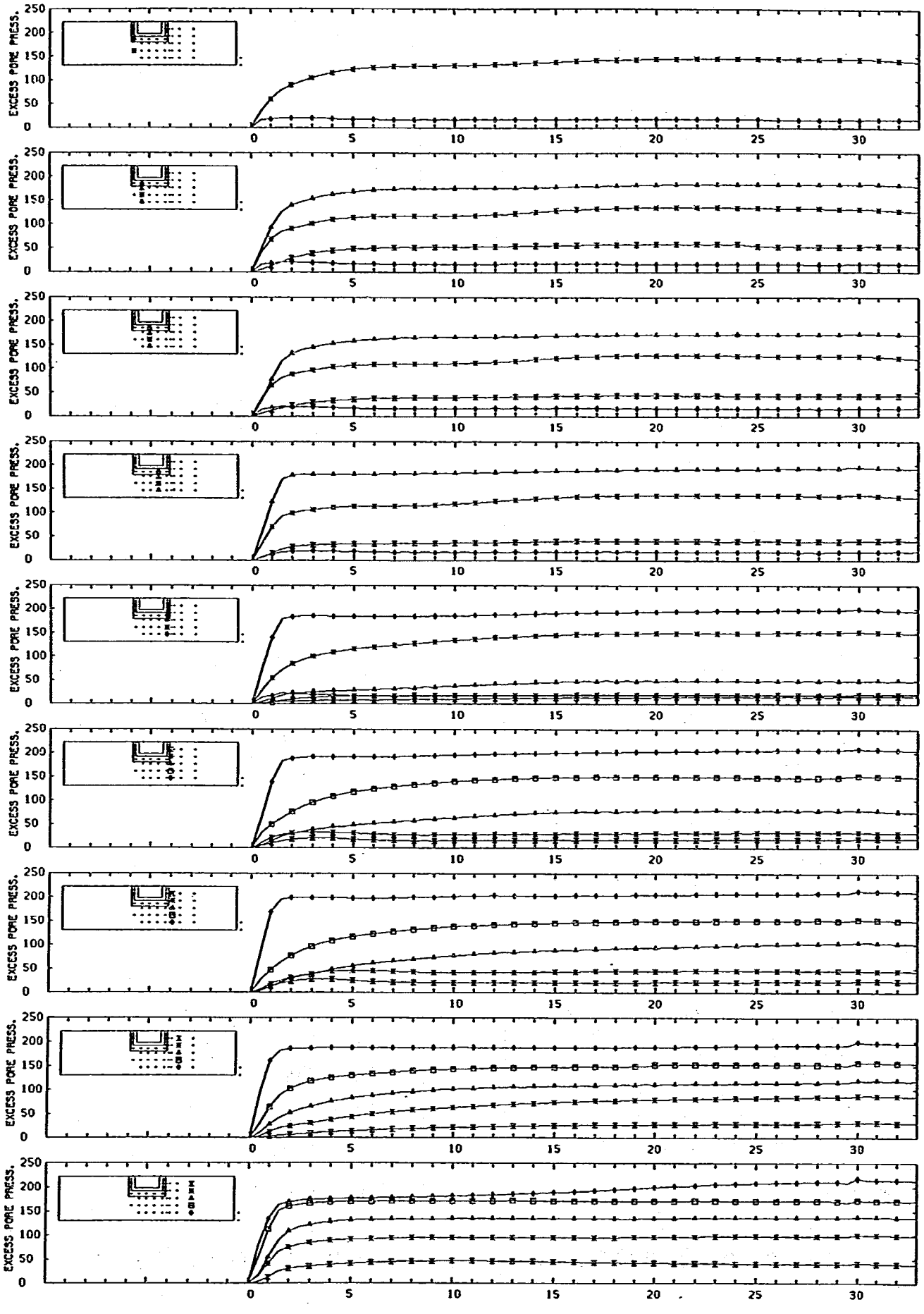


TIME= 15.00 (SEC)

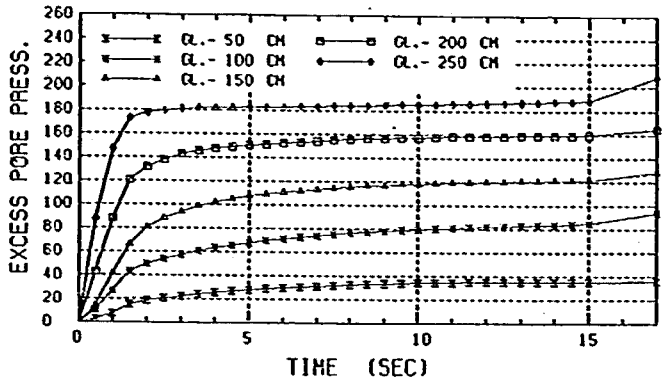


TIME= 30.00 (SEC)

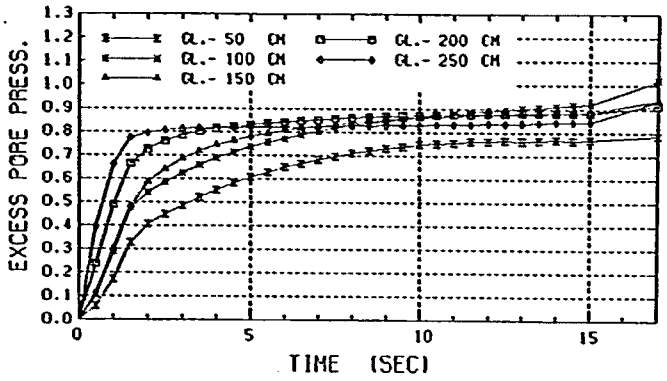
付図－８・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－９）



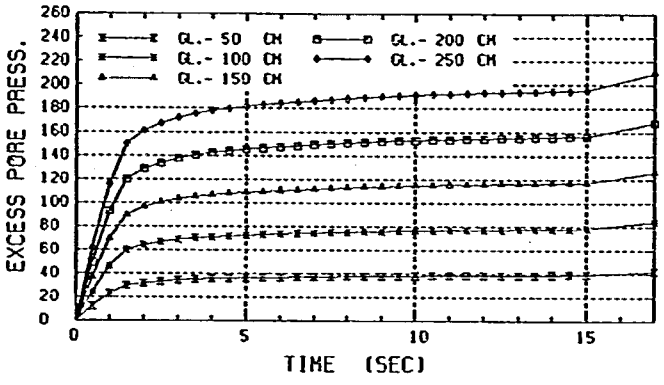
付図－８・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－９）



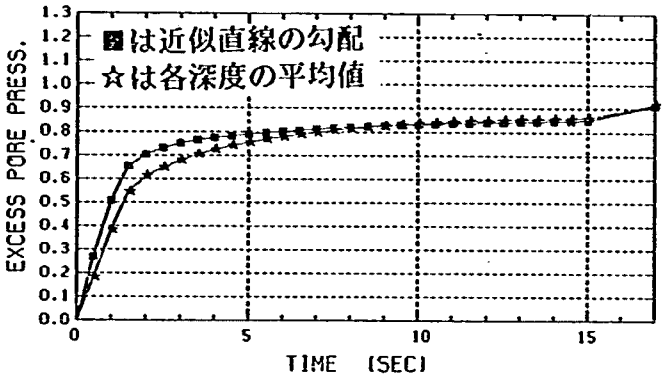
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



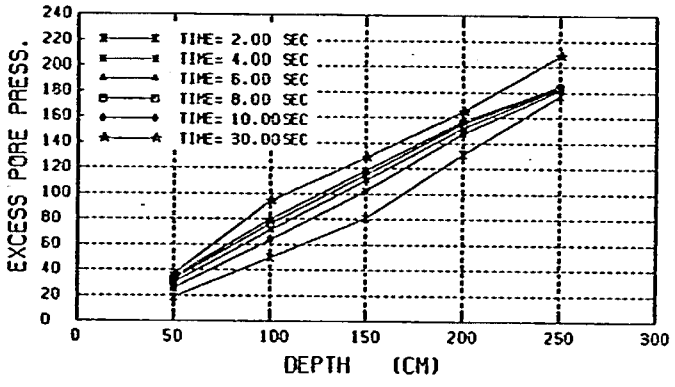
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



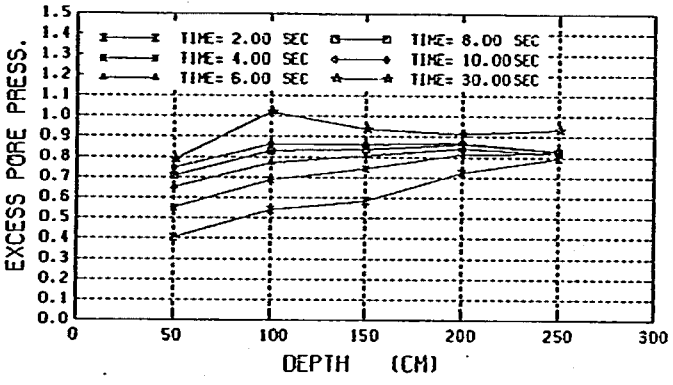
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



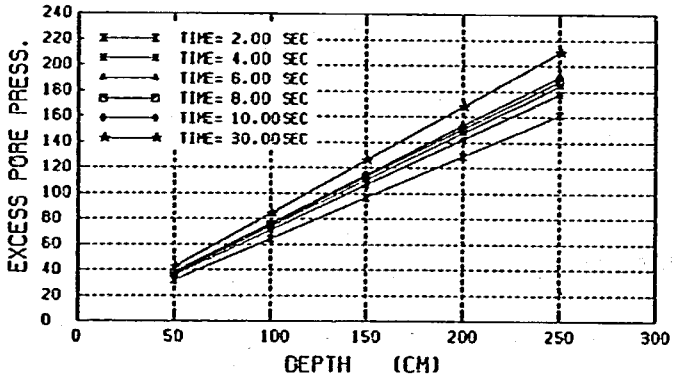
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



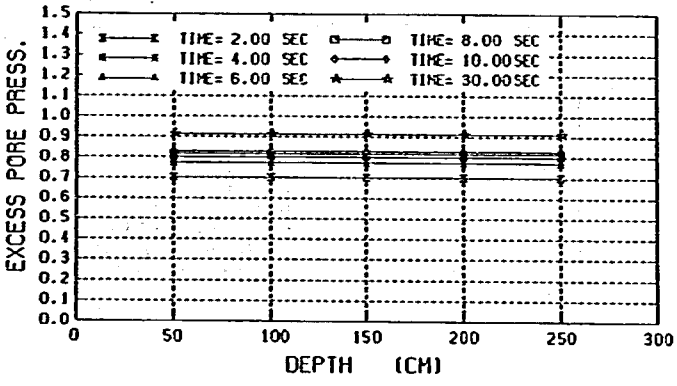
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

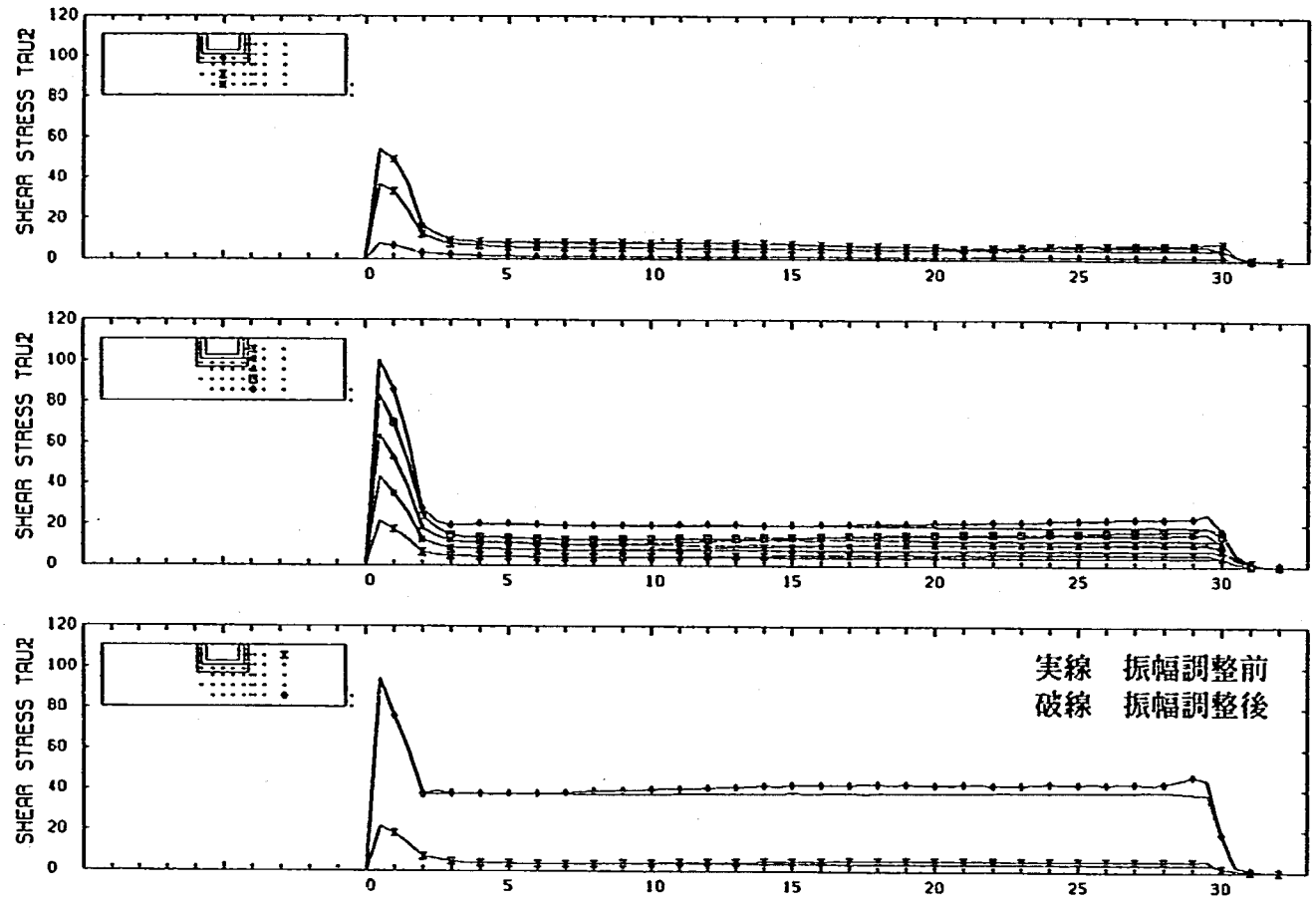


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

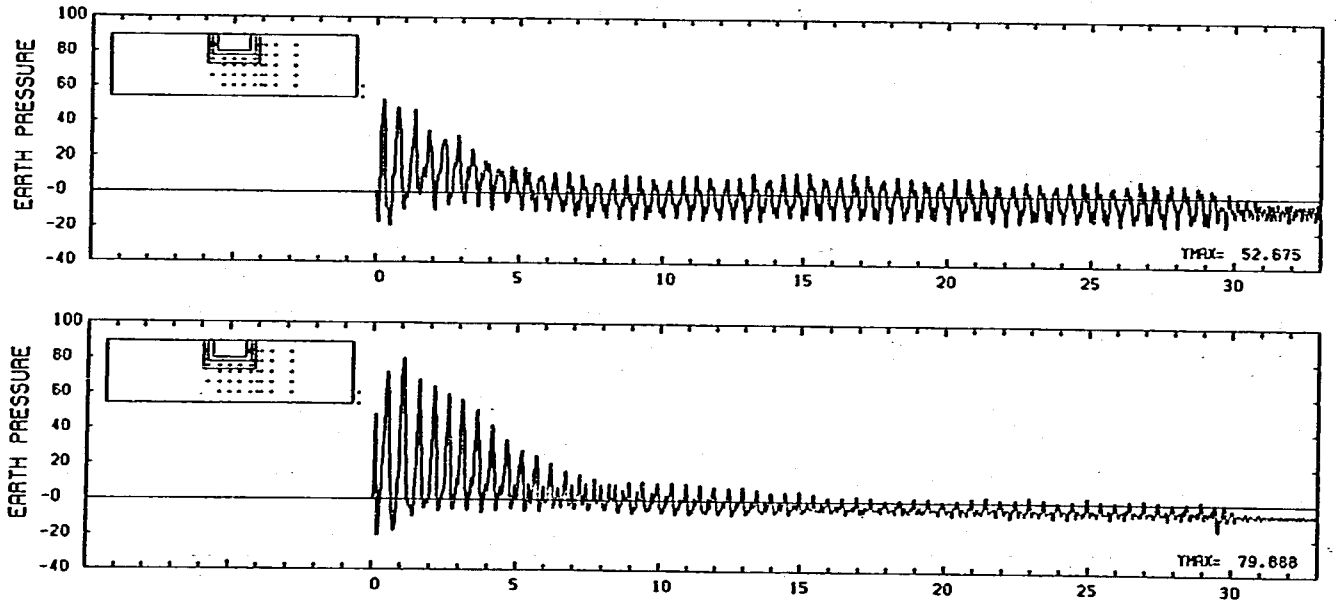


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

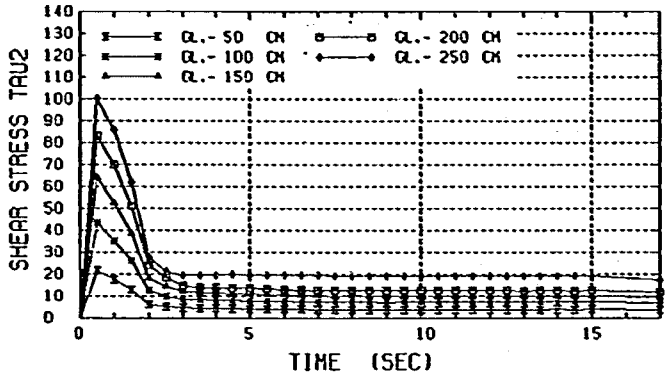
付図－８・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－９）



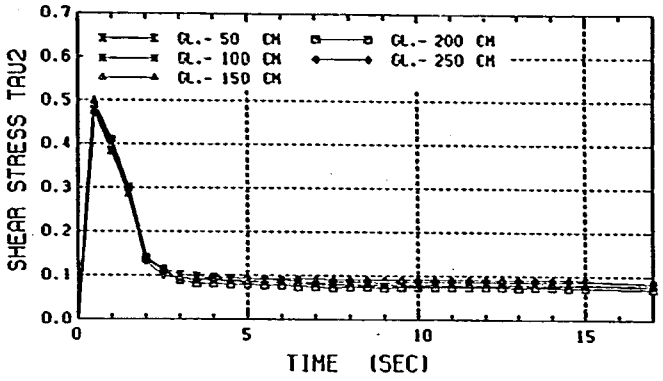
付図－８・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－９）



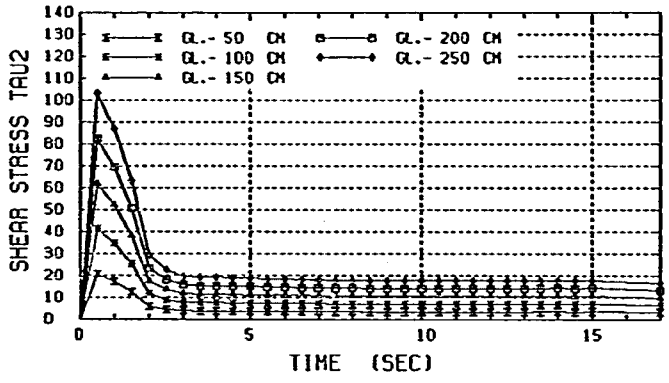
付図－８・13　掘割道路模型に作用する土圧の計測結果（単位：gf/cm²、模型－９）



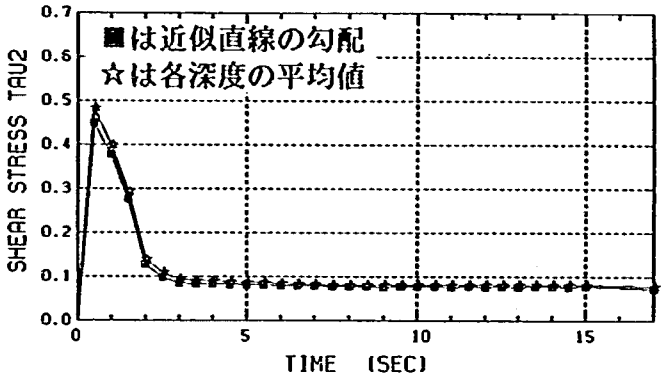
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



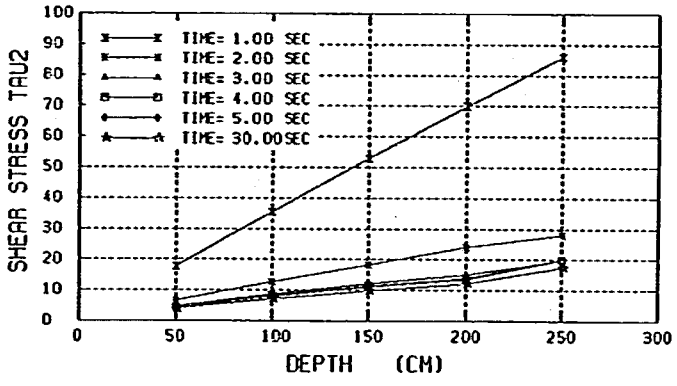
（ｂ）同左のせん断応力比



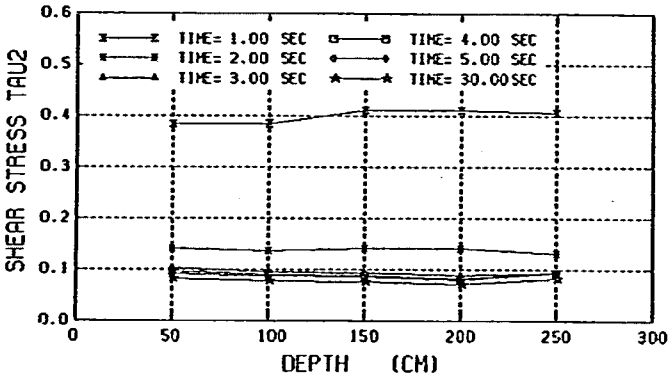
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



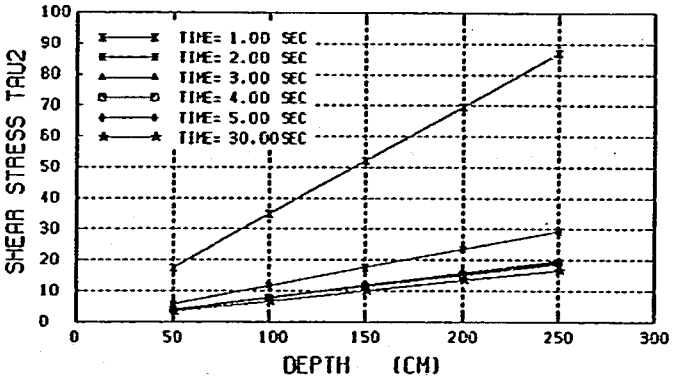
（ｄ）同左のせん断応力比



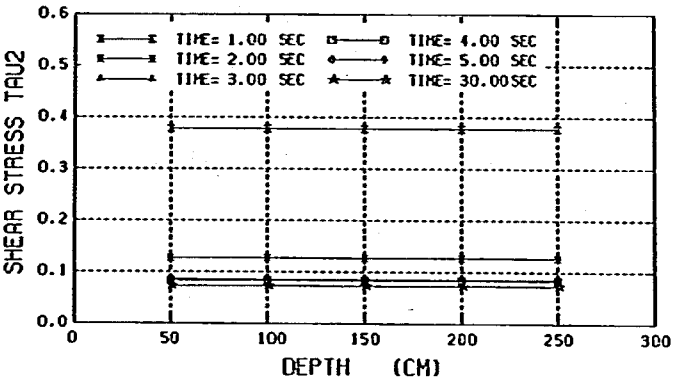
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

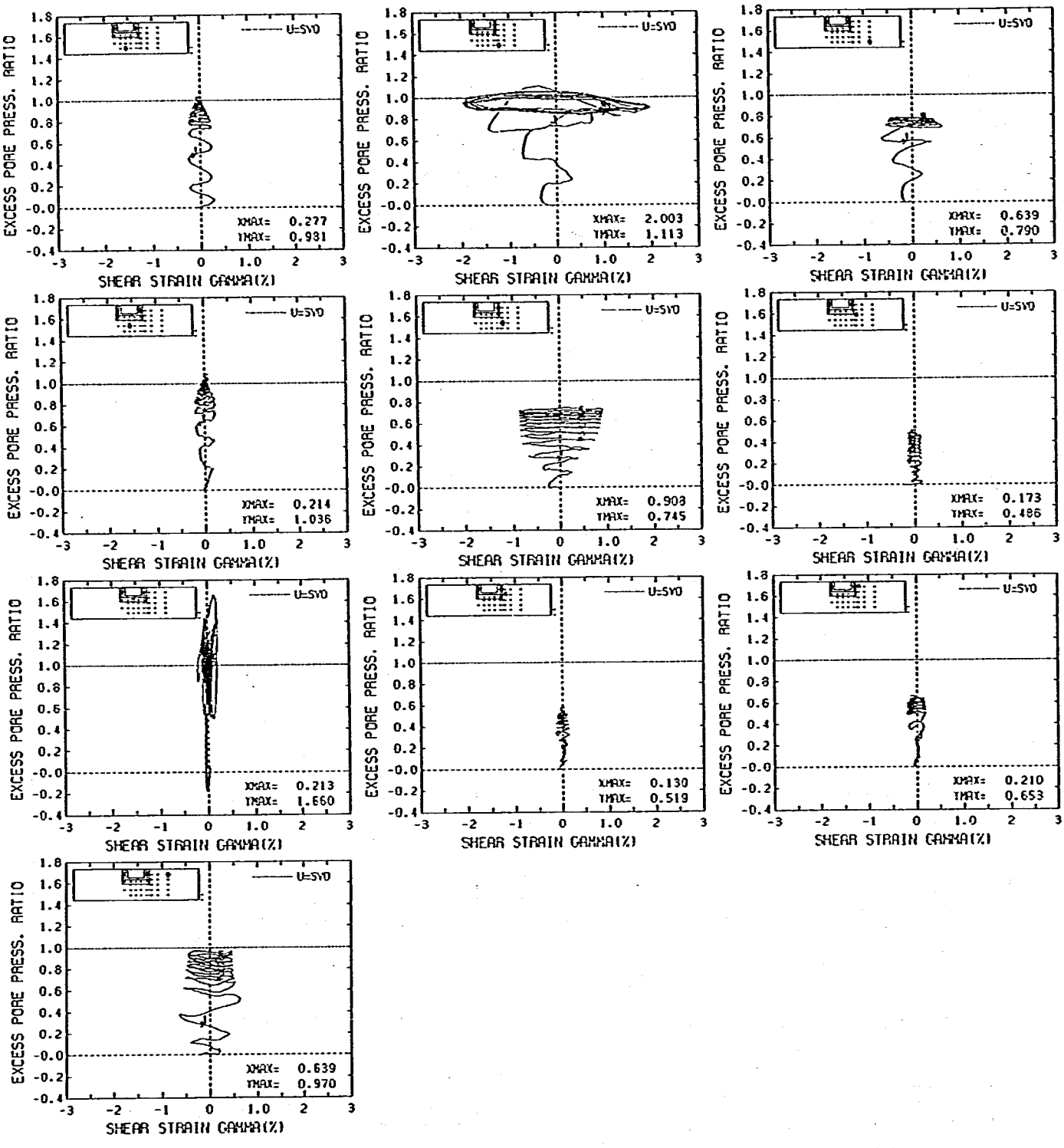


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

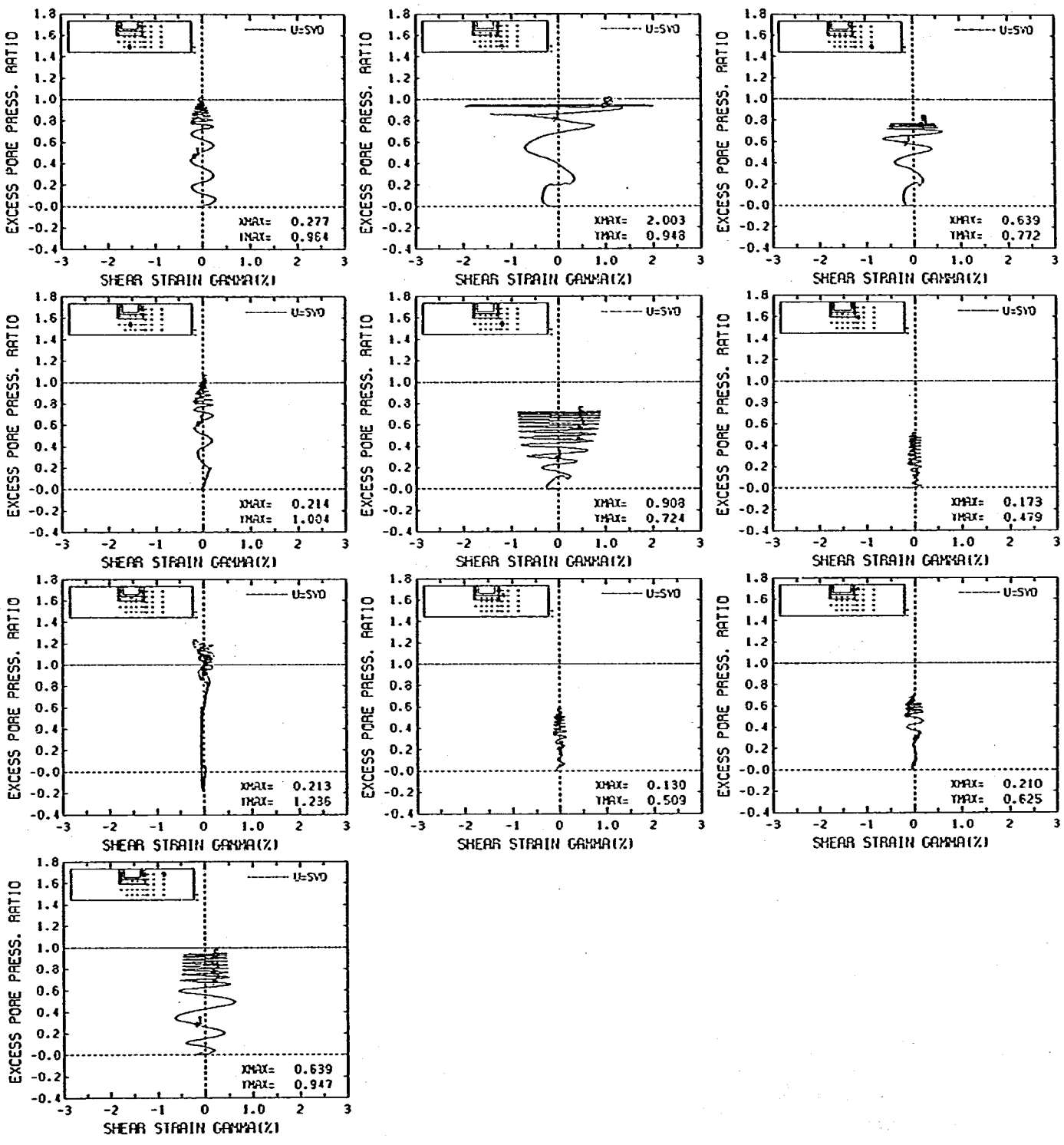


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

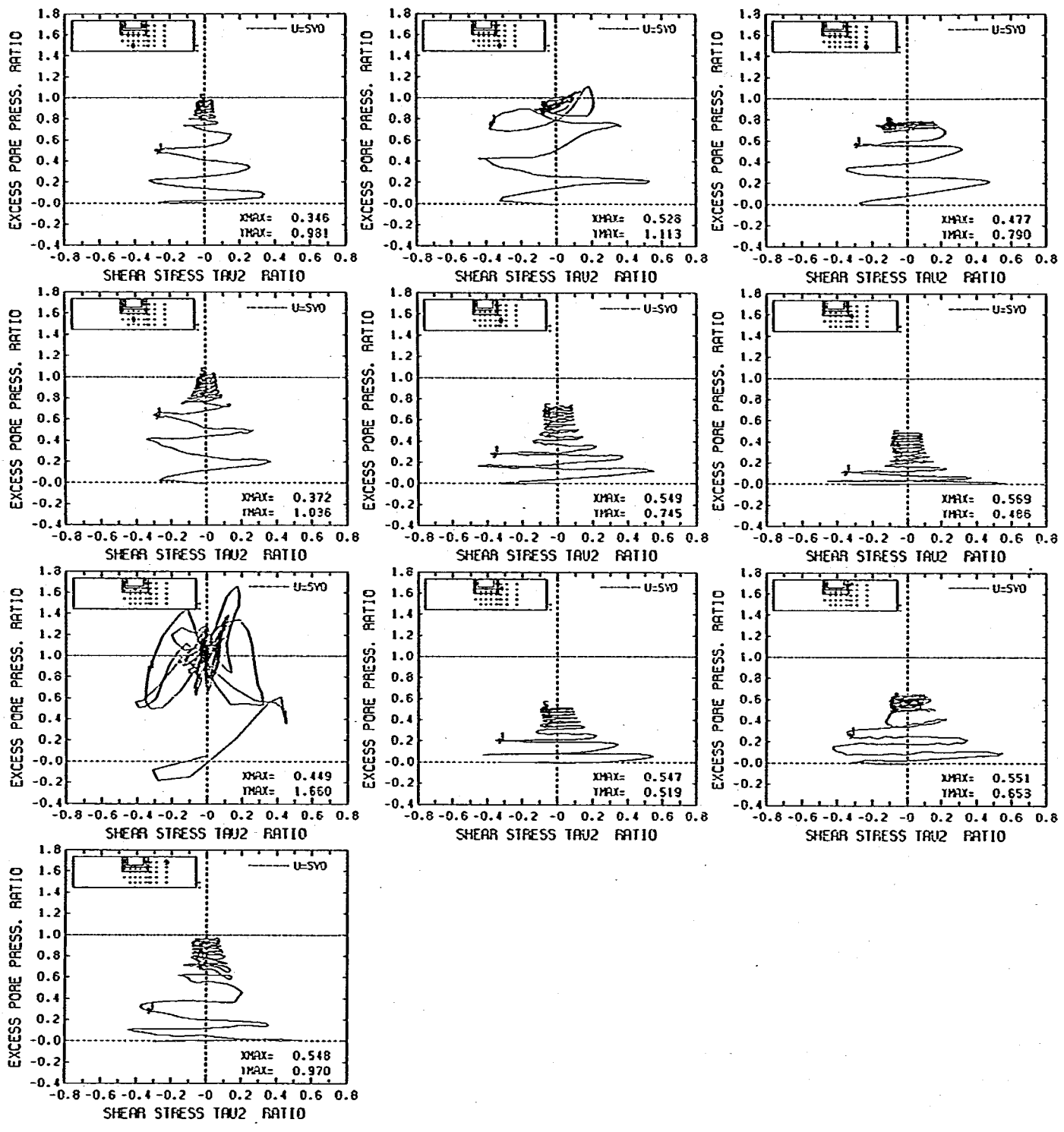
付図－８・14　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－９）



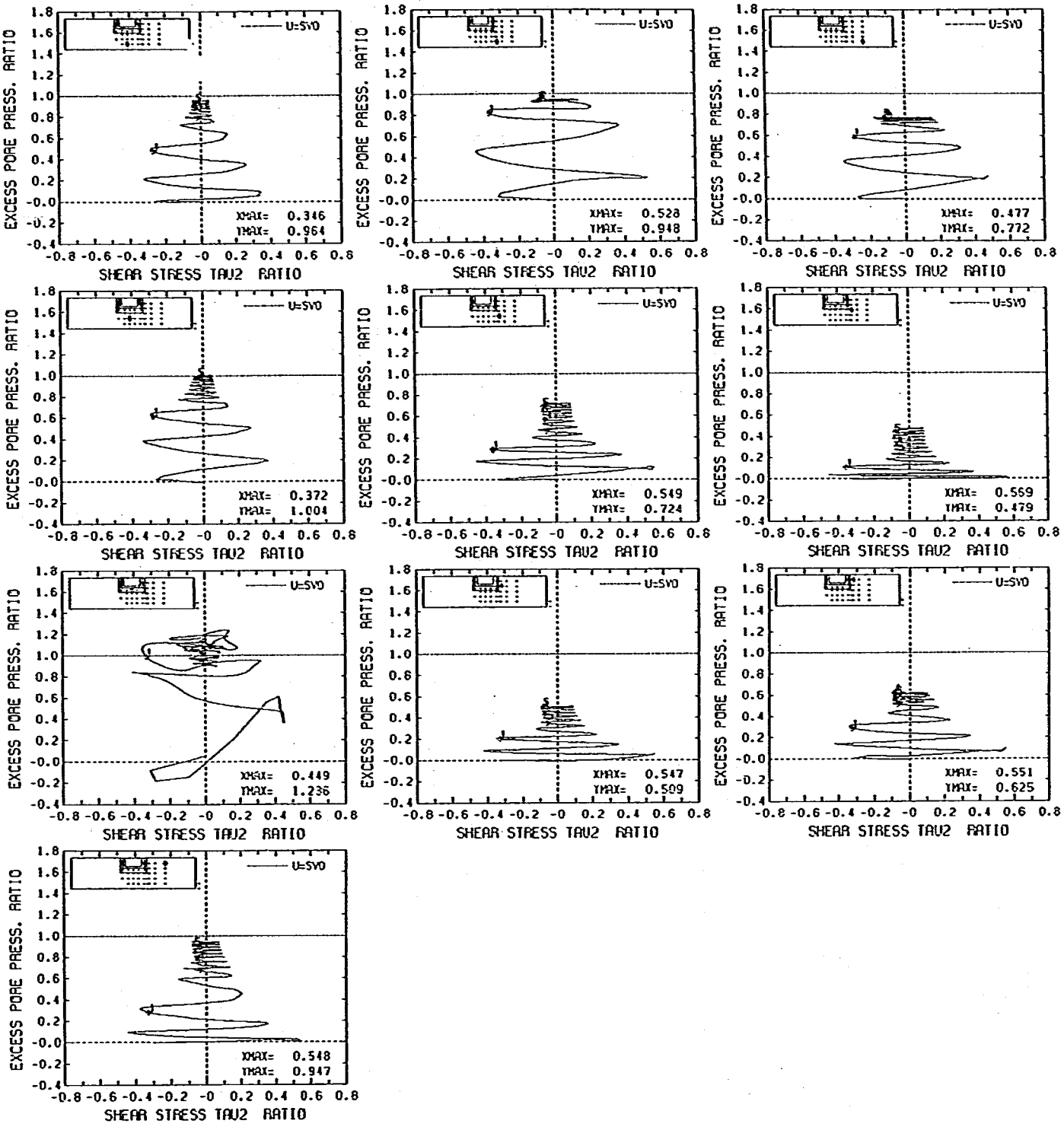
付図－８・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－９）



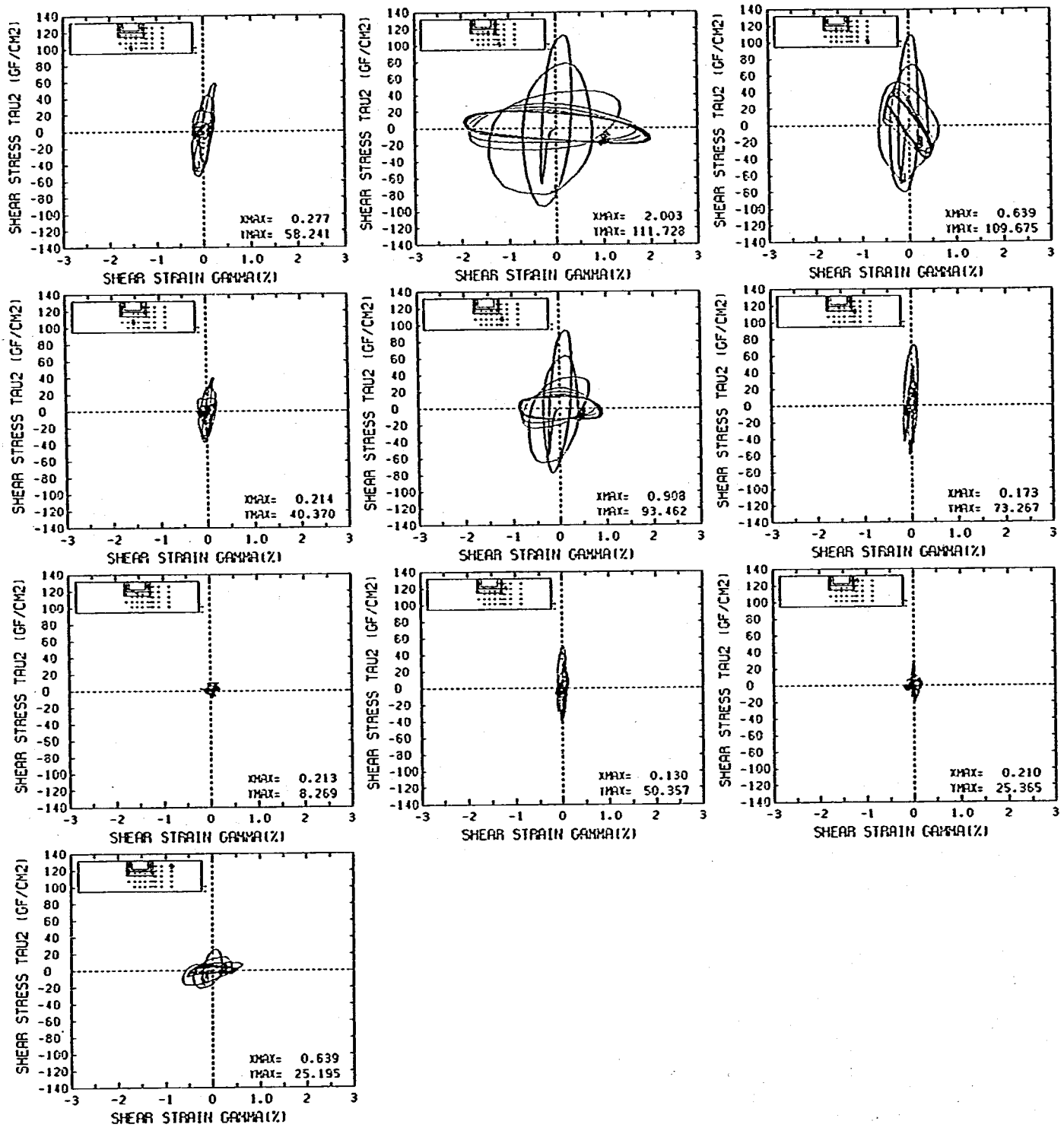
付図－８・16　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－９）



付図－８・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－９）

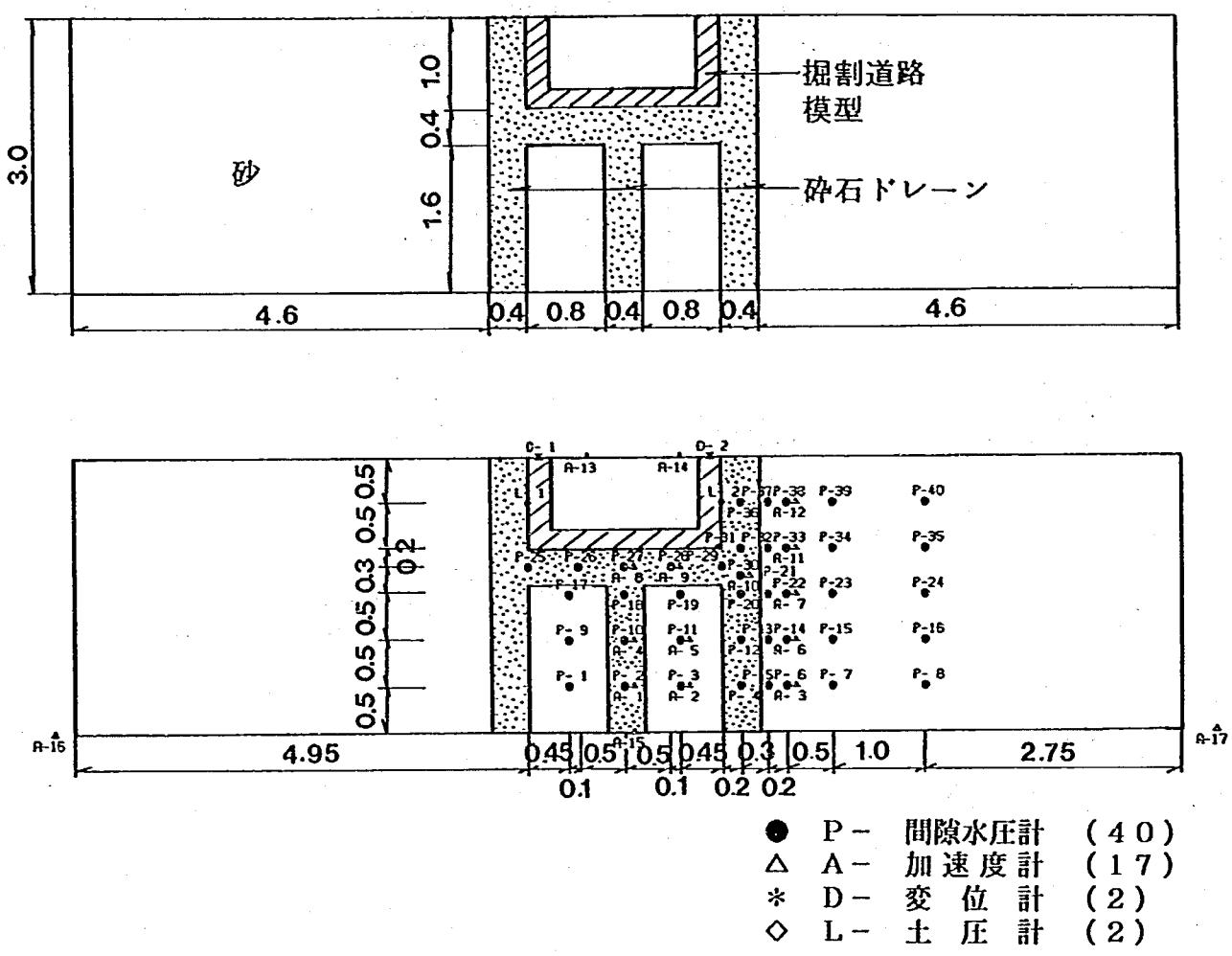


付図－８・18　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－９）



付図－８・19　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－９）

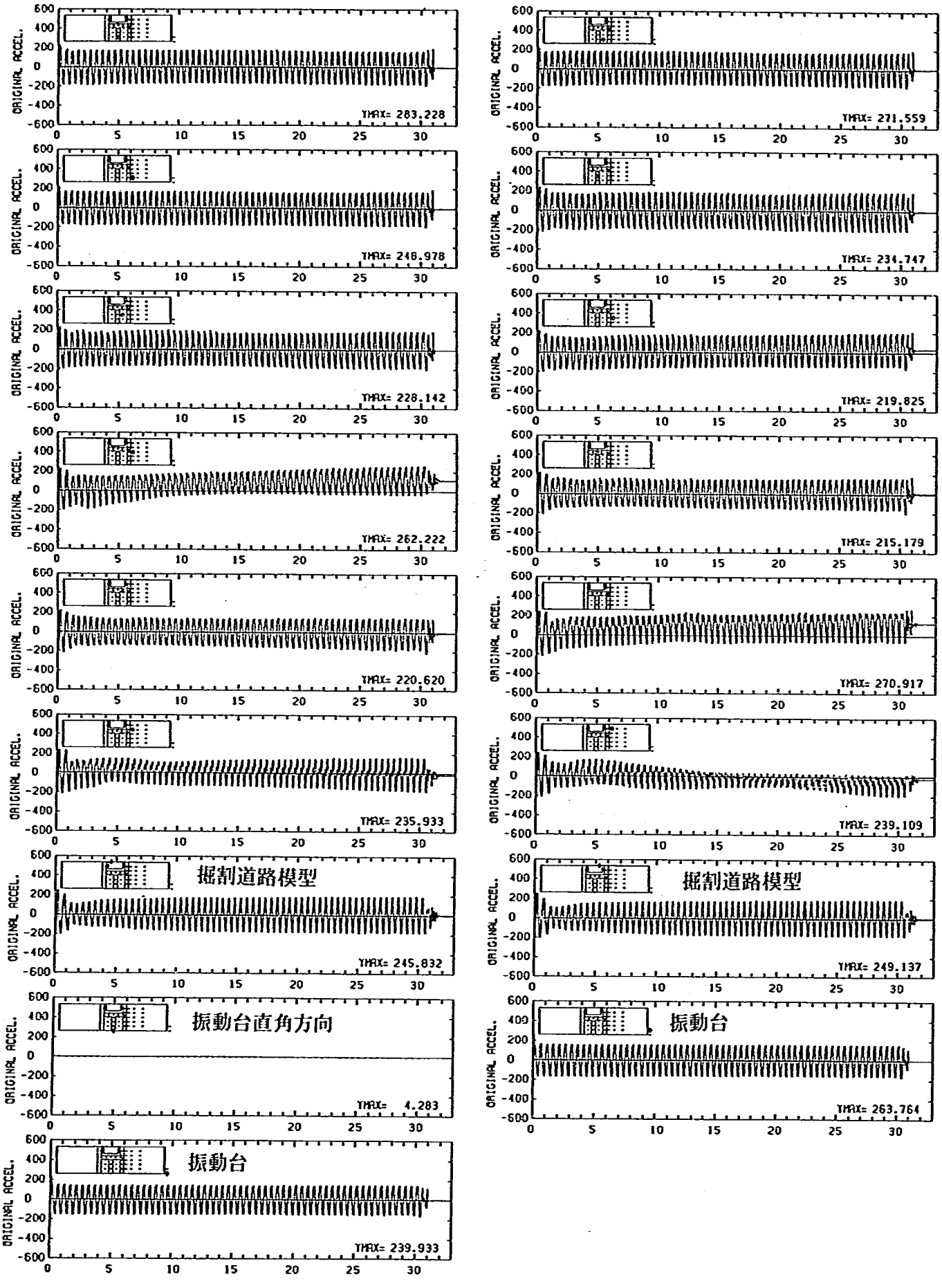
模型 10



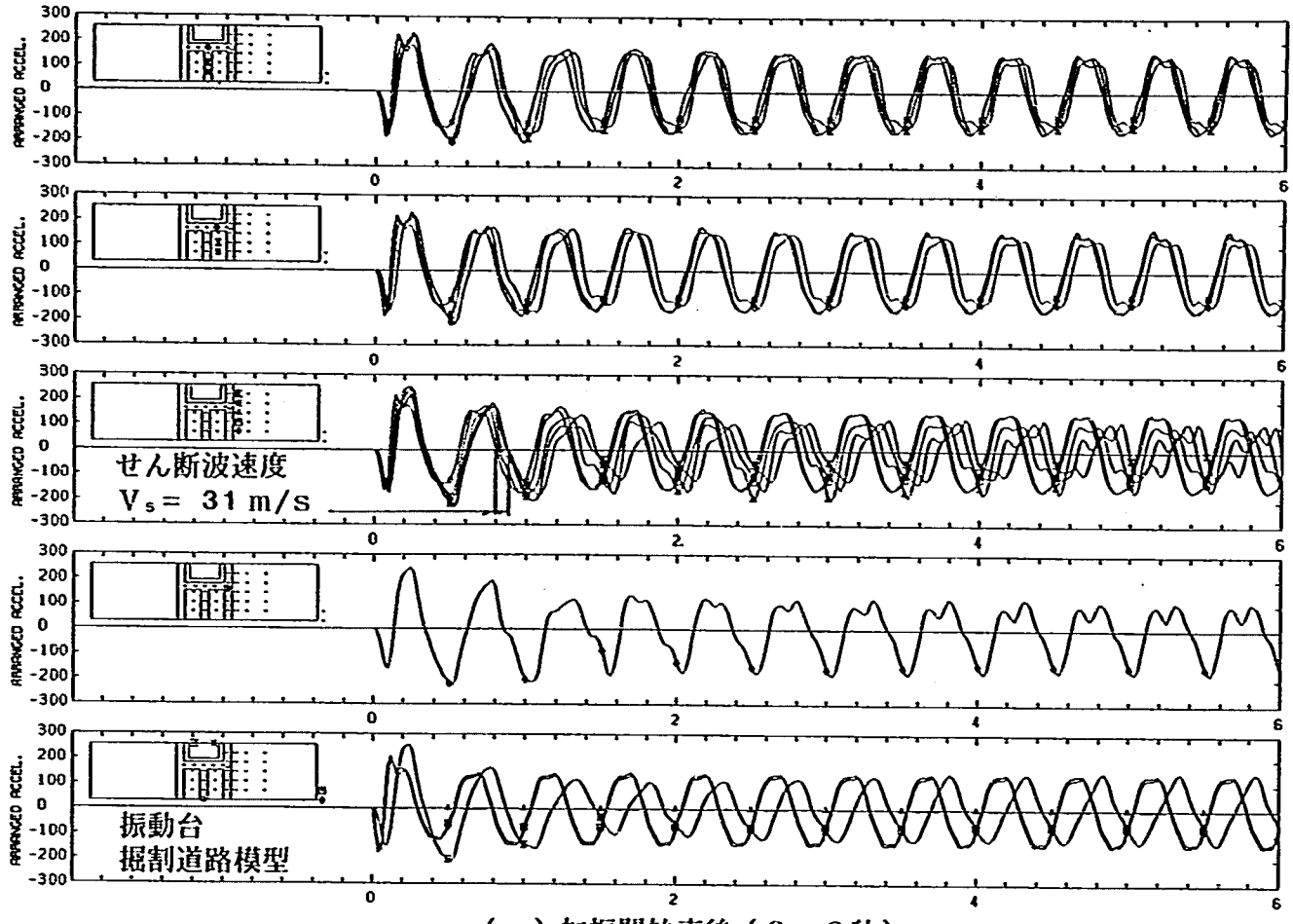
● P－ 間隙水圧計 （４０）
△ A－ 加速度計 （１７）
＊ D－ 変位計 （２）
◇ L－ 土圧計 （２）

A－１６，A－１７は振動台加速度
A－１５は加振直角方向
A－１３，A－１４は掘割道路模型上の手前側と奥側

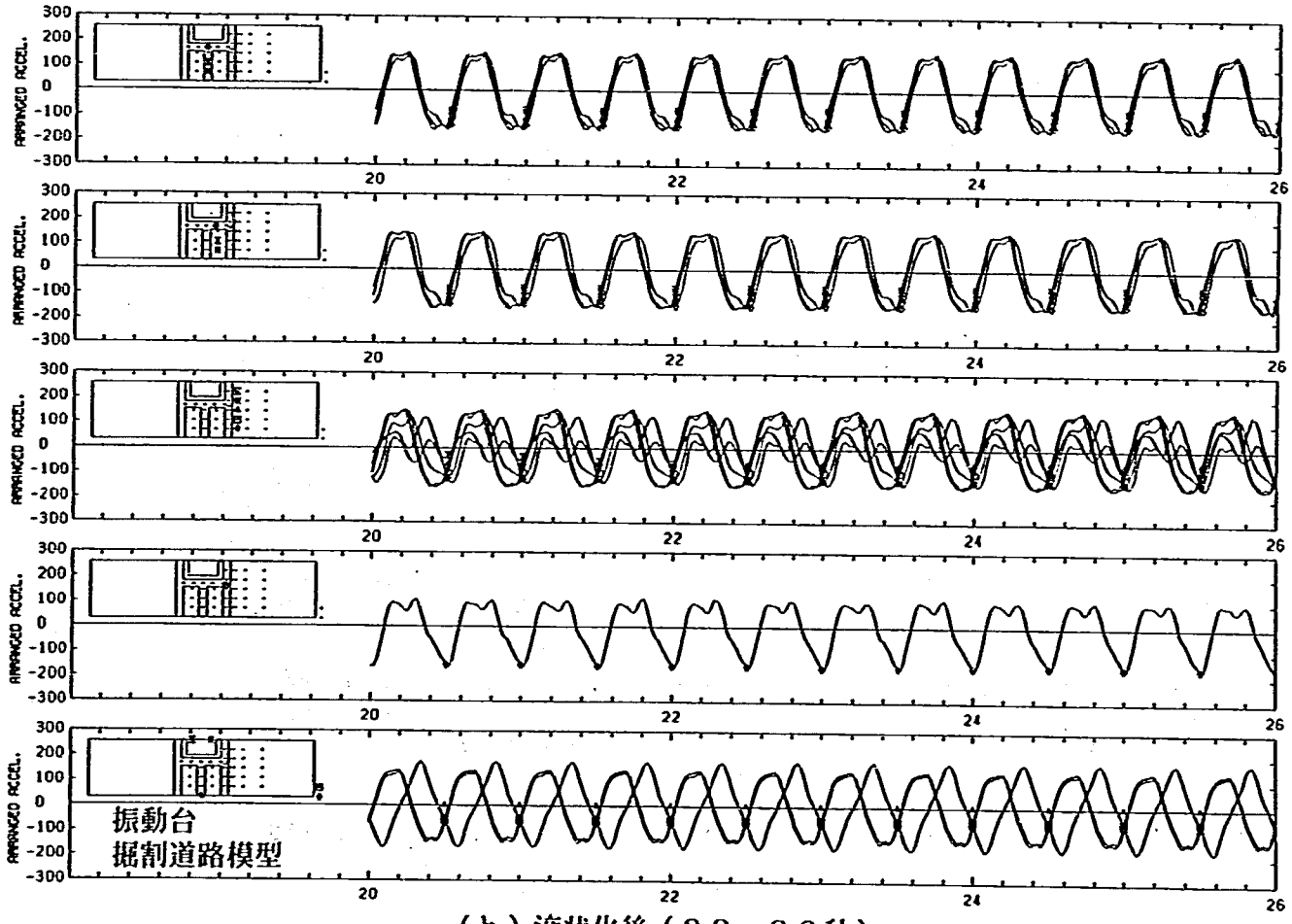
付図－９・１ 模型の寸法と計測器の配置（模型－10）



付図－９・２　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－10）

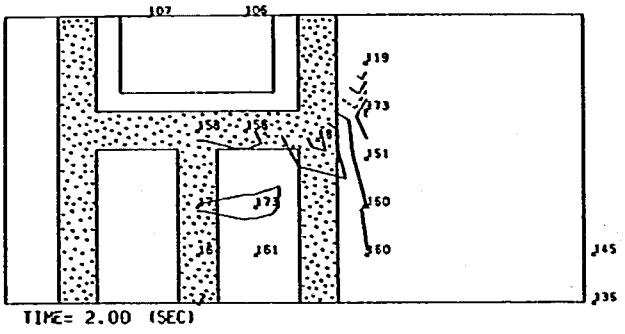


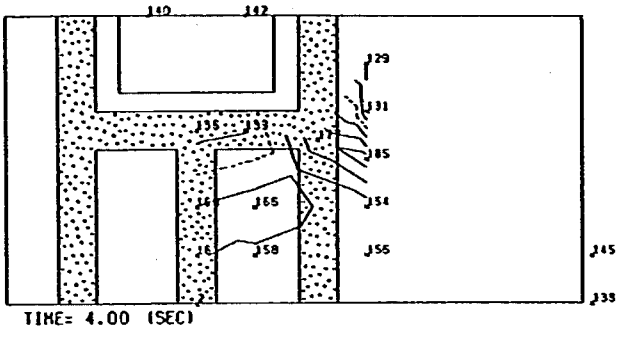
（ａ）加振開始直後（０～６秒）

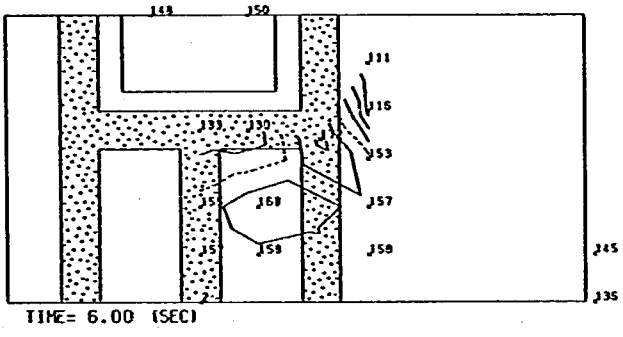


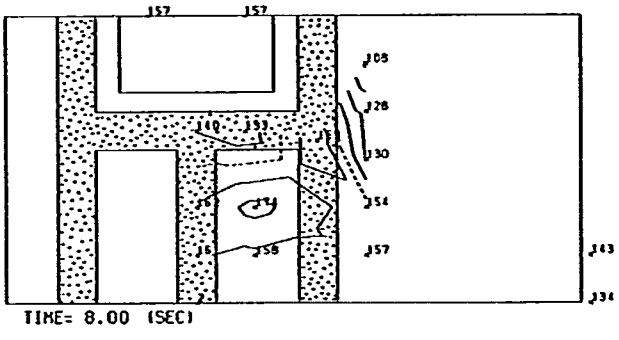
（ｂ）液状化後（２０～２６秒）

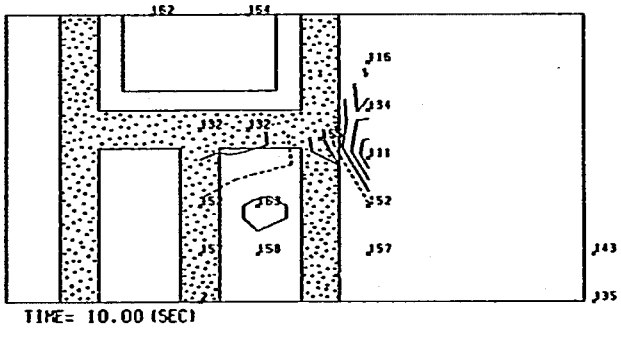
付図－９・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－10）

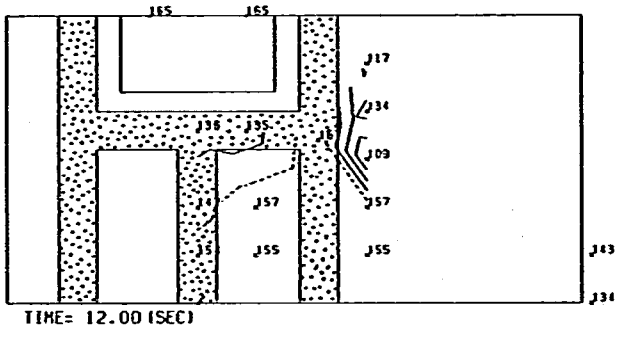


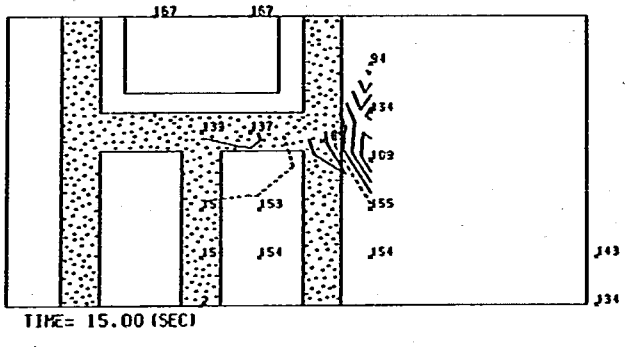


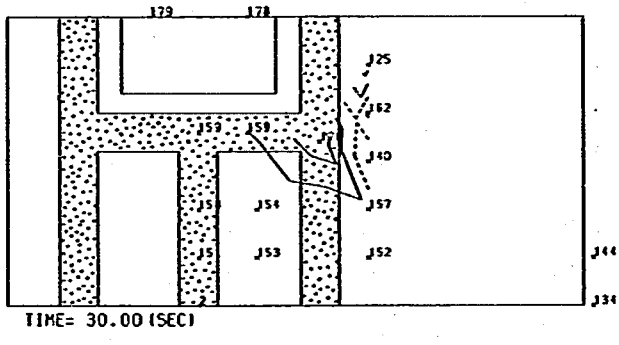




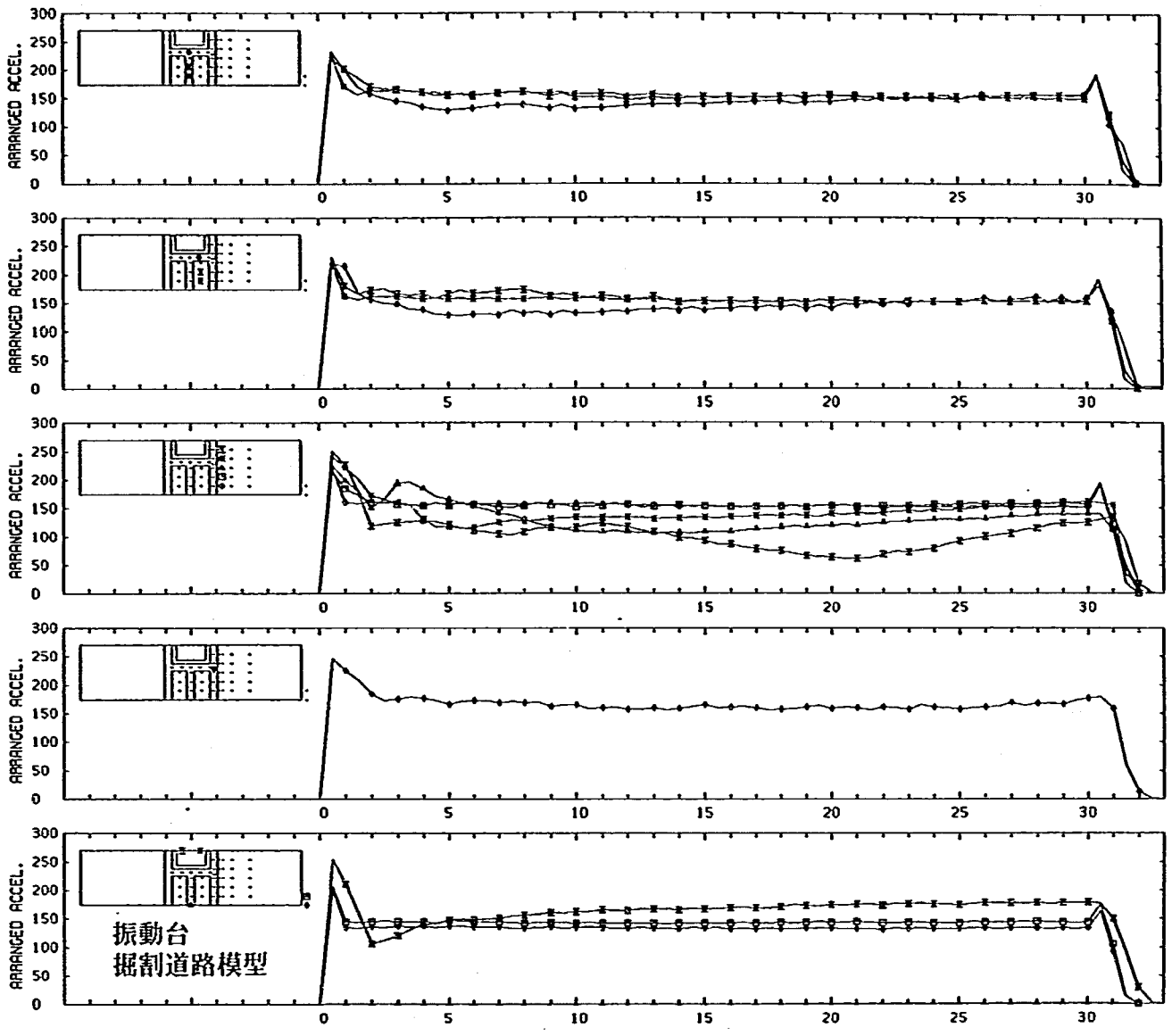




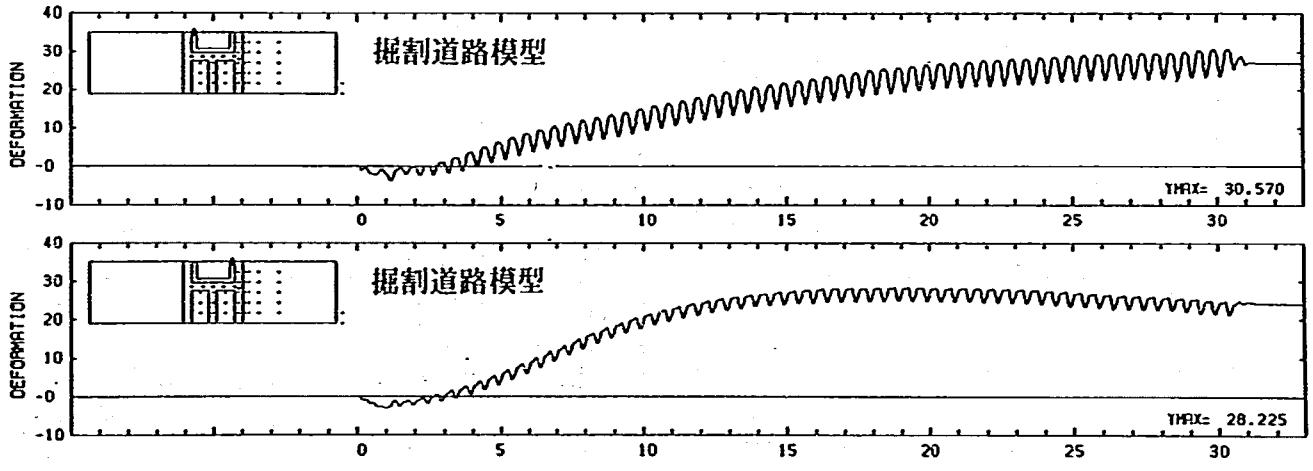




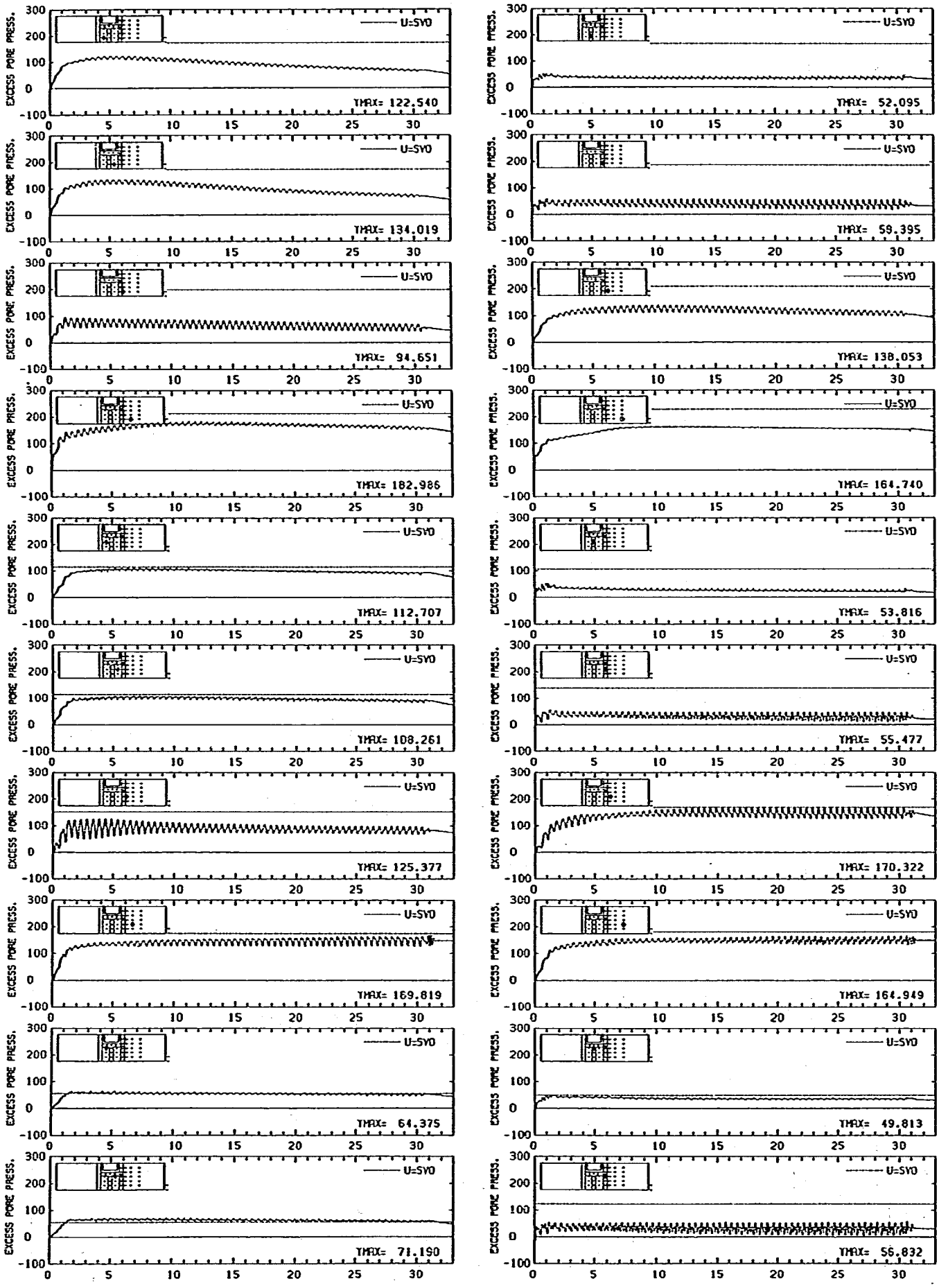
付図－9・4　加速度の空間分布（コンターのピッチ10gal、模型－10）



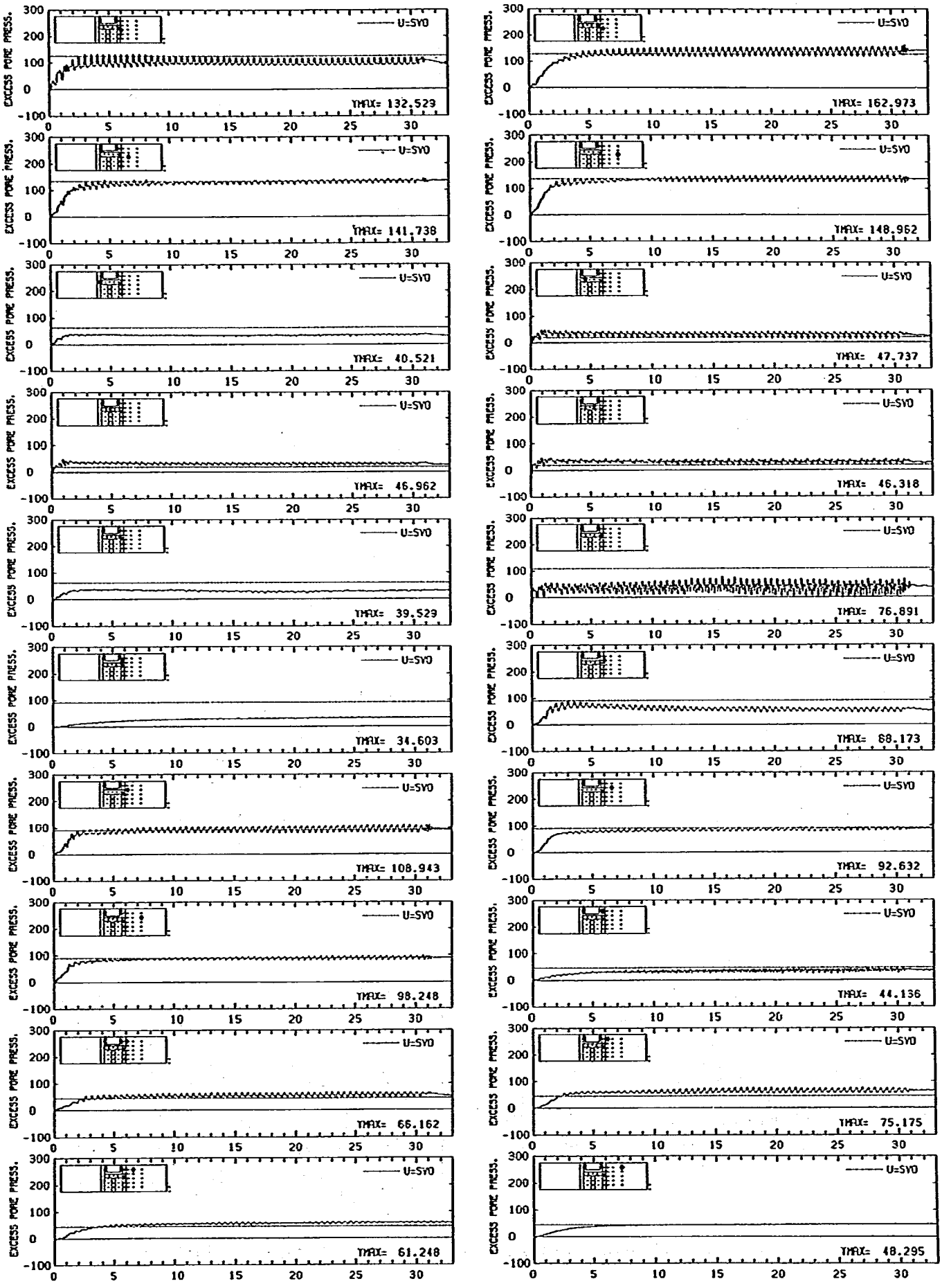
付図－９・５　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－10）



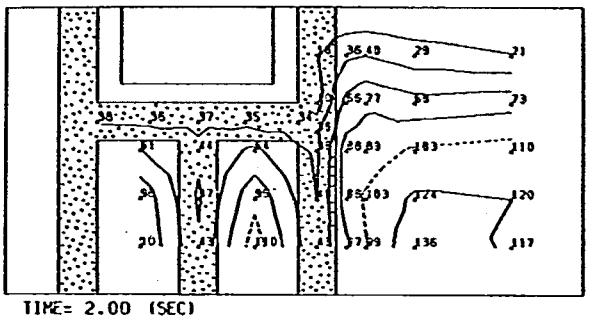
付図－９・６　変位計による掘割道路模型の浮上量の測定結果（単位：㎜、模型－10）

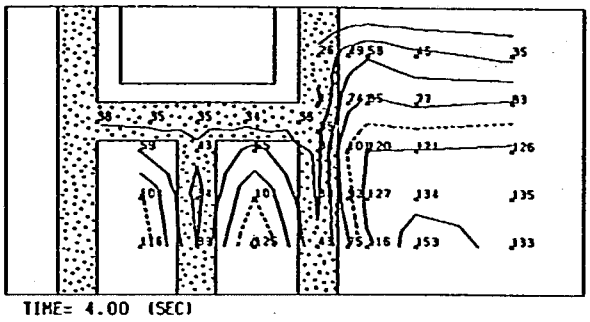


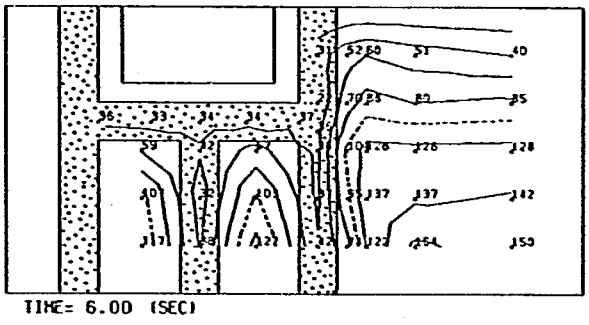
付図－９・７：過剰間隙水圧の記録波形（その１、模型－10）

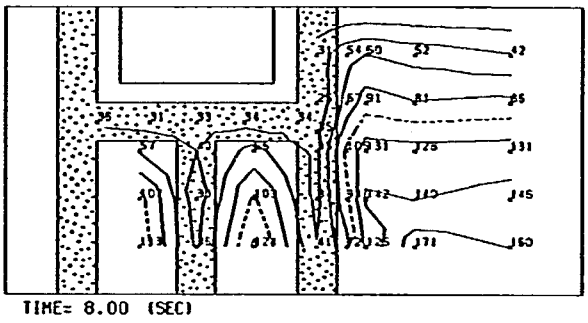


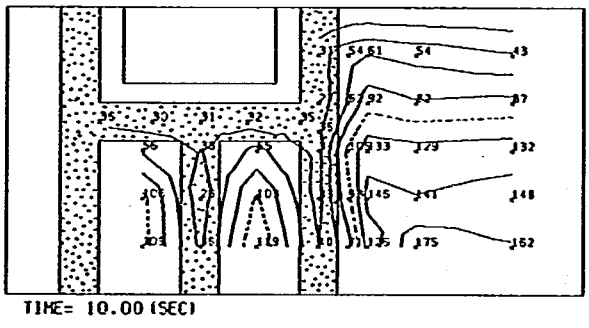
付図－９・８　過剰間隙水圧の記録波形（その２、模型－10）

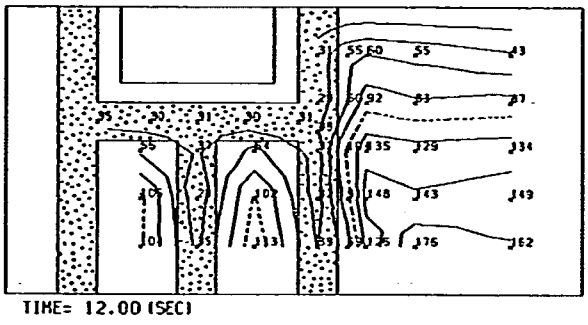


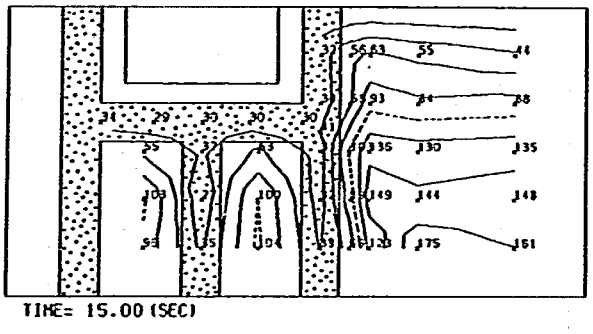


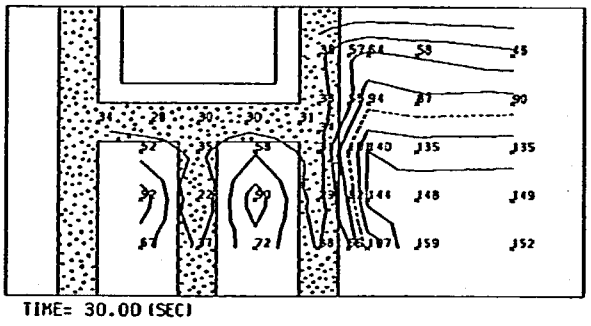




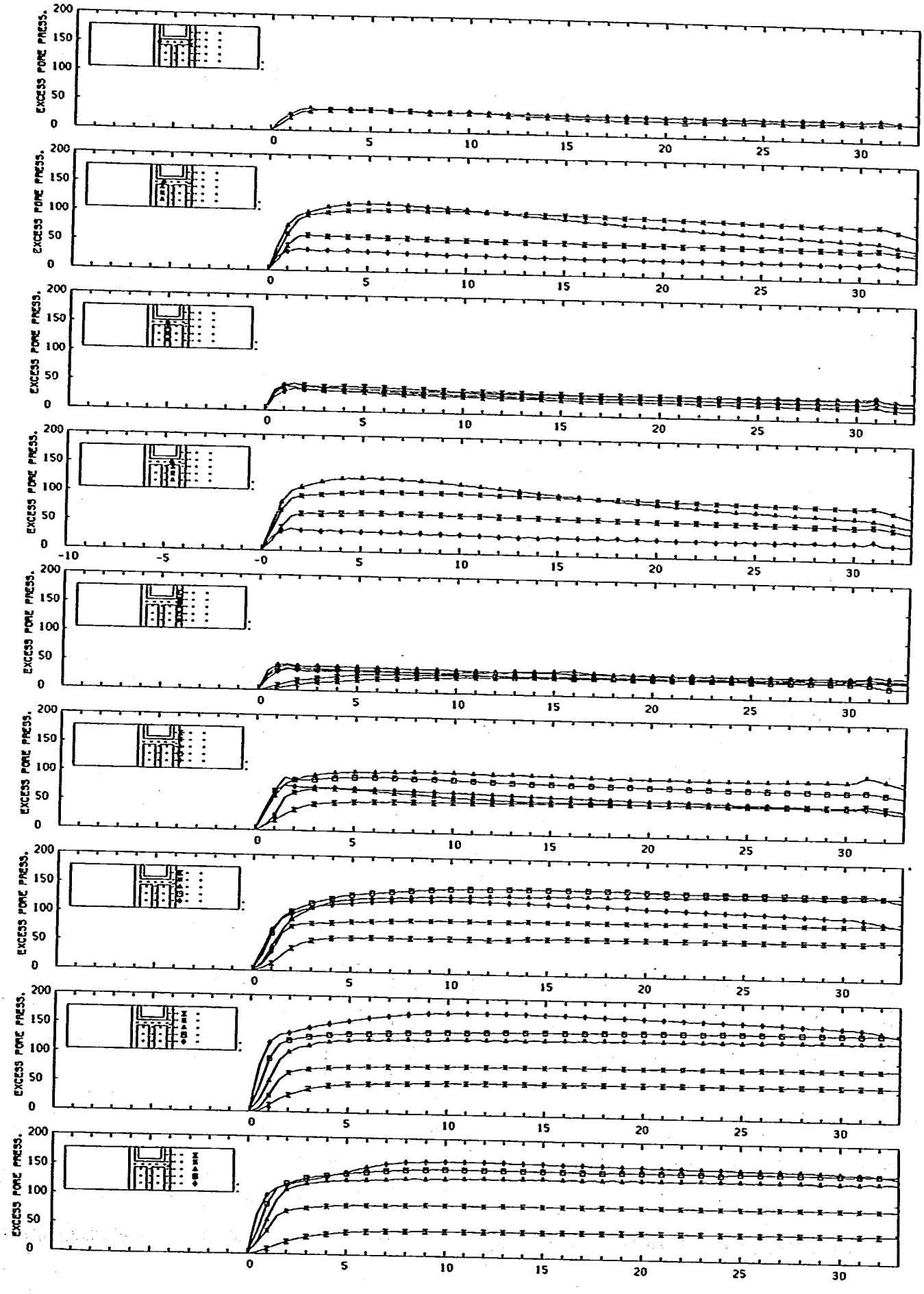




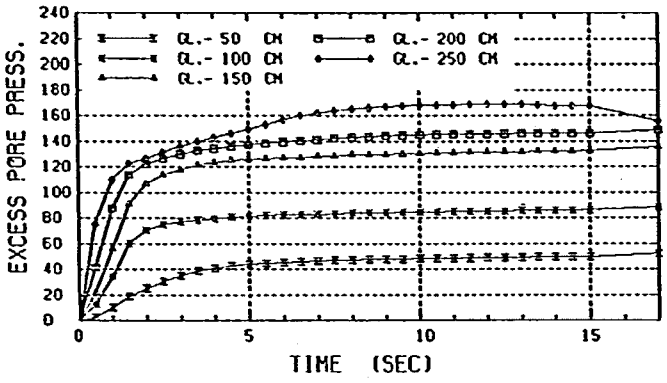




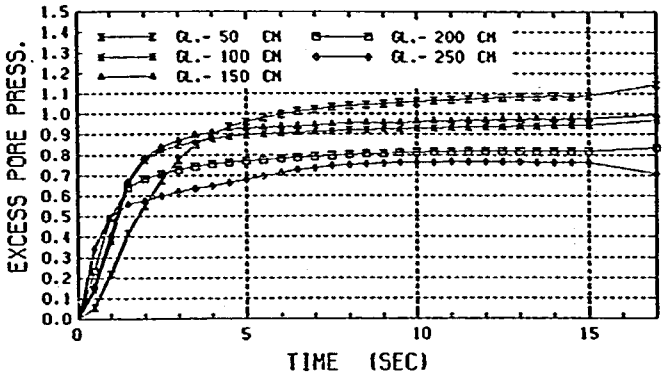
付図－９・９　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm^2、模型－10）



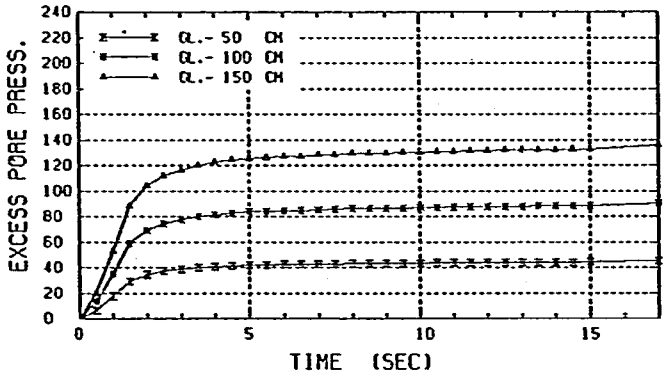
付図－9・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－10）



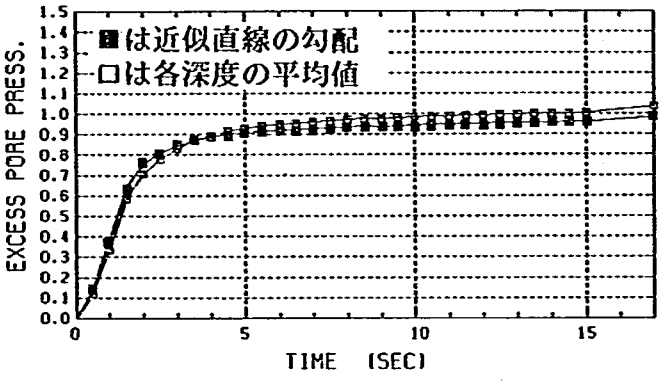
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



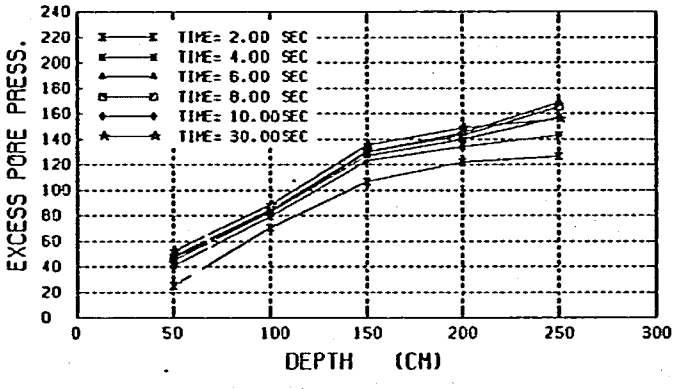
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



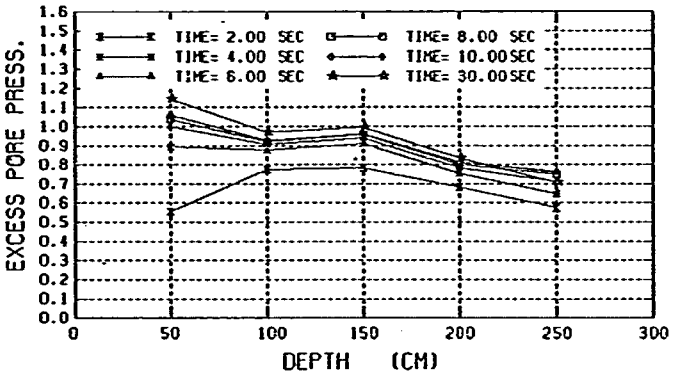
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



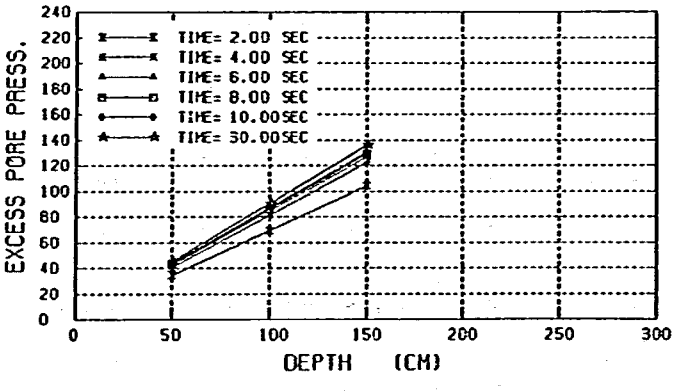
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



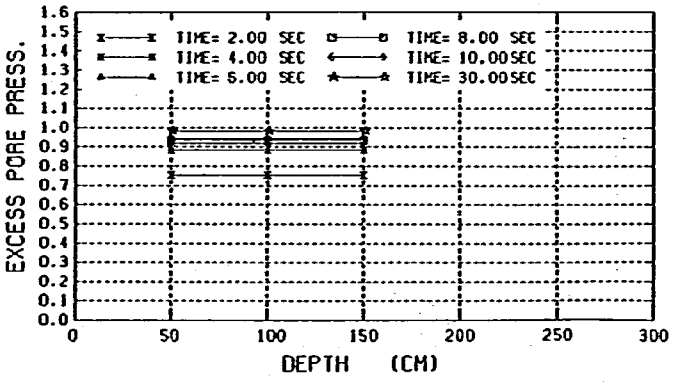
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

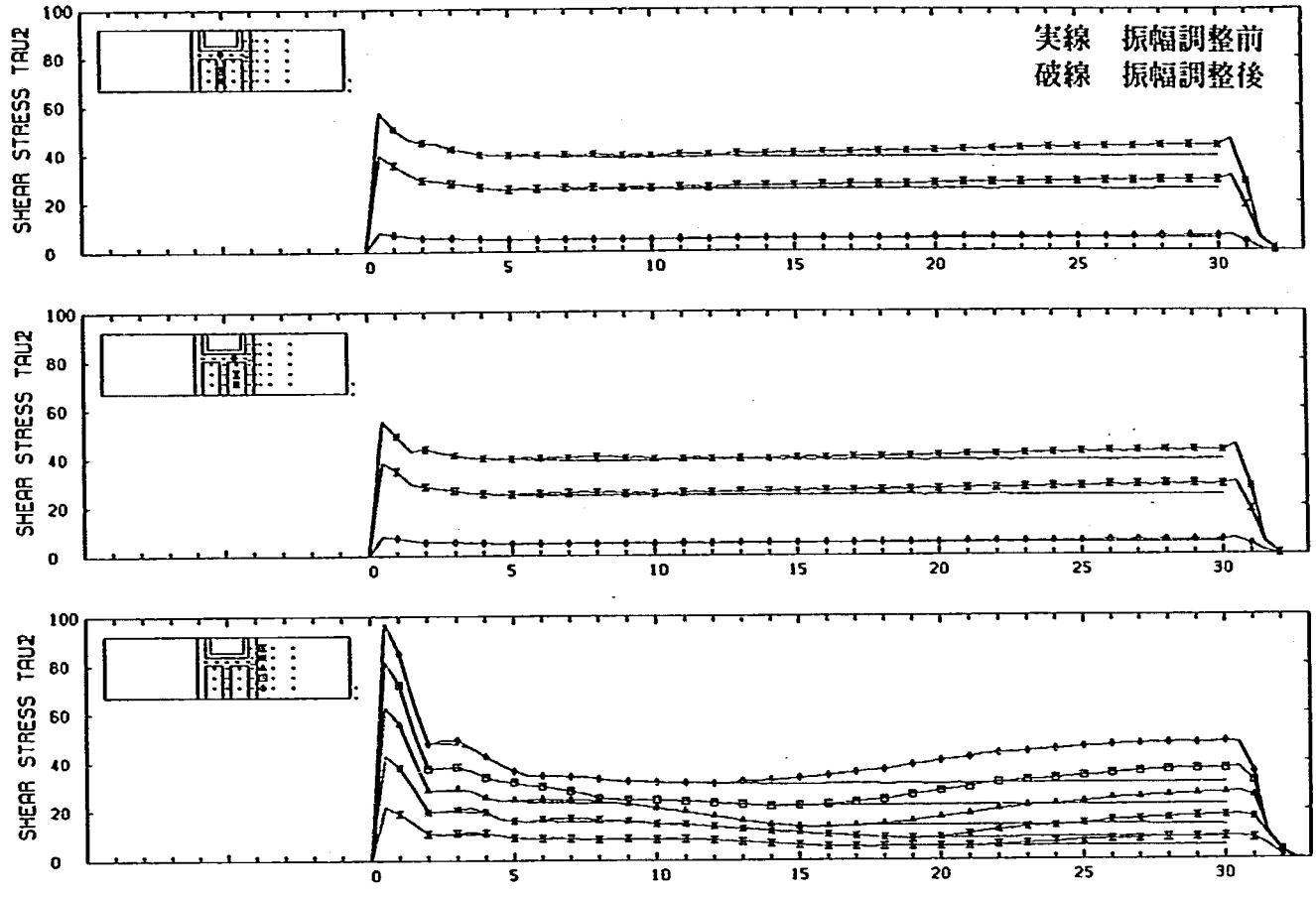


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

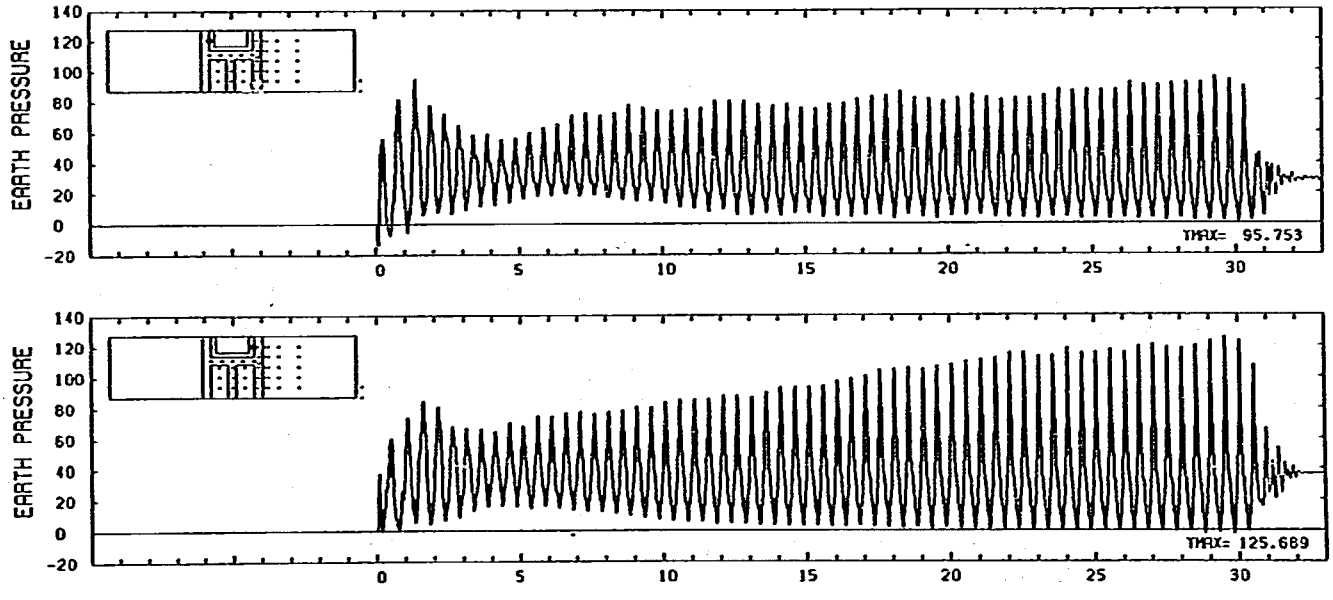


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

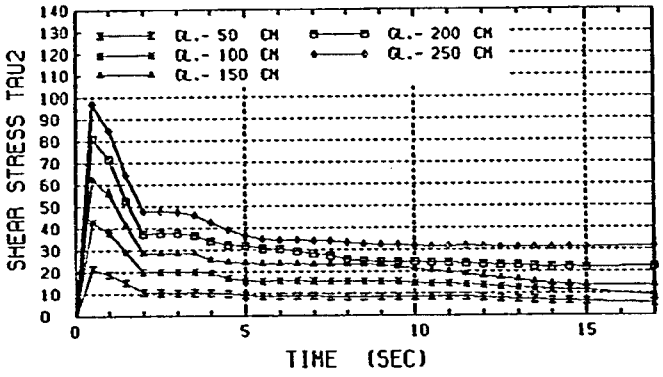
付図－９・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－10）



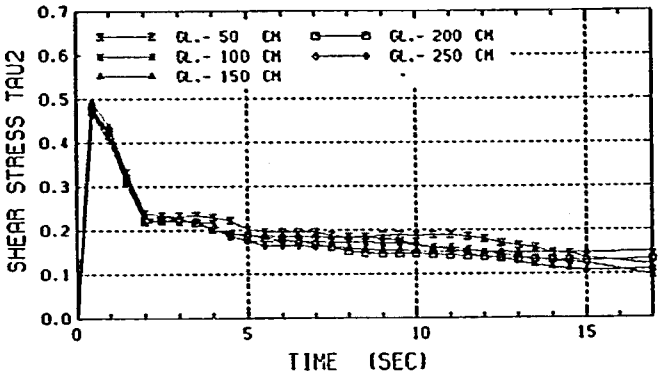
付図－９・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－10）



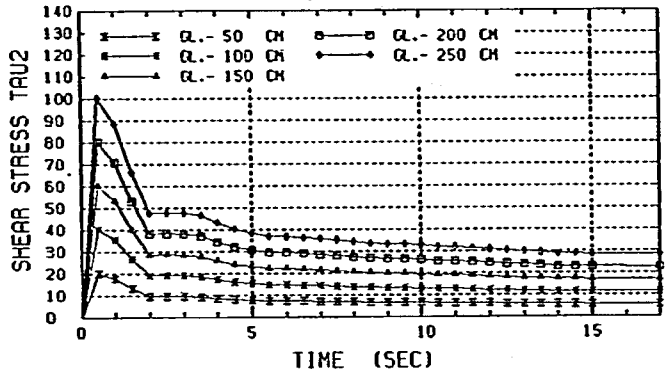
付図－９・13　掘割道路模型に作用する土圧の計測結果（単位：gf/cm²、模型－10）



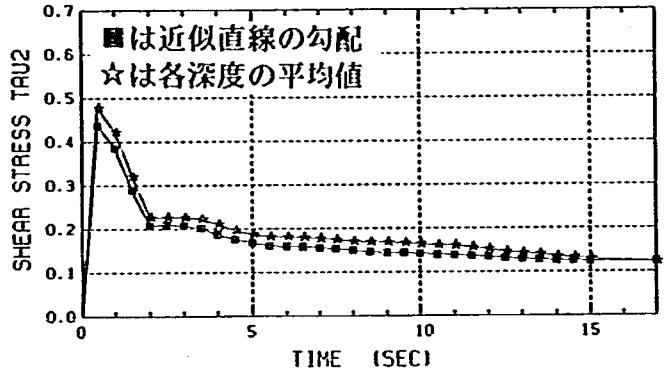
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



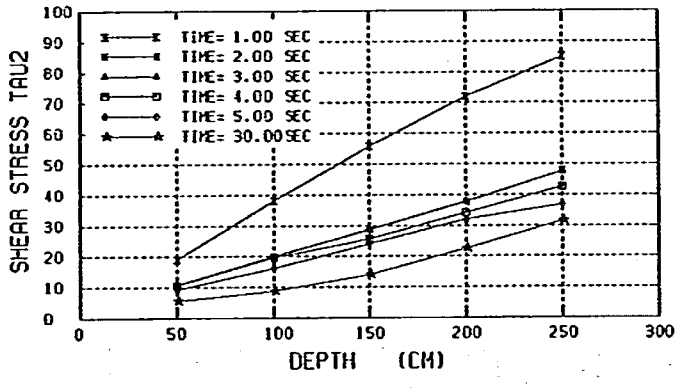
（ｂ）同左のせん断応力比



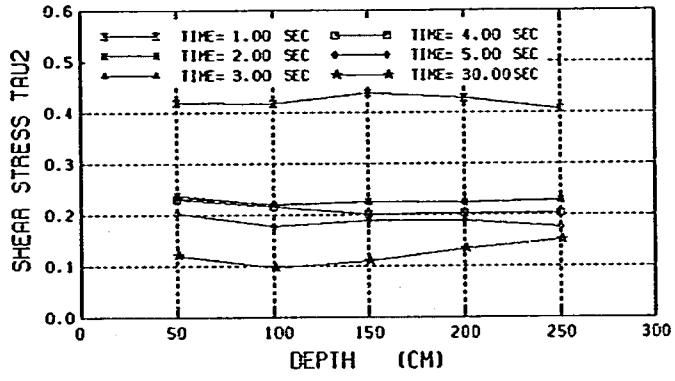
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



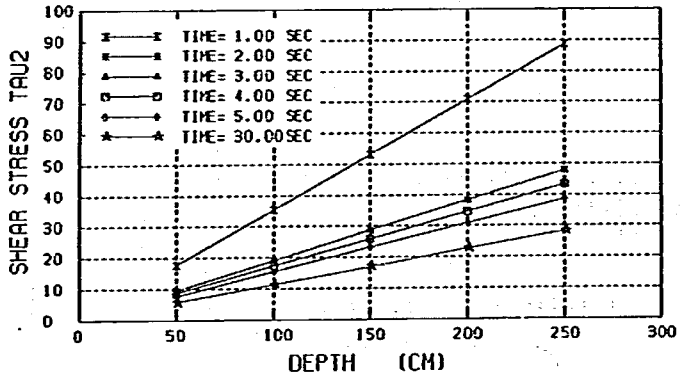
（ｄ）同左のせん断応力比



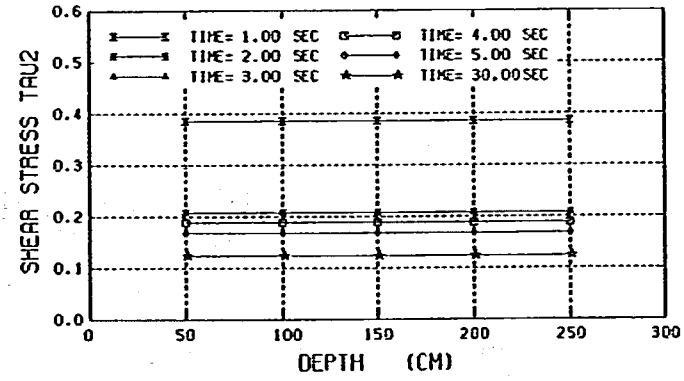
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

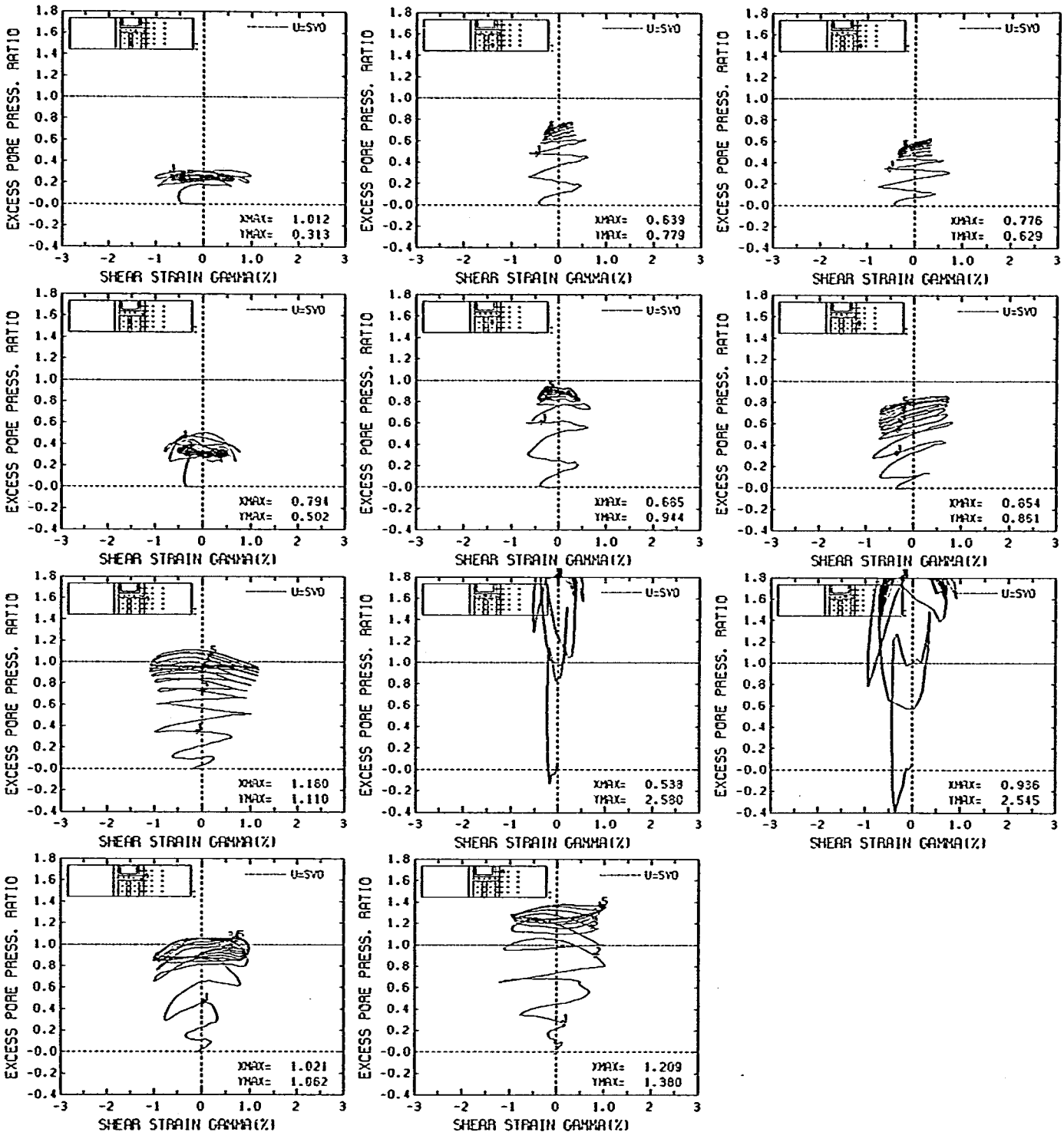


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

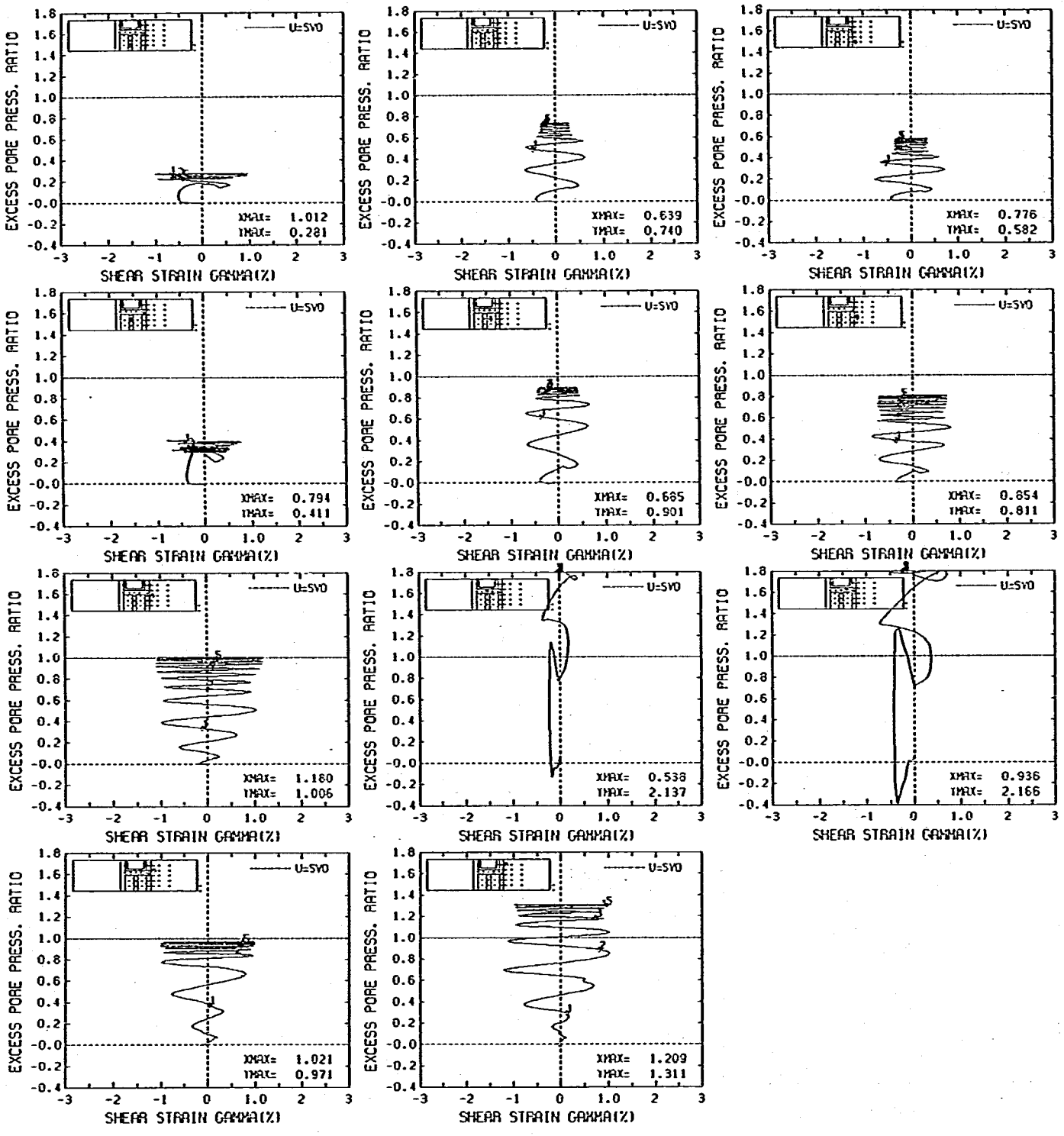


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

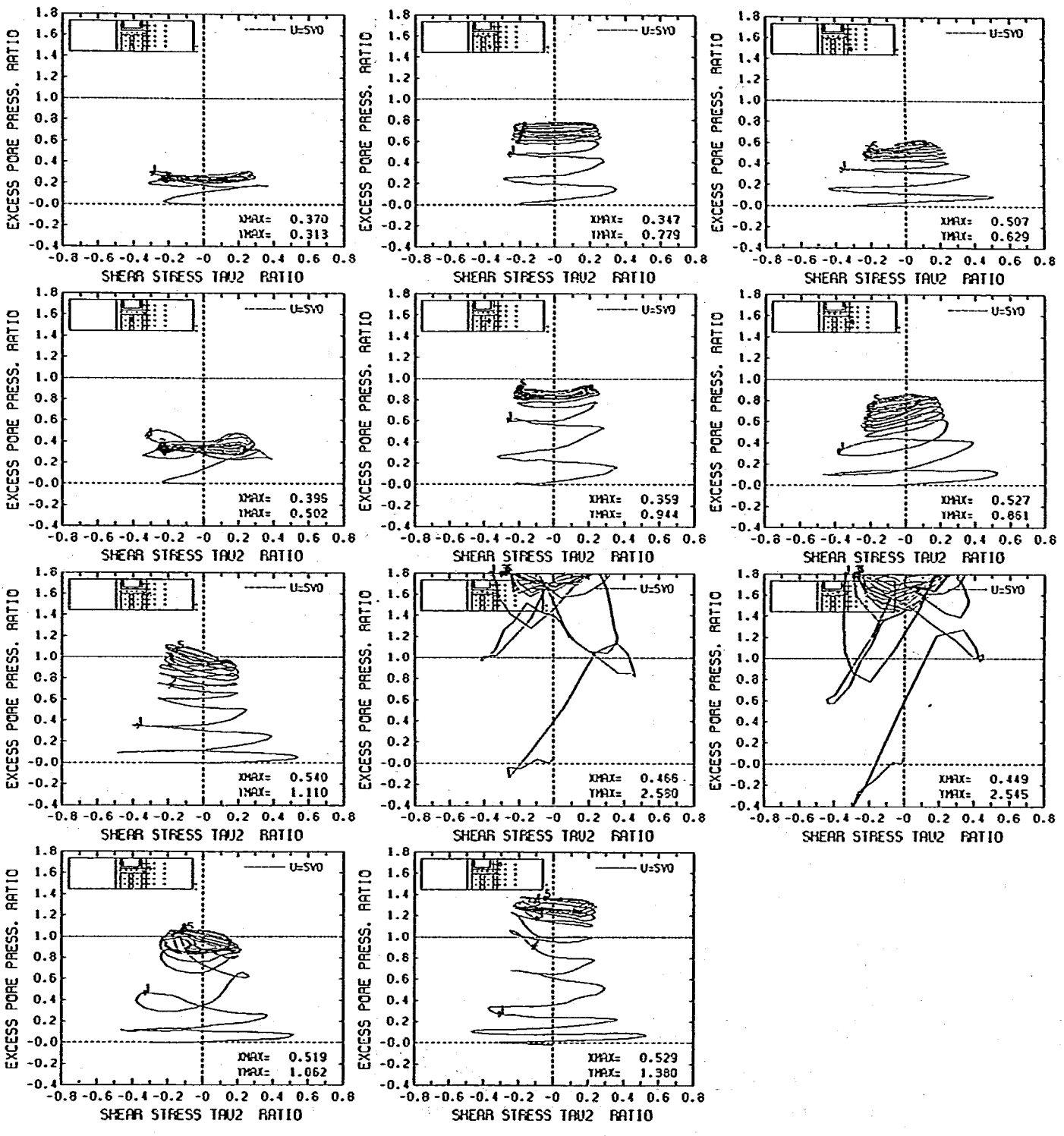
付図－９・14　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－10）



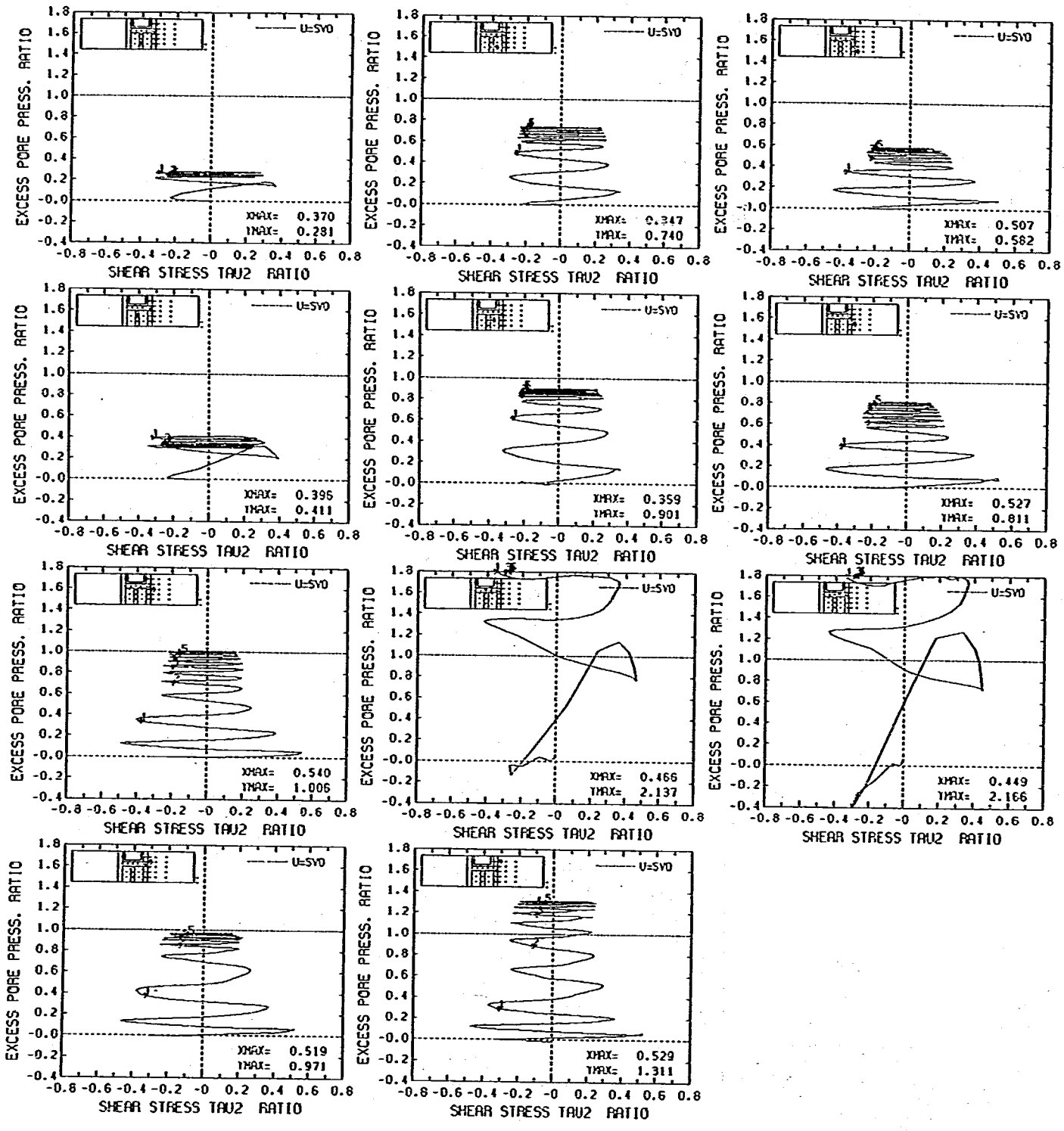
付図－9・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－10）



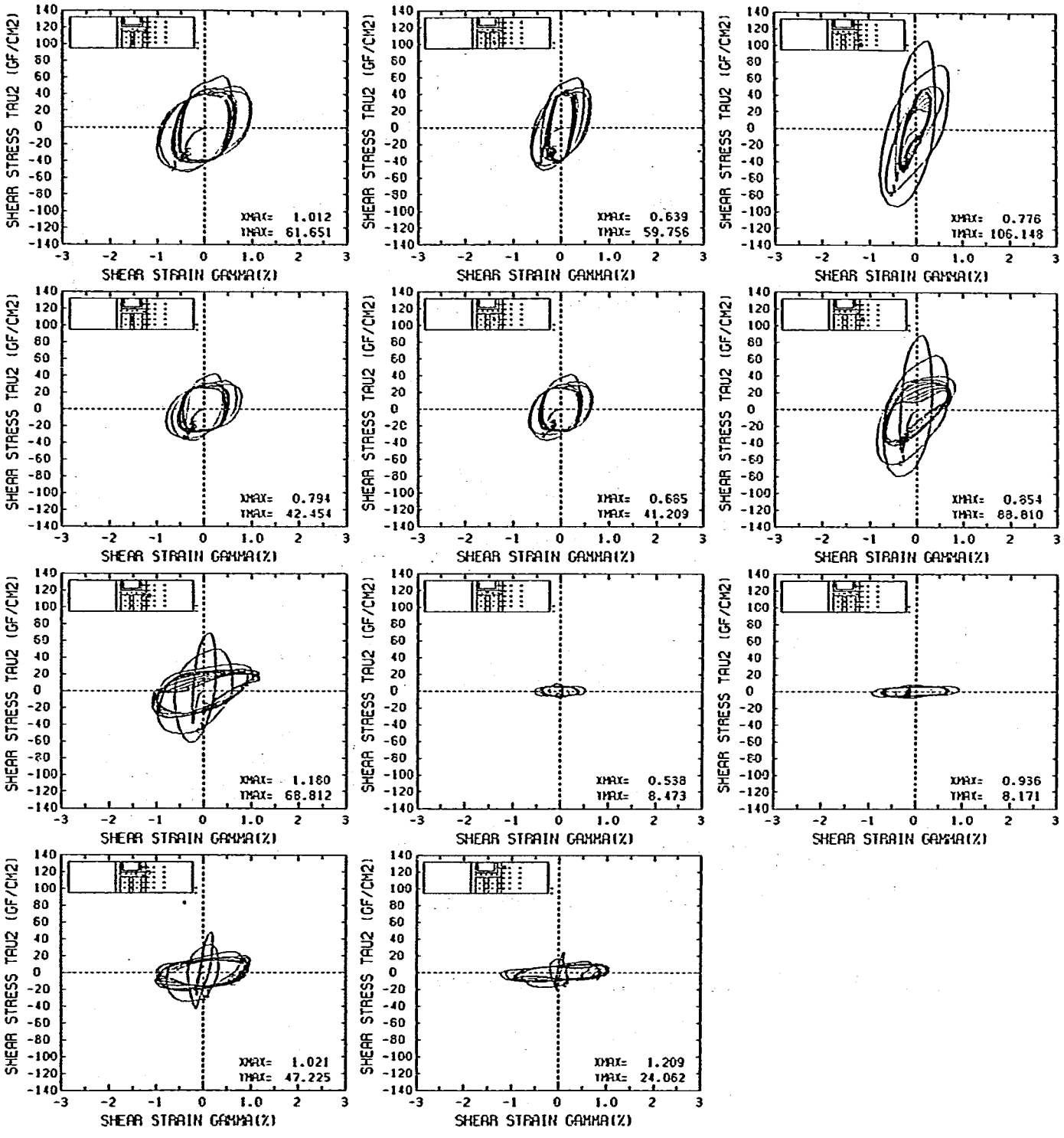
付図－9・16　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－10）



付図－9・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－10）

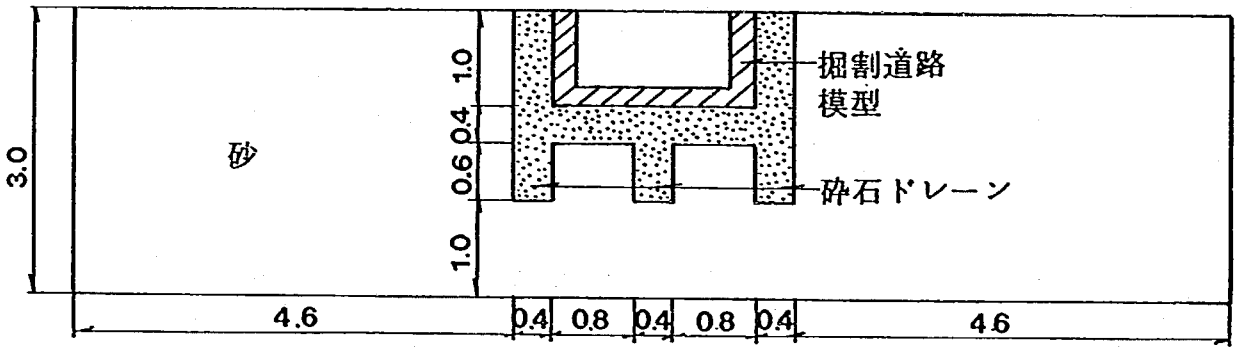


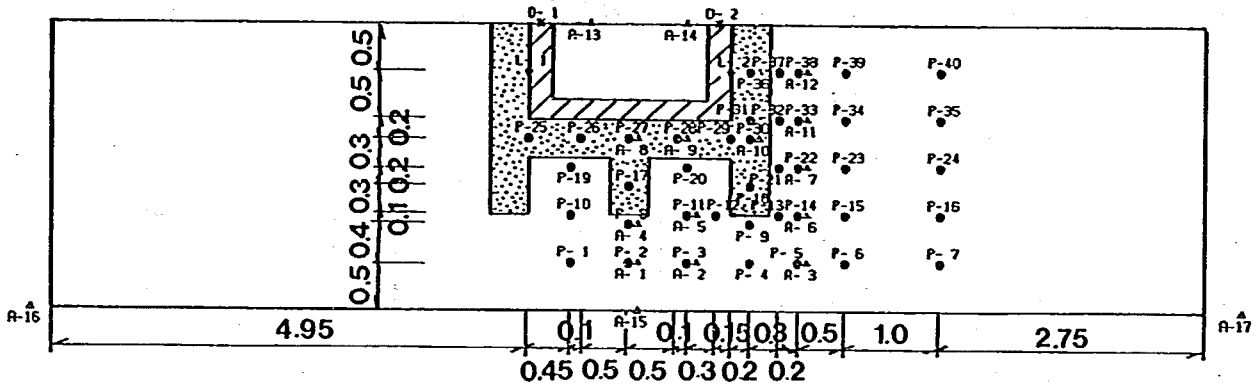
付図－９・18　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－10）



付図－9・19　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－10）

模型 11

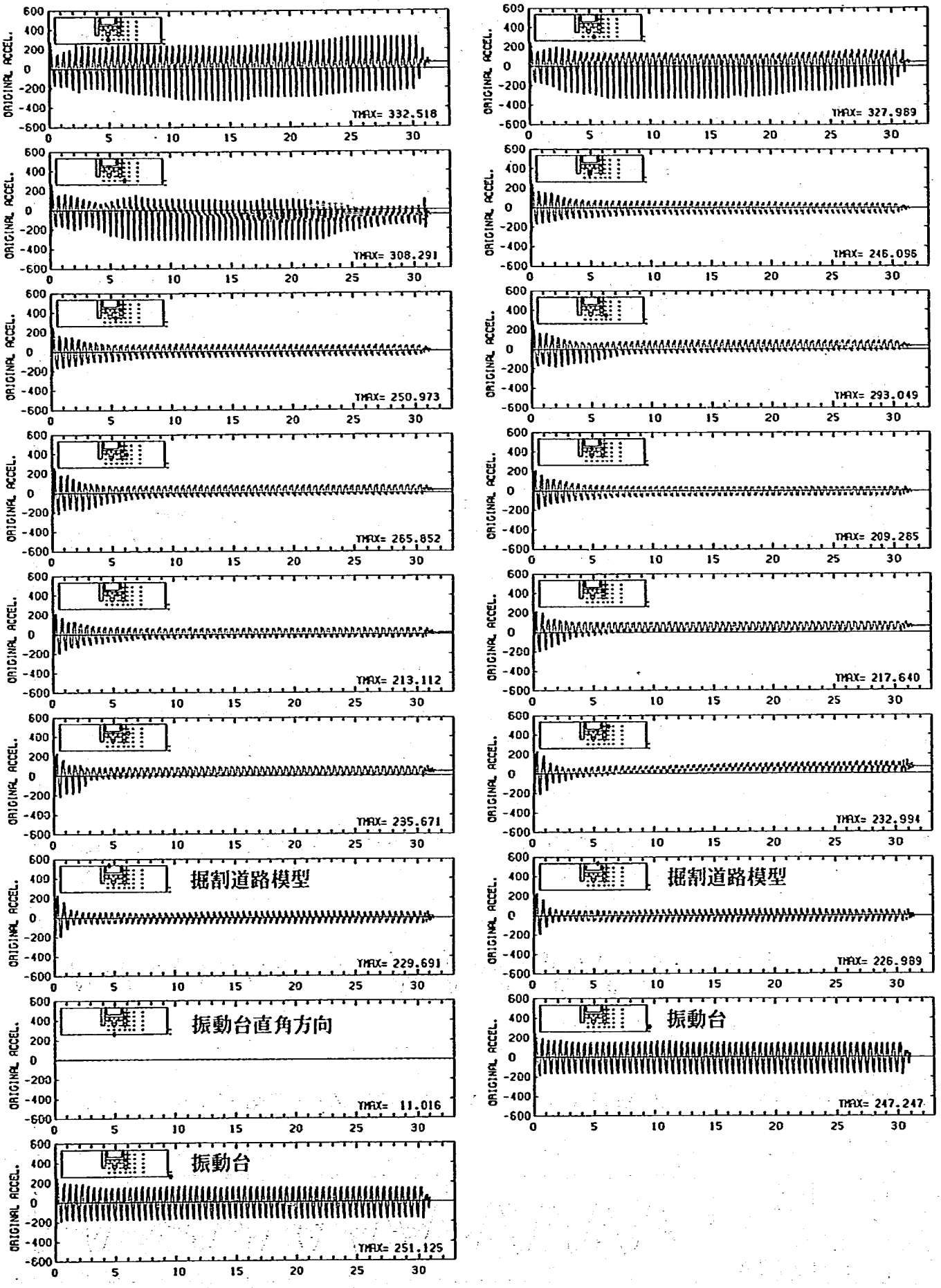




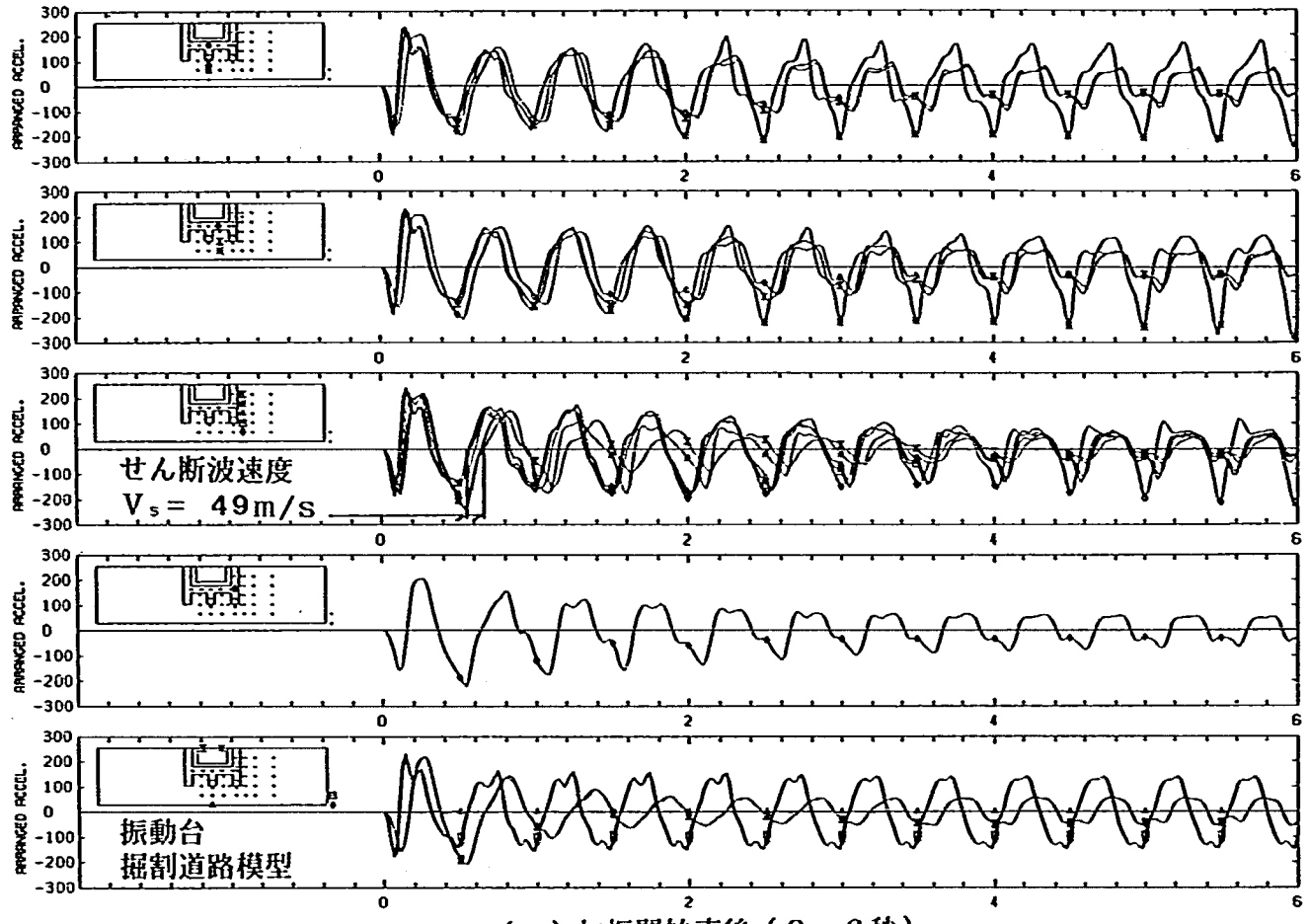
● P－ 間隙水圧計 （40）
△ A－ 加速度計 （17）
＊ D－ 変位計 （2）
◇ L－ 土圧計 （2）

A－16，A－17は振動台加速度
A－15は加振直角方向
A－13，A－14は掘割道路模型上の手前側と奥側

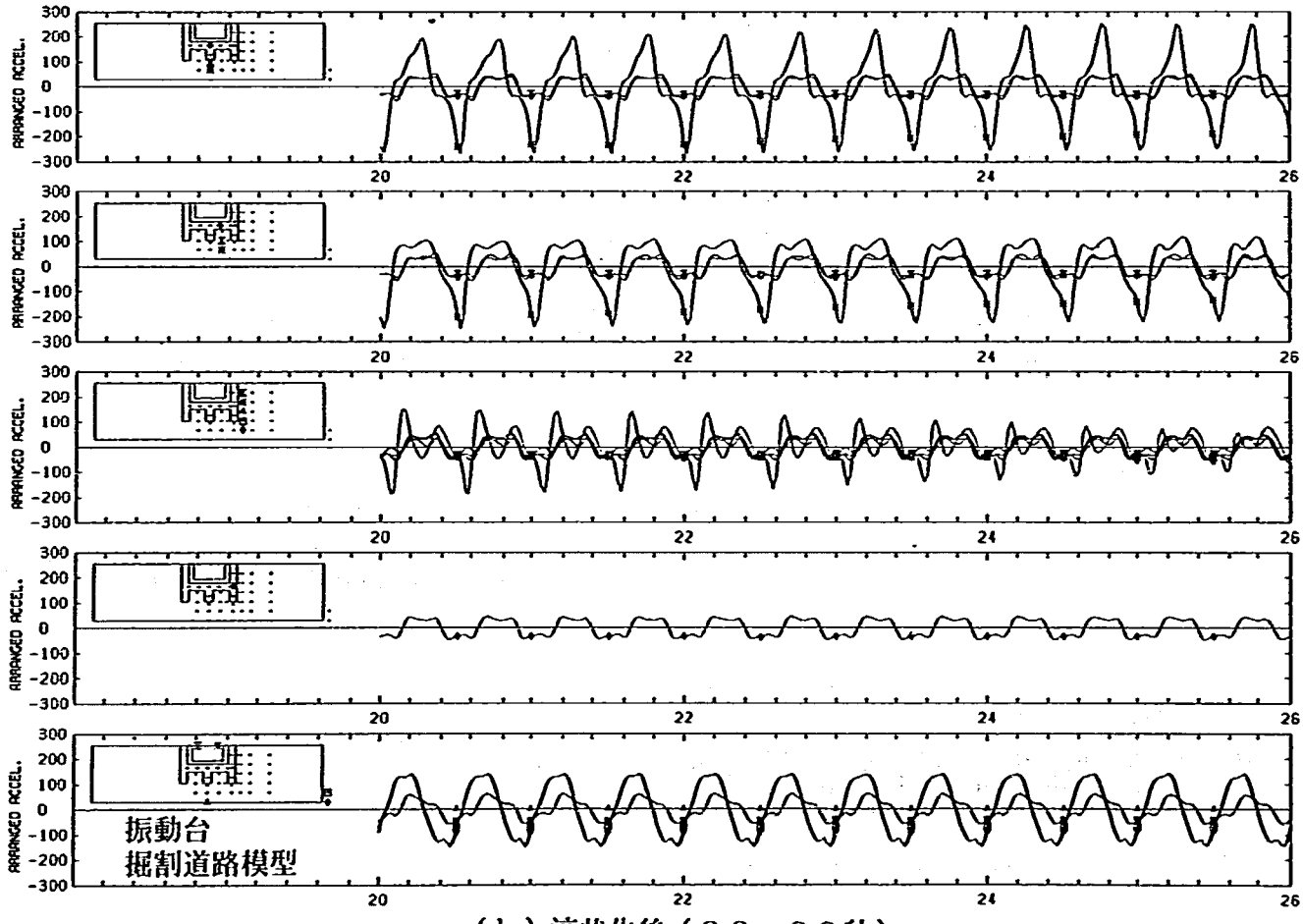
付図－10・1 模型の寸法と計測器の配置（模型－11）



付図－10・2　加速度の時刻歴波形（補正前、模型－11）

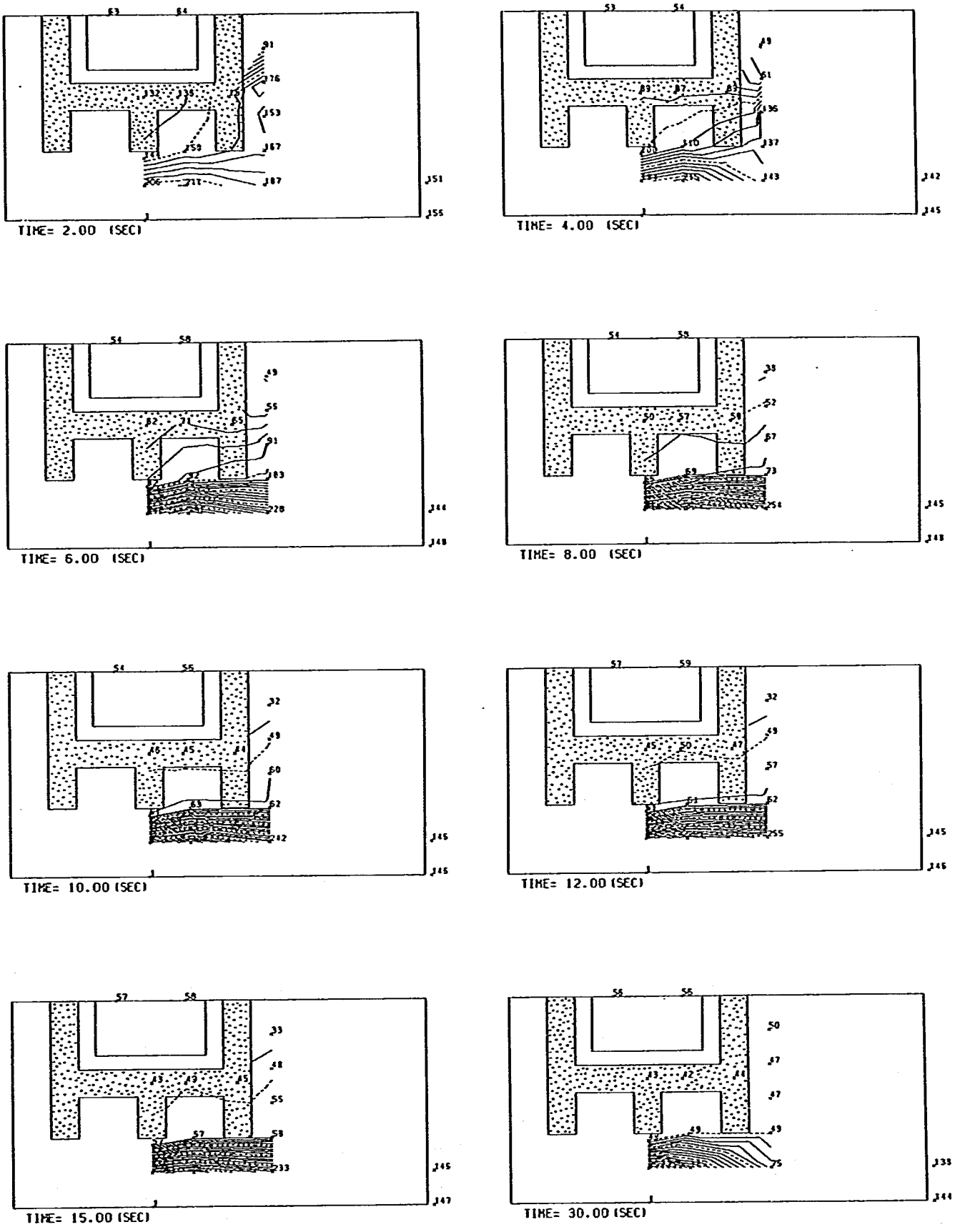


（ａ）加振開始直後（０～６秒）

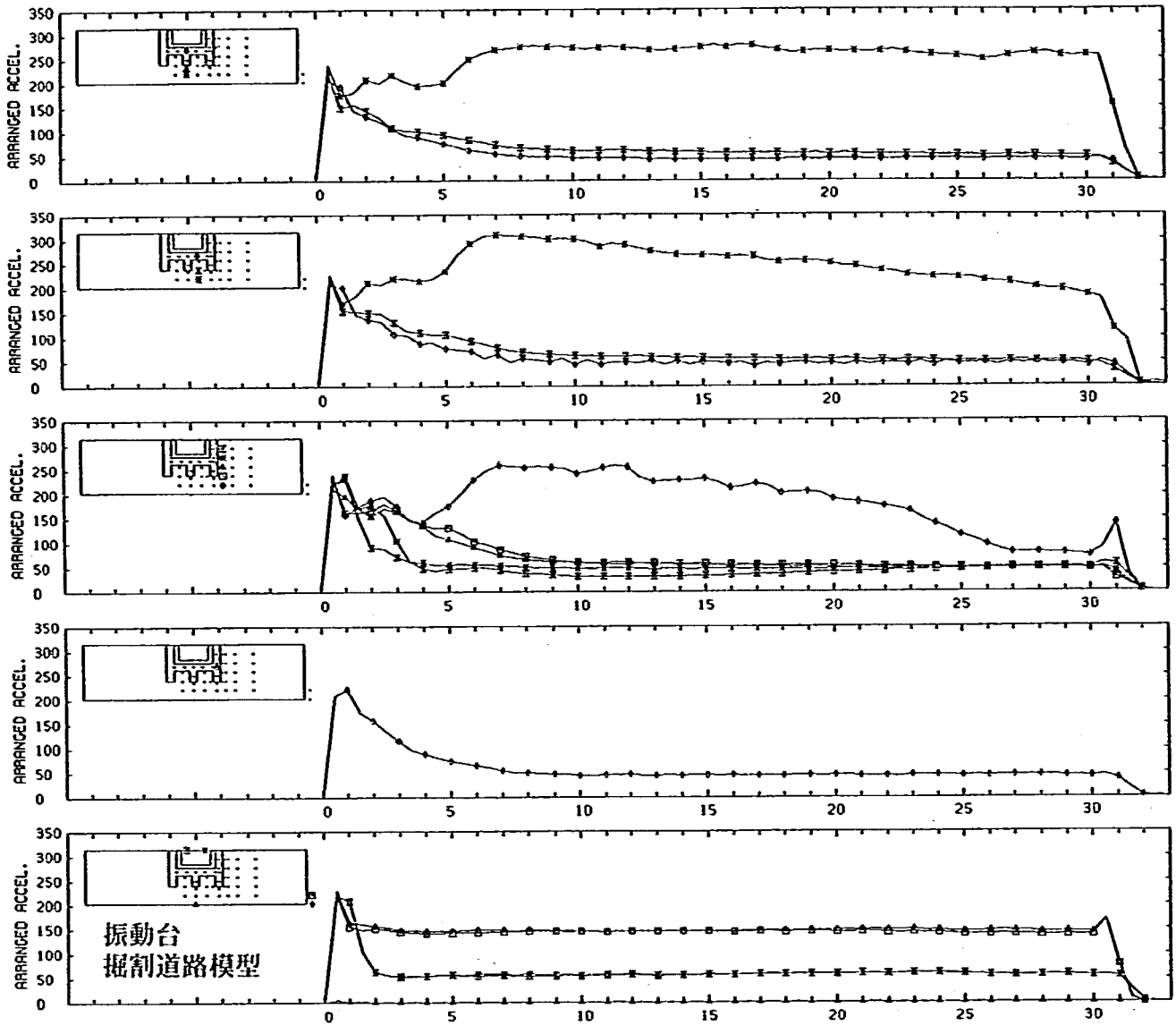


（ｂ）液状化後（２０～２６秒）

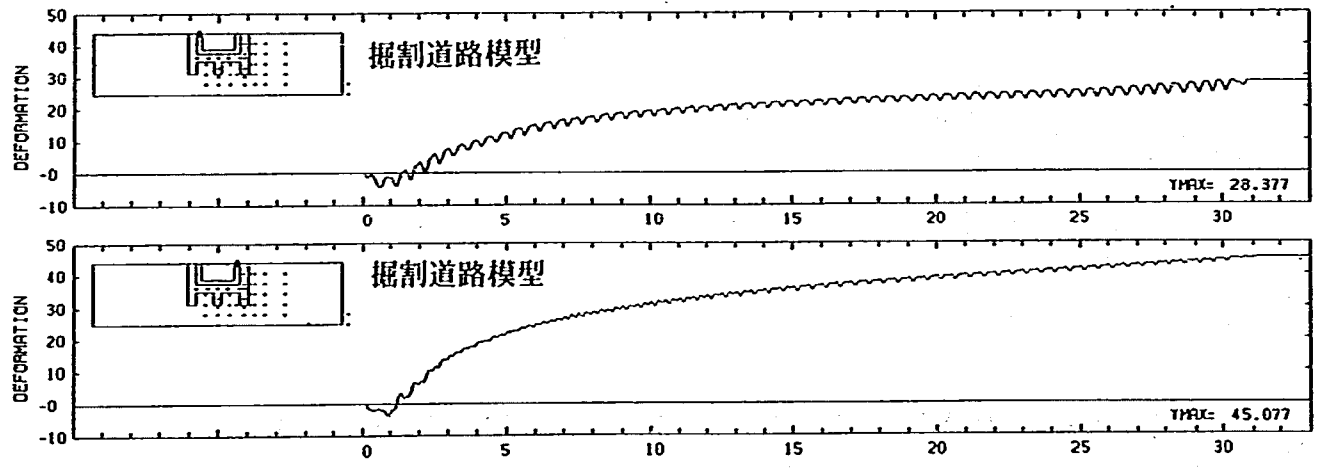
付図－10・３　加速度の時刻歴波形（補正後、模型－11）



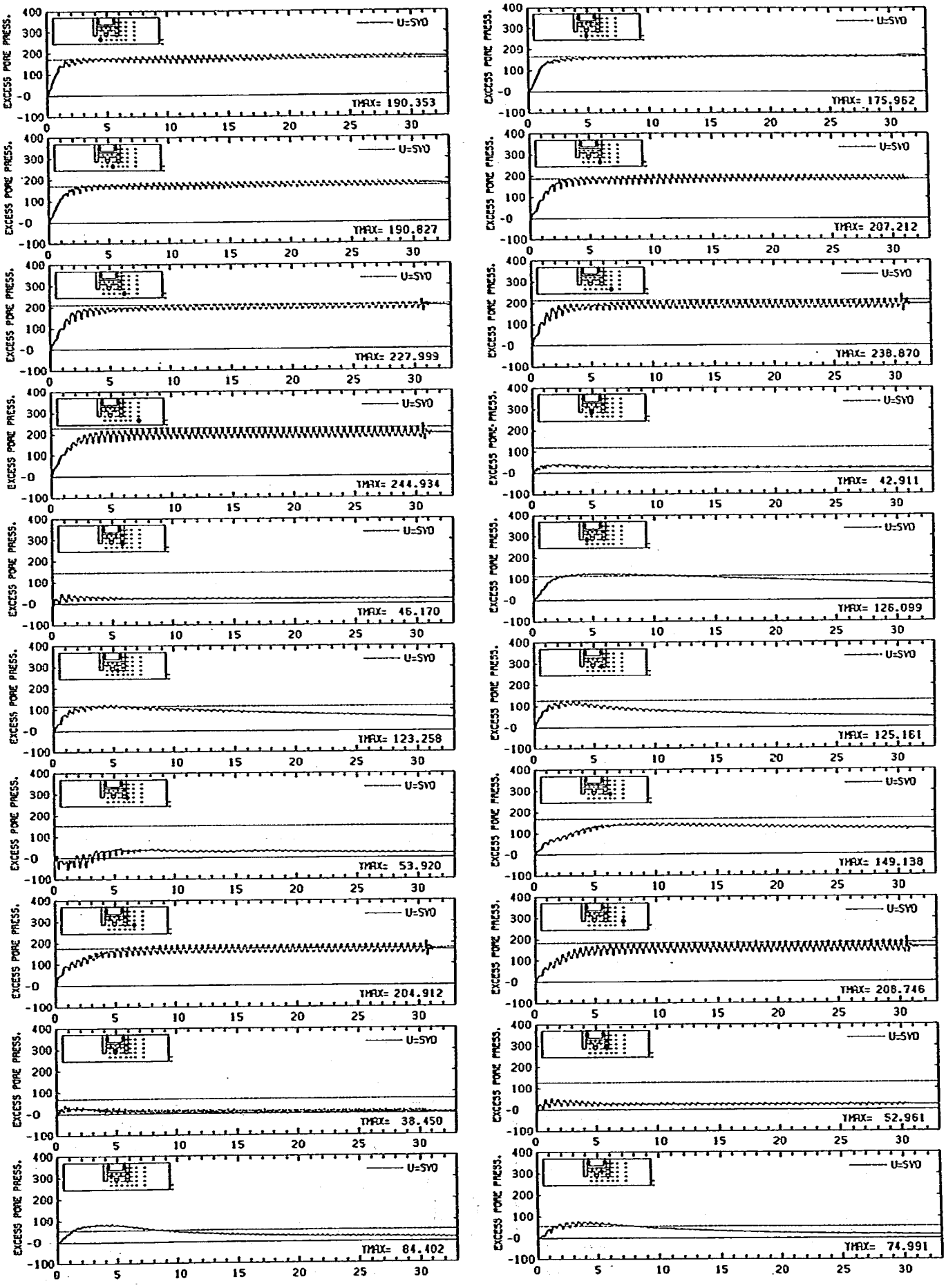
付図－10・4　加速度の空間分布（コンターのピッチ10gal、模型－11）



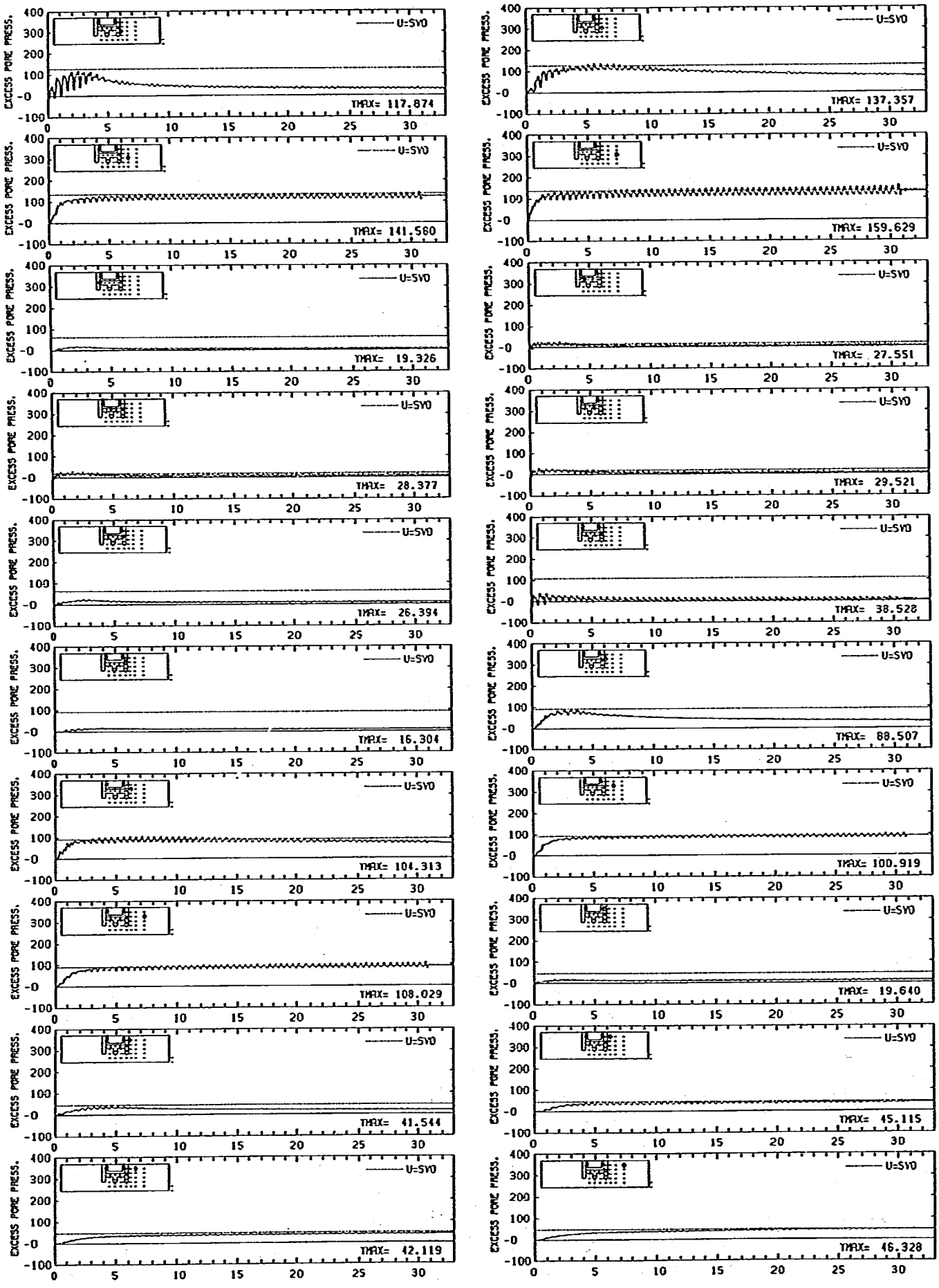
付図－10・5　加速度の時刻歴（１波ごとの最大値、模型－11）



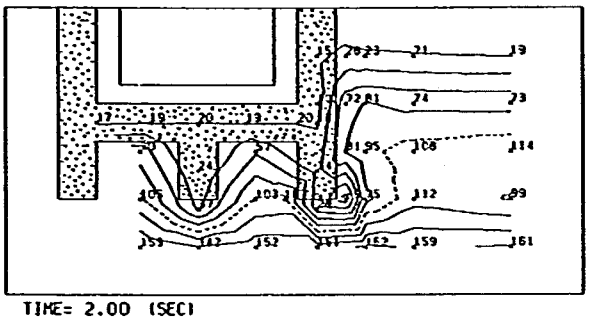
付図－10・6　変位計による掘割道路模型の浮上量の測定結果（単位：㎜、模型－11）

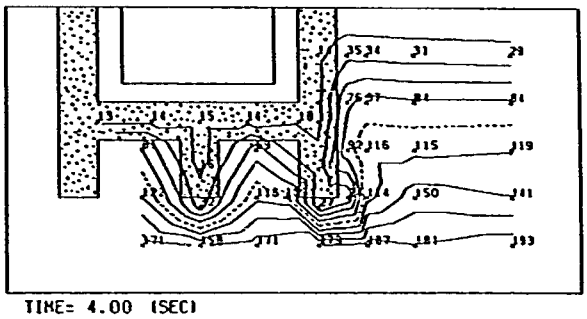


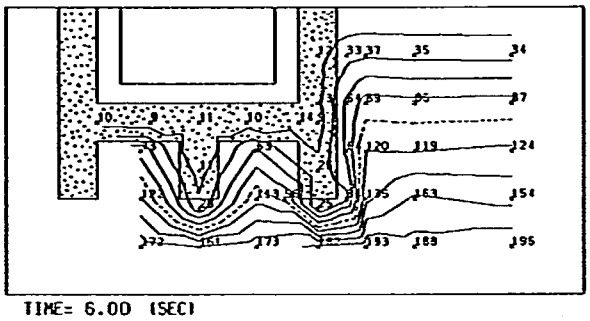
付図－10・7　過剰間隙水圧の記録波形（その1、模型－11）

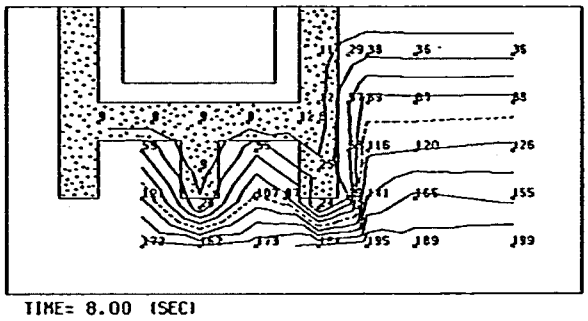


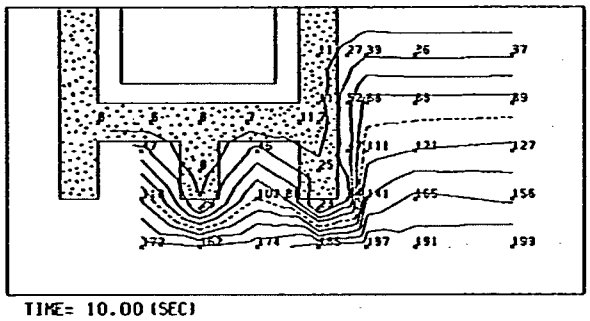
付図－10・8　過剰間隙水圧の記録波形（その2、模型－11）

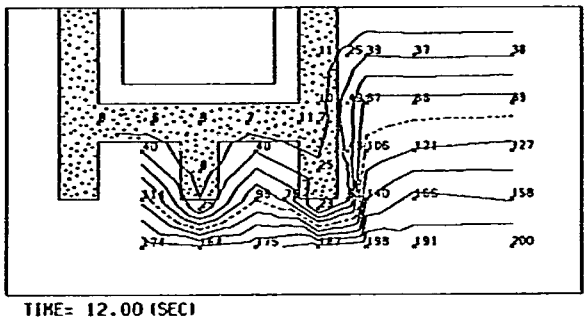


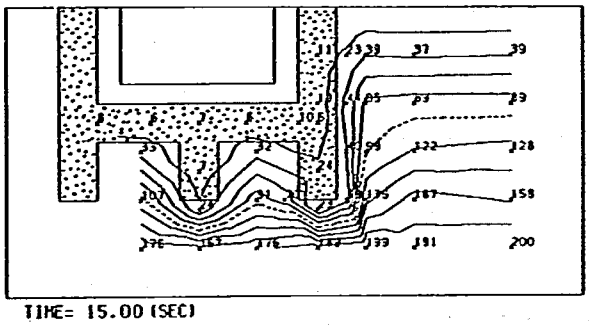


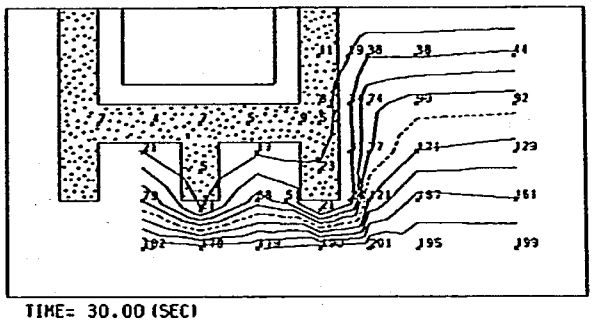




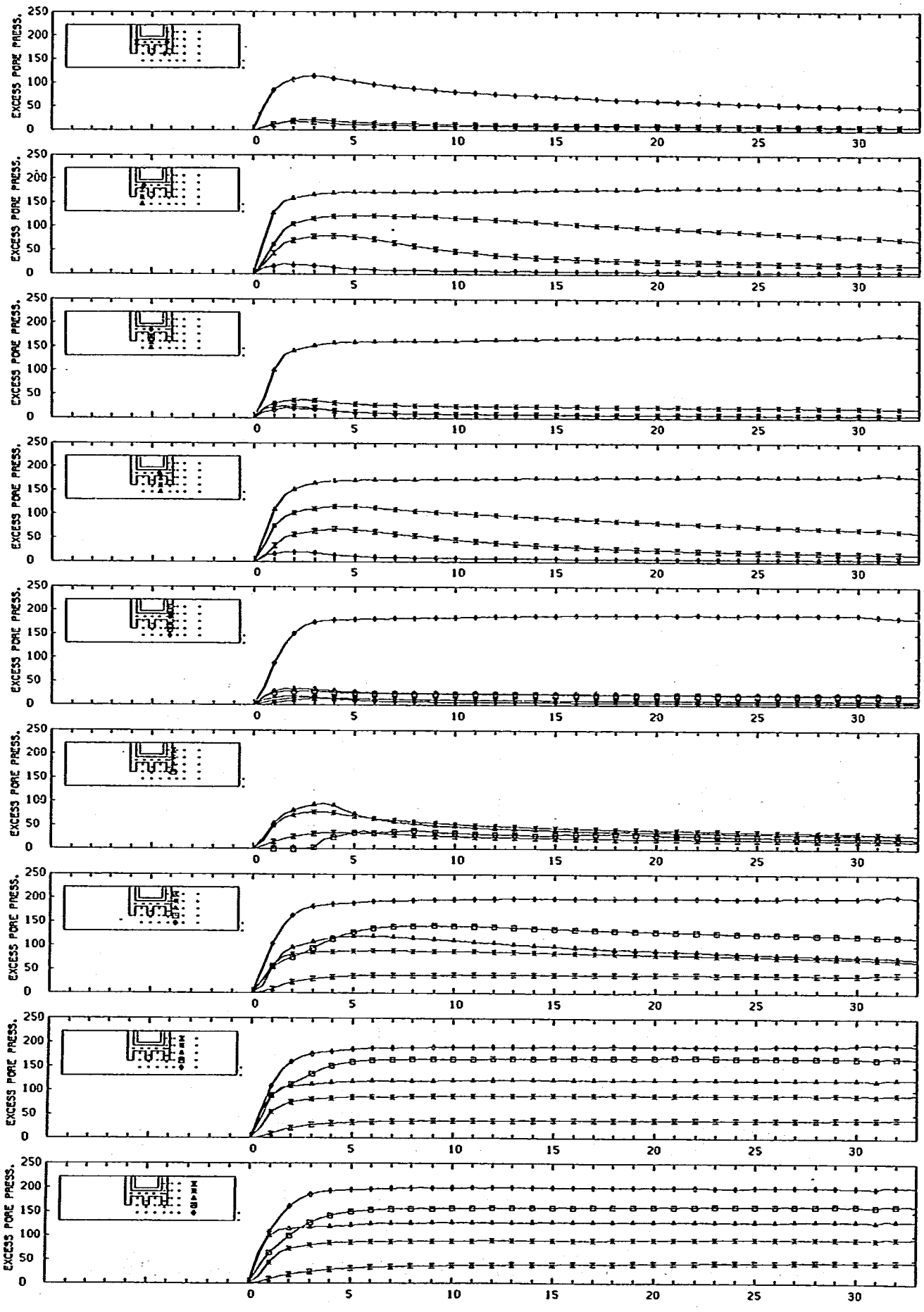




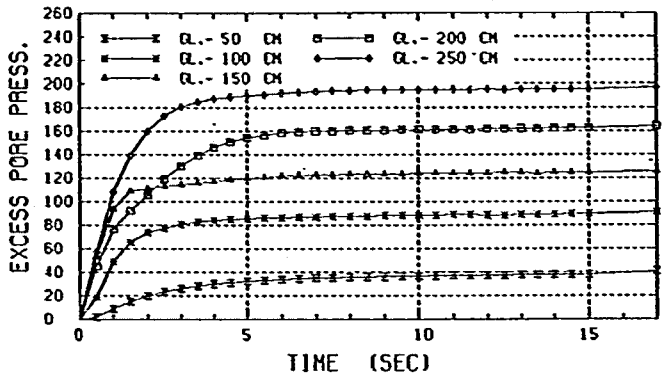




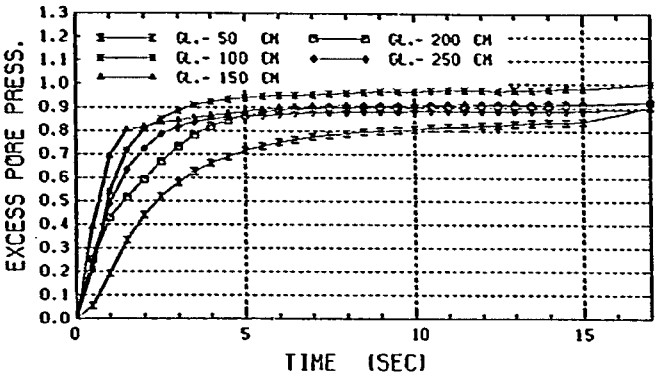
付図－10・9　過剰間隙水圧の空間分布（コンターのピッチ20gf/cm²、模型－11）



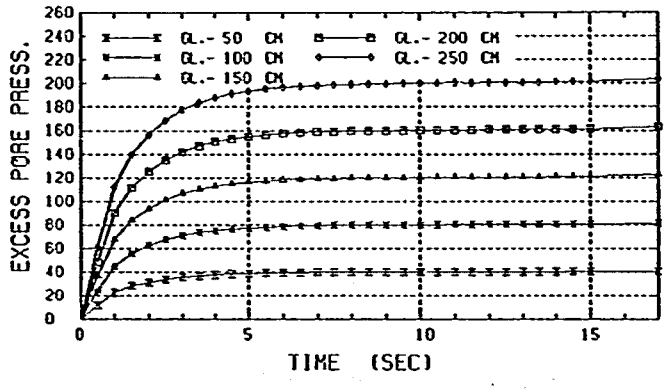
付図－10・10　過剰間隙水圧の時刻歴波形（スムージング後、模型－11）



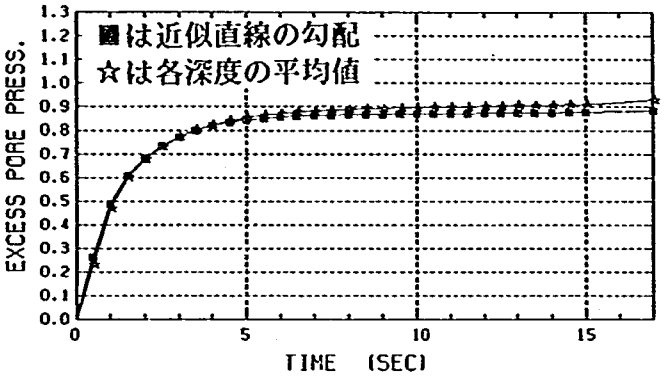
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



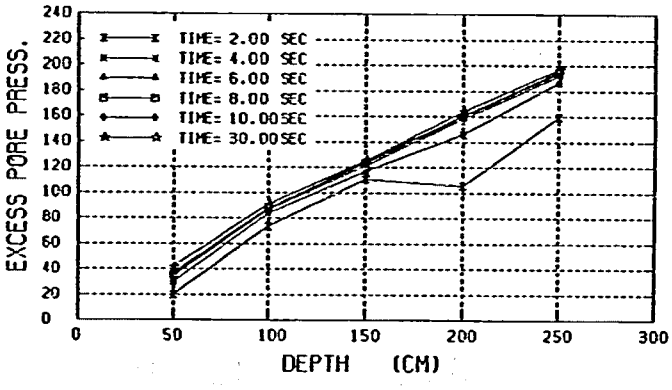
（ｂ）同左の過剰間隙水圧比



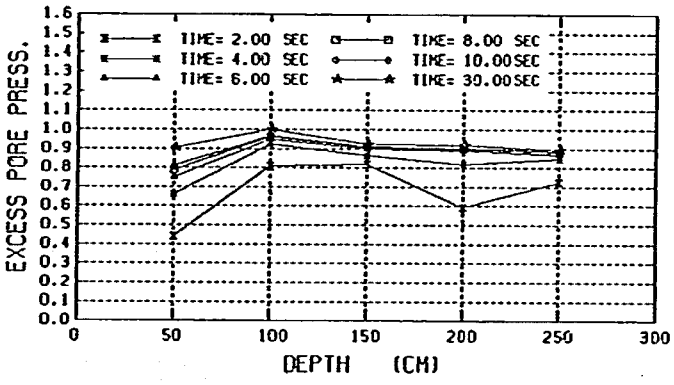
（ｃ）直線近似した過剰間隙水圧



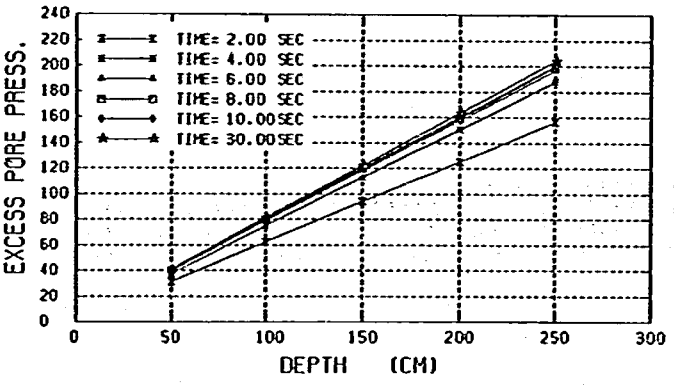
（ｄ）同左の過剰間隙水圧比



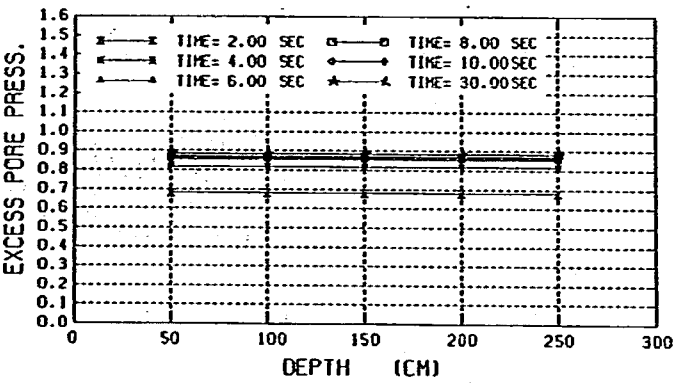
（ｅ）過剰間隙水圧の深度分布



（ｆ）過剰間隙水圧比の深度分布

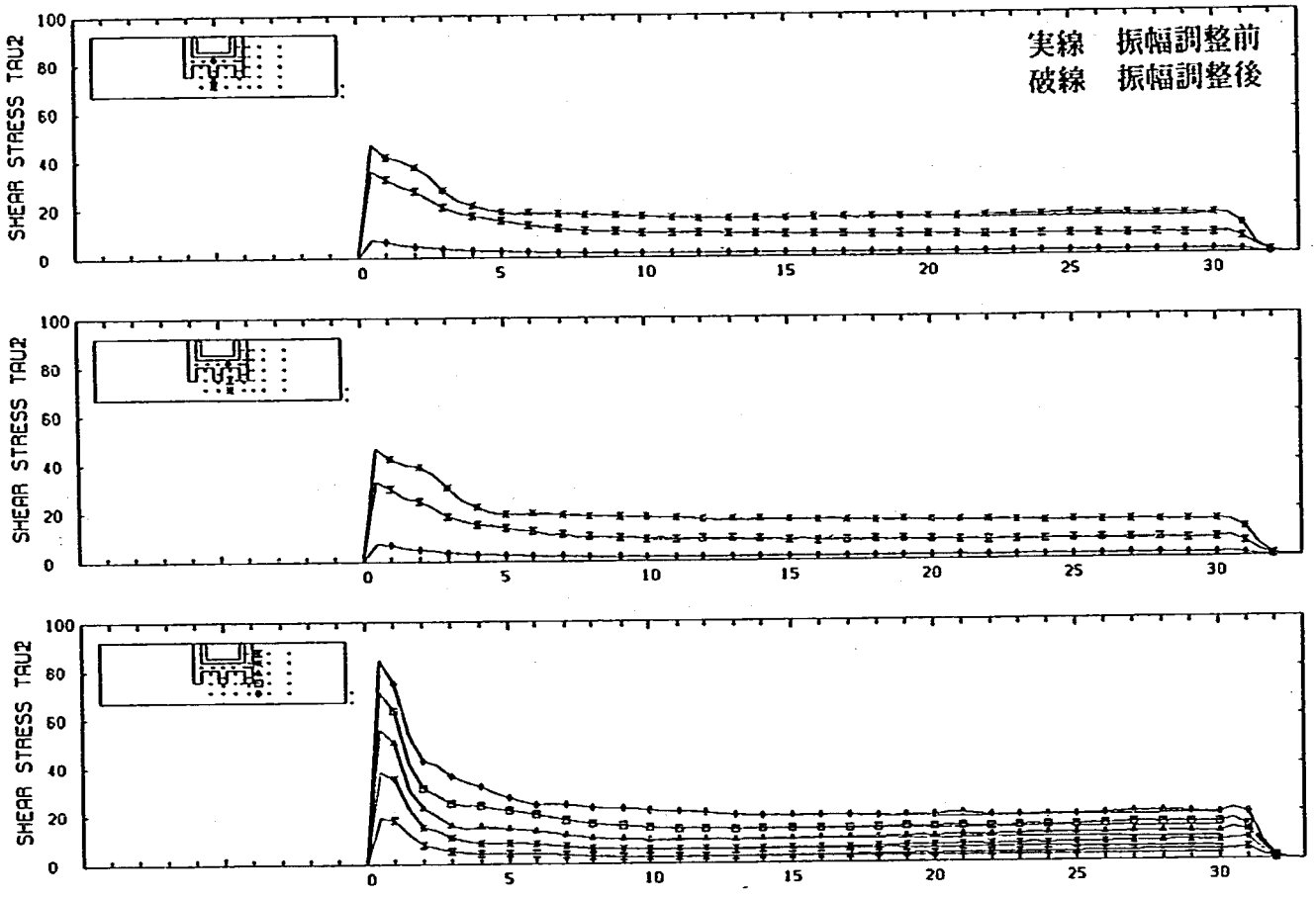


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

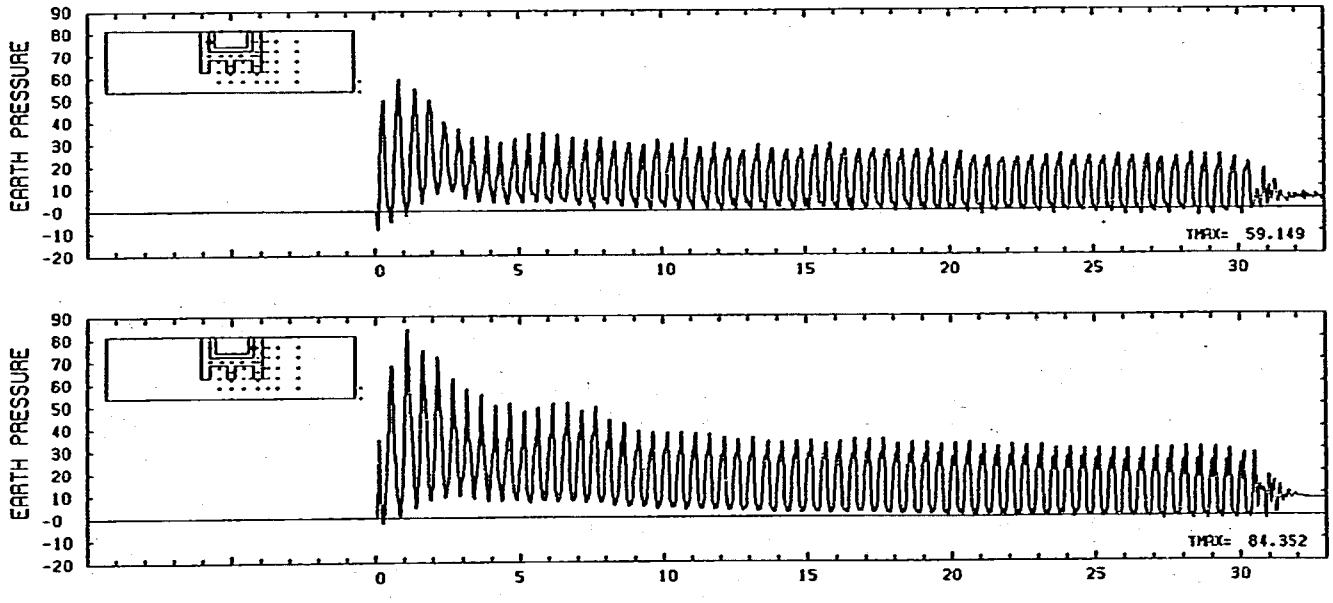


（ｈ）近似直線の勾配としての過剰間隙水圧比

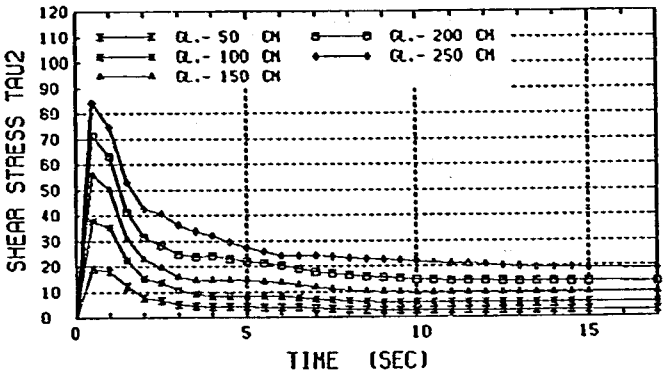
付図－10・11　過剰間隙水圧の整理結果（スムージング後、模型－11）



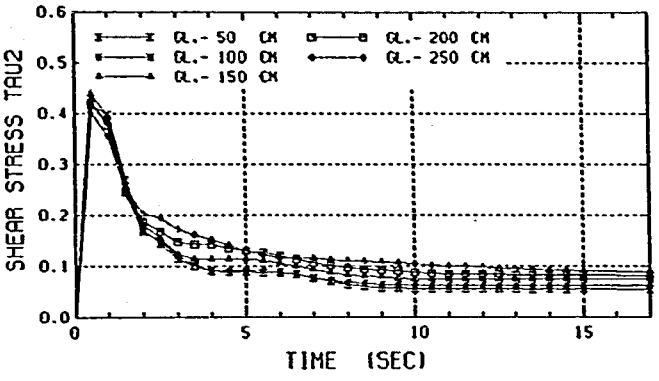
付図－10・12　せん断応力振幅の時刻歴波形（模型－11）



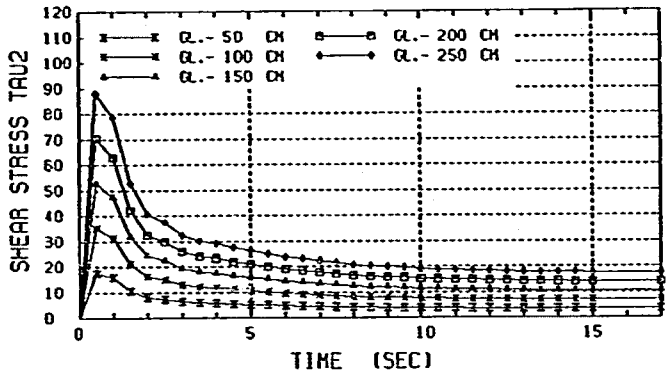
付図－10・13　掘割道路模型に作用する土圧の計測結果（単位：gf/cm²、模型－11）



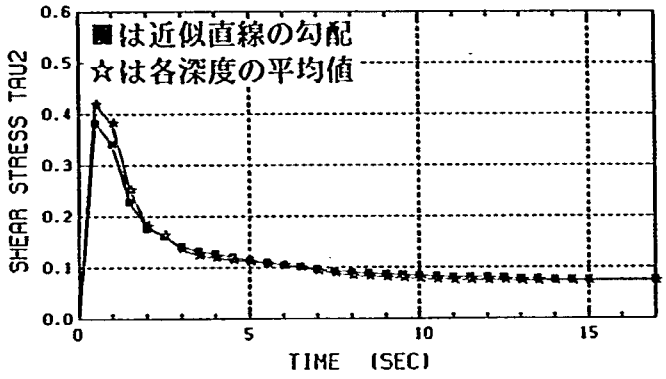
（ａ）各深度ごとの平均値の経時変化



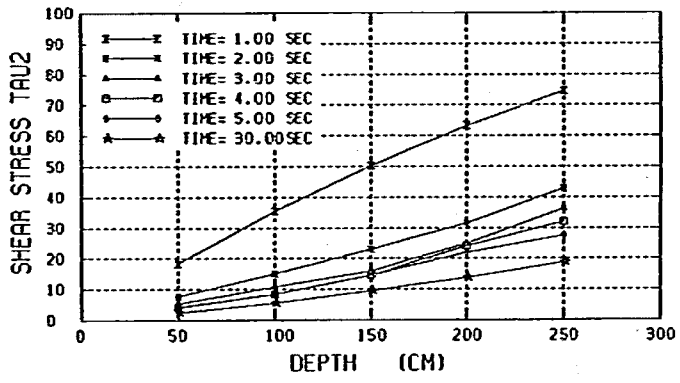
（ｂ）同左のせん断応力比



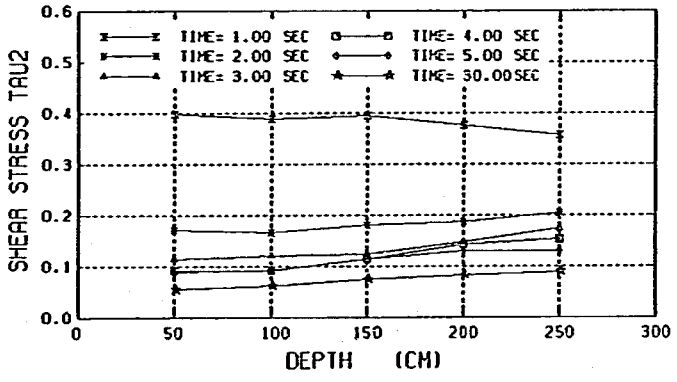
（ｃ）直線近似したせん断応力振幅



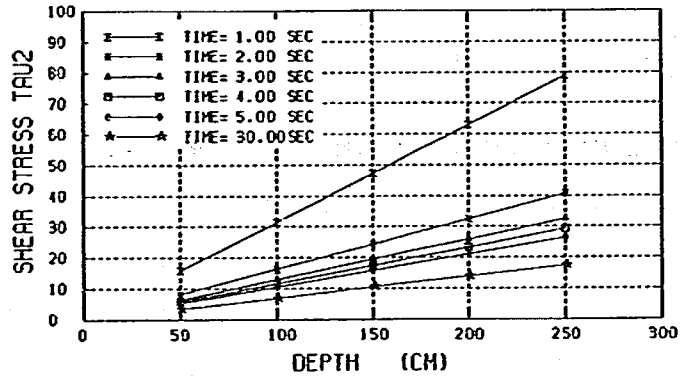
（ｄ）同左のせん断応力比



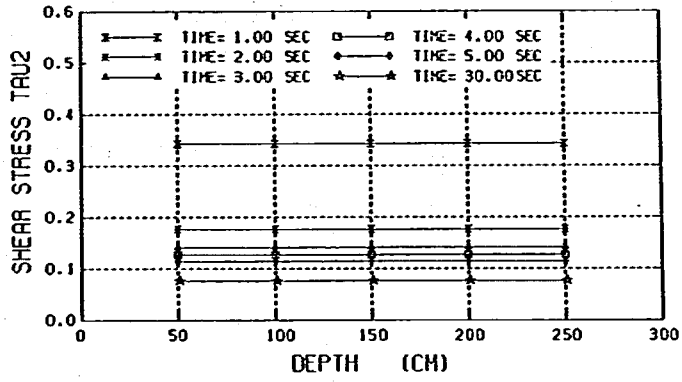
（ｅ）せん断応力振幅の深度分布



（ｆ）せん断応力比の深度分布

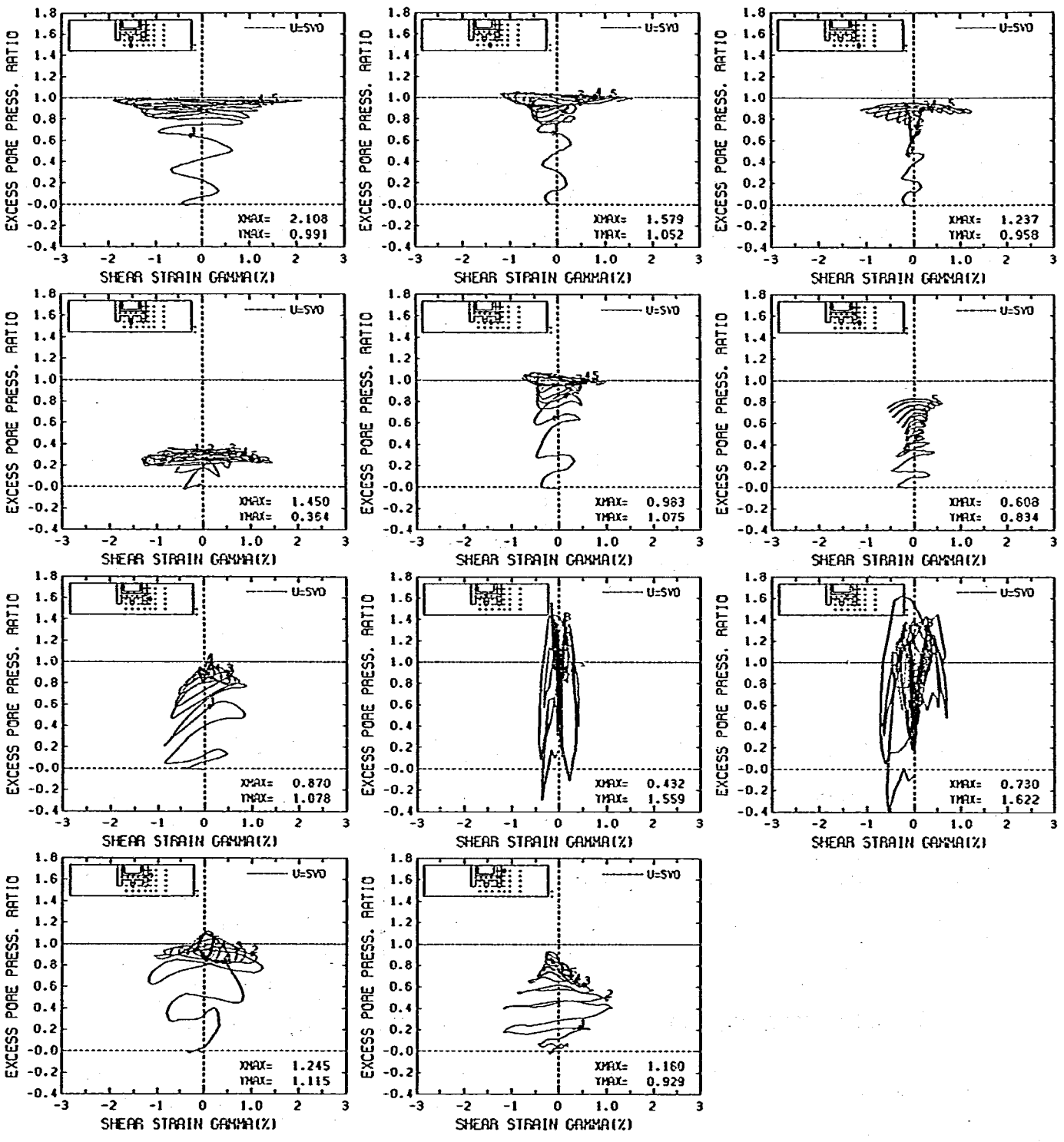


（ｇ）深度方向に直線近似した深度分布

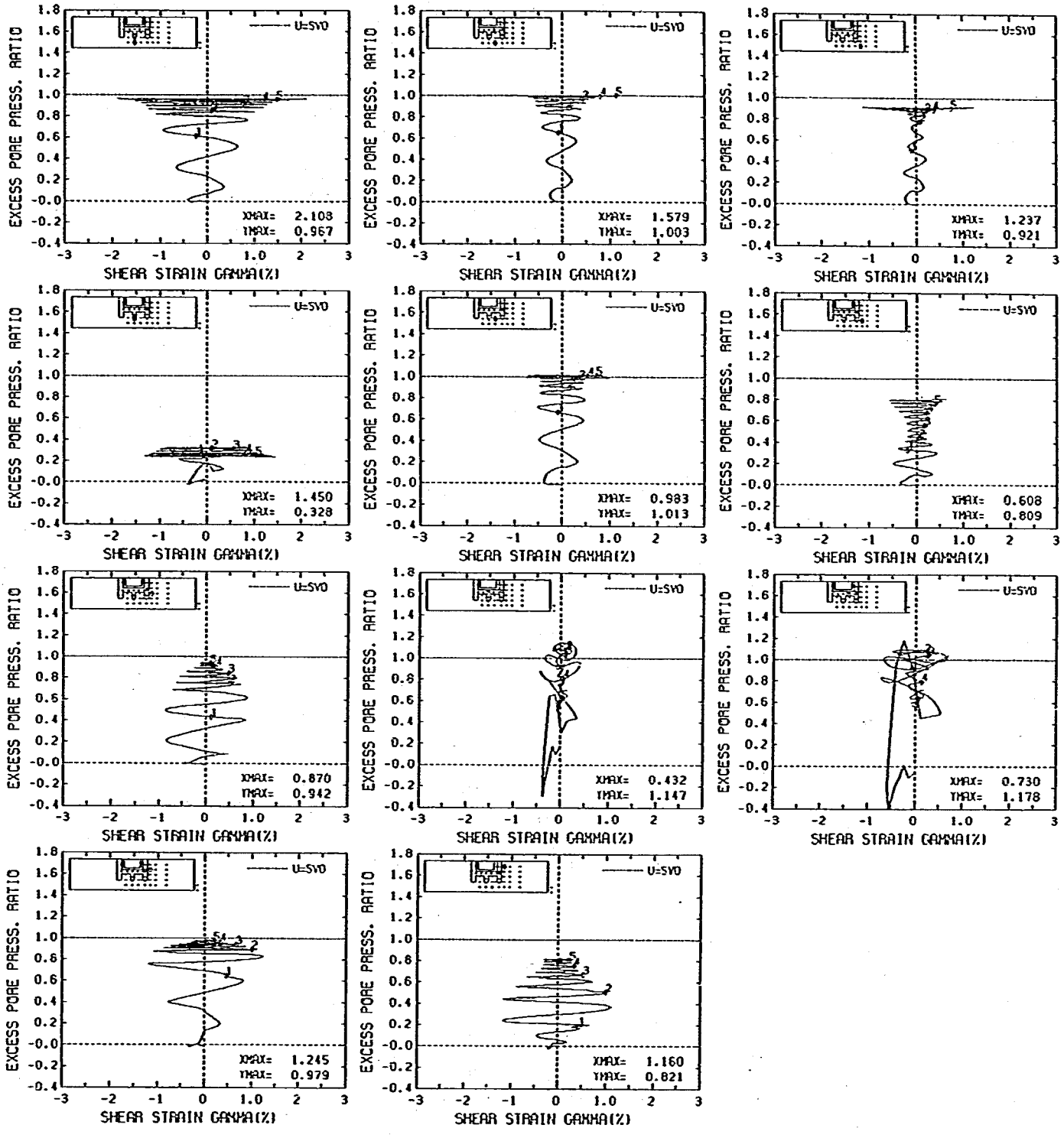


（ｈ）近似直線の勾配としてのせん断応力比

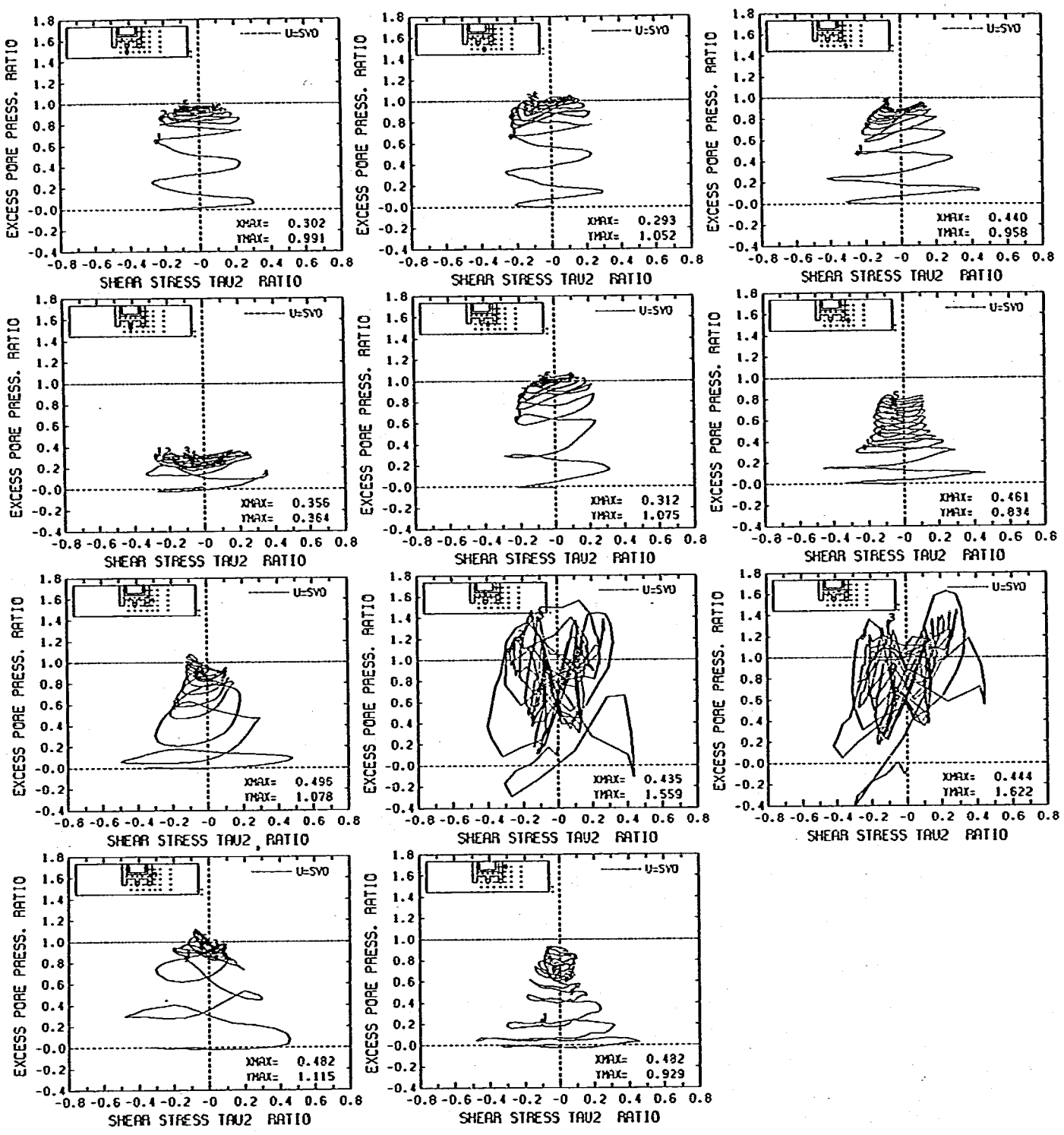
付図－10・14　せん断応力の整理結果（振幅調整後、模型－11）



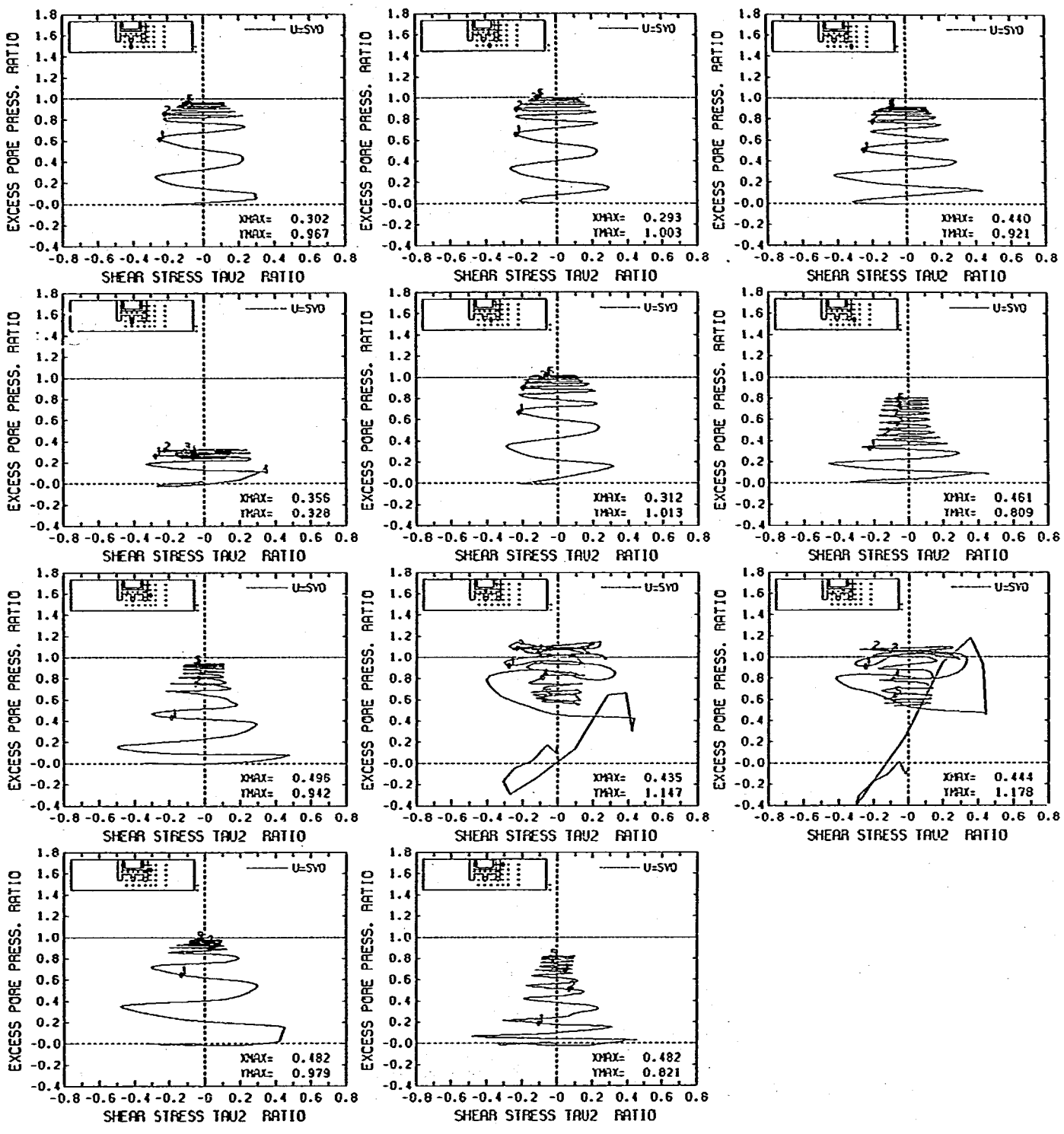
付図－10・15　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング前，模型－11）



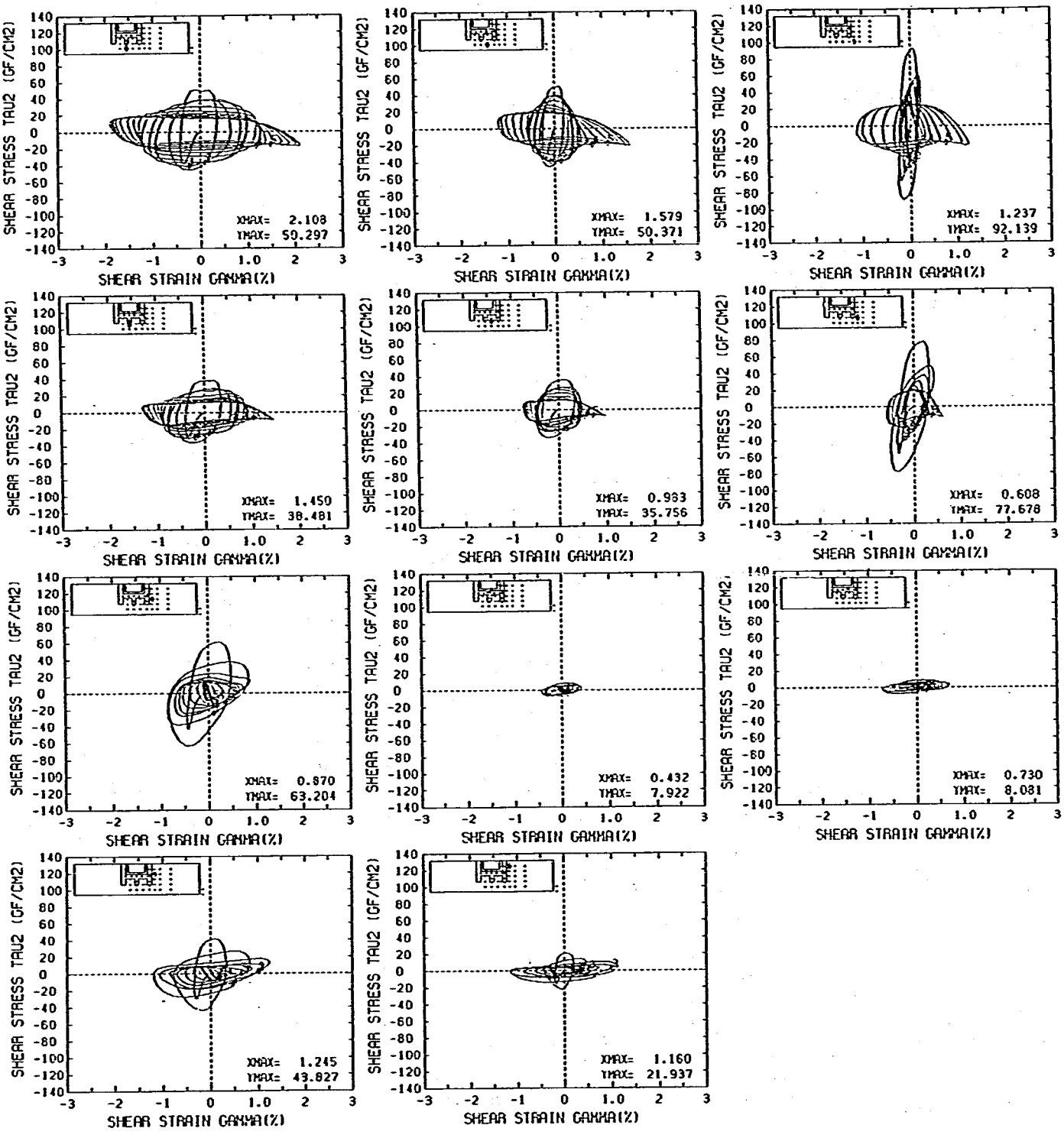
付図－10・16　せん断ひずみと過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－11）



付図－10・17　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング前、模型－11）



付図－10・18　せん断応力比と過剰間隙水圧比の関係（スムージング後、模型－11）



付図－10・19　加速度から求めたせん断応力とせん断ひずみの関係（模型－11）

II．磁気テープの保存形式

付属資料に掲載したデータは磁気テープに保存している。保存形式は「振動研究室フォーマット」に原則として合わせているが，INDEX についてはデータ整理の都合から変更している。以下にINDEX について説明する。

a．ICH　：収録データの種類

ICH=1　　加速度計の原記録（単位:gal）

ICH=2　　1波ごとに基線補正した後の加速度記録（単位:gal）

ICH=3　　直接数値積分による計算変位記録（単位:cm）

ICH=4　　間隙水圧計の原記録（単位:gf/cm^2）

ICH=5　　変位計の原記録（単位:mm）

ICH=6　　土圧計の原記録（単位:gf/cm^2）

ICH=7　　計算変位から求めたせん断ひずみ記録（単位:%）

ICH=8　　加速度から求めたせん断応力記録（振幅調整前，単位:gf/cm^2）

ICH=9　　加速度から求めたせん断応力記録（振幅調整後，単位:gf/cm^2）

ICH=10　　せん断ひずみから求めたせん断応力記録（単位:gf/cm^2）

ICH=11　　ICH= 7～10の計算点における間隙水圧記録（単位:gf/cm^2）

ICH=101　　ICH= 1に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=102　　ICH= 2に対する1波ごとのデータ（片振幅の絶対値の大きい方）

ICH=103　　ICH= 3に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=104　　ICH= 4に対する1波ごとのデータ（前後1波分の平均値）

ICH=105　　ICH= 5に対する1波ごとのデータ（前後1波分の平均値）

ICH=106　　ICH= 6に対する1波ごとのデータ（前後1波分の平均値）

ICH=107　　ICH= 7に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=108　　ICH= 8に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=109　　ICH= 9に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=110　　ICH=10に対する1波ごとのデータ（両振幅の1/2）

ICH=111　　ICH=11に対する1波ごとのデータ（前後1波分の平均値）

b．TITLE：収録データのタイトル

模型番号，測定点記号，データレコーダチャンネル番号が32文字以内の英数字で記録されている。

c．ND　：データ個数

模型－１～６（５Hz，60秒加振，サンプリング周波数100Hz）の場合

ICH=　1～ 11　ND=6500（ 65秒分）

ICH=101～111　ND= 324（324波分）

模型－７～11（２Hz，30秒加振，サンプリング周波数 50Hz）の場合

ICH=　1～ 11　ND=1750（ 35秒分）

ICH=101～111　ND=　69（ 69波分）

d．DM　：初期有効上載圧σ_{v0}'（gf/cm^2）

掘割道路模型がある場合はOsterbergの計算図表により地盤内応力を計算した。

e．IEQ　：測定点番号

測定点ごとに番号を振り，測定点の図示，コンター図作成時の要素構成節点番号とする。また，IEQ に負符号がついているものは欠測データとみなしたものである。

f．IDM1：データ整理のための識別コード

1000の位　模型番号　１～11

100の位　測定位置識別番号

０：浅間山砂地盤内の測定点

１：砕石ドレーン近傍（20cm以内）の砂地盤内の測定点

２：砕石ドレーン内の測定点

10の位　深度種別番号（深度ごとにデータを整理するときの識別番号）

１：地表面からの深さ　50cm　の測定点

２：地表面からの深さ 100cm　の測定点

３：地表面からの深さ 150cm　の測定点

４：地表面からの深さ 200cm　の測定点

５：地表面からの深さ 250cm　の測定点

1の位　鉛直測線番号（同一鉛直線上のデータの整理，図化に用いる）

左の鉛直測線から順に番号を振っている。

振動台実験における水平砂地盤の間隙水圧発生特性の検討

ISSN 0386－5878
土木研究所資料第2715号
平成元年2月(1989)
地震防災部振動研究室
佐々木　康・松本秀應
増井　仁・福岡浩明

要旨

本資料は，振動台実験で得られた加速度・間隙水圧データを分析し，間隙水圧の発生特性を検討した結果をとりまとめたものである。

検討の結果，加振時に地盤内に発生したひずみ（累積ひずみ）と発生した間隙水圧には密接な関係のあることが明らかとなった。

キーワード：液状化，振動台実験，間隙水圧，せん断ひずみ

○

郵便はがき

3 0 5 - □□

切手をはって下さい。

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

振動研究室御中

No. 198

No. 198

配布先氏名

配布先住所

○

○

土木研究所資料第2715号　　部

振動台実験における水平砂地盤の
間隙水圧発生特性の検討

上記のとおり受領しました。

所　属（住所）

氏　名　　㊞

土木研究所資料第2715号

○　振動台実験における水平砂地盤の

間隙水圧発生特性の検討