存　用

ＩＳＳＮ　0386－5878
土木研究所資料第3486号

土木研究所資料

管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験

平成9年2月

建設省土木研究所
耐震技術研究センター動土質研究室

Copyright © (1997) 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3486号1997年2月

管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験

耐震技術研究センター　動土質研究室　室　　長　松尾　修
主任研究員　古関　潤一*
研　究　員　佐々木哲也
研　究　員　近藤　浩市
研　究　員　林　　裕士**

要　旨

下水道管渠およびマンホールの地震時の挙動とその評価法を明らかにすることを目的として模型振動台実験を実施し、浮上がり安定性に及ぼす原地盤密度・埋戻し材料・基礎の形式等の影響について検討するとともに、浮上がり対策工としての砕石埋戻し・安定処理土による埋戻しの効果について検討した。さらに、浮上がり安定性評価手法としての浮上がり安全率の適用性について検討を行った。

キーワード：　液状化、管路施設、浮上がり、埋戻し、振動台、浮上がり安全率

*現　東京大学　生産技術研究所　助教授
**現　関東地方建設局　千葉国道工事事務所

目　次

1．序論 …… 1

1．1　研究の背景 …… 1

1．2　既往の研究 …… 2

2．研究目的および研究内容 …… 6

3．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その1） …… 7

3．1　実験目的 …… 7

3．2　実験模型 …… 7

3．3　実験方法 …… 11

3．3．1　模型作成 …… 11

3．3．2　加振および計測 …… 15

3．4　実験結果および考察 …… 18

3．4．1　管渠模型の場合 …… 18

3．4．2　管渠付きマンホール模型の場合 …… 34

3．4．3　全実験模型の変形状況 …… 41

3．4．4　浮上がり安全率の計算 …… 44

3．5　まとめ …… 55

4．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その2） …… 57

4．1　実験目的 …… 57

4．2　実験模型 …… 57

4．3　実験方法 …… 59

4．3．1　模型作成 …… 59

4．3．2　加振および計測 …… 62

4．4　実験結果および考察 …… 64

4．4．1　実験データの時刻歴 …… 65

4．4．2　管渠模型の浮上がり量 …… 81

4．4．3　地盤の過剰間隙水圧 …… 82

4．4．4　模型の変形状況 …… 83

4．4．5　浮上がり安全率 …… 90

4．5　まとめ …… 108

5．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その３） …… 109
5．1　実験目的 …… 109
5．2　実験模型 …… 109
5．3　実験方法 …… 110
5．3．1　模型作成 …… 110
5．3．2　加振および計測 …… 114
5．4　実験結果および考察 …… 114
5．4．1　実験データの時刻歴 …… 114
5．4．2　管渠模型の浮上がり量 …… 132
5．4．3　模型地盤の変形状況 …… 134
5．4．4　地盤の過剰間隙水圧 …… 142
5．4．5　浮上がり安全率 …… 146
5．5　まとめ …… 163

6．全体のまとめおよび今後の課題 …… 165
6．1　全体のまとめ …… 165
6．2　今後の課題 …… 166

〈参考文献〉 …… 168

表一覧

表3．1　実験条件 …… 8
表3．2　地盤材料の物理試験結果 …… 11
表3．3　加振条件 …… 15
表3．4　センサーの仕様 …… 15
表3．5　模型地盤作成結果 …… 18
表3．6　初期有効上載圧（管渠模型、マンホール模型） …… 30
表3．7　模型の浮上がり量（管渠模型） …… 32
表3．8　模型の浮上がり量（マンホール模型） …… 40
表3．9　浮上がり安全率計算結果 …… 49
表3．10　最終浮上がり量と浮上がり安全率 …… 54

表4．1　実験条件 …… 58
表4．2　地盤材料の物理試験結果 …… 59
表4．3　加振条件 …… 62
表4．4　センサーの仕様と出力特性 …… 64
表4．5　地盤作成結果 …… 64
表4．6　初期有効上載圧 …… 65
表4．7　模型の浮上がり量 …… 81
表4．8　浮上がり安全率計算結果 …… 91
表4．9　最終浮上がり量と浮上がり安全率 …… 107

表5．1　実験の概要 …… 109
表5．2　地盤材料物性値 …… 111
表5．3　計器の仕様 …… 112
表5．4　模型地盤作成結果一覧 …… 114
表5．5　加振条件 …… 114
表5．6　管渠の浮上がり量 …… 132
表5．7　間隙水圧計の埋設深度および有効上載圧 …… 143
表5．8　浮上がり安全率の計算表 …… 146
表5．9　最終浮上がり量と浮上がり安全率 …… 155

図一覧

図3．1　模型地盤概要図 …… 7
図3．2　管路模型概要 …… 9
図3．3　井桁基礎およびはしご胴木基礎概要 …… 10
図3．4　地盤材料の粒径加積曲線 …… 12
図3．5　土槽概要図 …… 12
図3．6　ビニールシート形状概要図 …… 14
図3．7　計測器の浮力調整および設置方法 …… 14
図3．8　計測器設置位置概要図 …… 16
図3．9　測定データの時刻歴 …… 19
図3．10　浮上がり量と加振加速度との関係 …… 33
図3．11　過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係 …… 34
図3．12　測定データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal） …… 35
図3．13　浮上がり量と加振加速度との関係 …… 40
図3．14　過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係 …… 41
図3．15　各模型の変形状況（400gal加振後） …… 42
図3．16　模型解体時の変形状況（マンホール模型：ケースA～C） …… 42
図3．17　地表面から30cmの深さでの状況（マンホール模型：ケースA～C） …… 43
図3．18　管渠模型に作用する力 …… 44
図3．19　管路下端に作用する力 …… 46
図3．20　管路半断面下の土塊に作用する力 …… 47
図3．21　浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化 …… 52
図3．22　浮上がり安全率と浮上がり量との関係 …… 53
図3．23　最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLo}との関係 …… 55

図4．1　模型地盤概要 …… 57
図4．2　管路・基礎模型概要図 …… 58
図4．3　十和田湖砂礫の粒径加積曲線 …… 59
図4．4　十和田市における下水道管渠の概要 …… 60
図4．5　十和田湖砂礫の非排水繰返し三軸試験結果 …… 60
図4．6　ゴムシート概要図 …… 61
図4．7　各模型の計器配置 …… 63
図4．8　測定データの時刻歴 …… 66
図4．9　浮上がり量と加振加速度との関係 …… 82

図4.10　管渠模型下端の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係 …… 83
図4.11　各加振ごとの模型の変形状況 …… 84
図4.12　土槽の中央部（土槽前面から34cmの位置）における状況図 …… 86
図4.13　地震時に管渠模型に作用する力 …… 90
図4.14　浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化 …… 100
図4.15　浮上がり安全率と浮上がり量との関係） …… 103
図4.16　最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLo}との関係 …… 107

図5.1　実験模型の概要 …… 110
図5.2　砕石の粒径加積曲線 …… 112
図5.3　計器の配置 …… 113
図5.4　測定データの時刻歴 …… 115
図5.5　最終浮上がり量（加振毎）と加振加速度の関係 …… 132
図5.6　最終浮上がり量（累積）と加振加速度の関係 …… 133
図5.7　管渠模型周辺の変形状況 …… 134
図5.8　模型解体時の管渠模型周辺の変形状況 …… 142
図5.9　過剰間隙水圧最大値と加振加速度の関係 …… 144
図5.10　浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化 …… 156
図5.11　浮上がり安全率と浮上がり量の関係 …… 160
図5.12　最終浮上がり量と最小浮上がり安全率の関係 …… 163
図5.13　最終浮上がり量と浮上がり始めた時点の浮上がり安全率の関係 …… 163

写真一覧

写真1.1　釧路沖地震で浮き上がったマンホール …… 1

写真3.1　実験土槽 …… 13
写真3.2　実験後の解体状況（ケースA） …… 44

写真4.1　土槽中央部における変形状況 …… 87

写真5.1　模型解体時の状況 …… 139

1．序論

1．1　研究の背景

地震時の地盤の液状化による被害として、下水道管路施設の管渠およびマンホールの浮上がりがある。この現象は、下水道管路施設はその構造上、原地盤の土の重量に比べ著しく軽い構造物であり、地震による繰返しせん断により周辺地盤に過剰間隙水圧が発生し、構造物に大きな揚圧力が作用することが原因となって生じる。事実、新潟地震、日本海中部地震、釧路沖地震、東方沖地震、三陸はるか沖地震等の過去の地震において、下水道管路施設に浮上がりによる被害が報告されており[1)・2)・3)・4)・5)・6)]、平成５年１月15日に発生した釧路沖地震においては、釧路町管内の汚水管のマンホールの一部が最大約1.5mも地上に突出した[2)・3)]（写真１．１）。

写真１．１　釧路沖地震で浮き上がったマンホール

平成5年の釧路沖地震後に行われた被害調査[3)]によると、浮き上がったマンホールの下方に大半が埋戻し土と考えられる砂の回り込みが観測されており、下水道管渠の被災の主たる要因は埋戻し土の液状化であると考えられている。また、浮き上がったマンホール周辺地盤の調査により、浮上がりの激しいところでは周辺地盤も液状化したことが推測され、原地盤部の比較的きれいな砂層がマンホールの浮上がりに影響を及ぼしている可能性が考えられている。しかし、これらの影響の程度は明らかにはされていない。

下水道管渠施設と同様の軽量地中構造物である共同溝の地震時浮上がりについては、「共同溝設計指針[7)]」で浮上がり安全率による照査を必要に応じて行うことが規定されている。一方、下水道管路施設の地震対策については、現行では「下水道施設地震対策指針と解説－1981年版－[8)]」に基づき行われているが、ここでは地震時の液状化による管路施設の浮上がりに対する検討は明確には規定されていない。

平成７年１月17日の兵庫県南部地震により下水道管路施設は多くの被害を受けたが[9)・10)]、それを教訓として下水道地震対策技術検討委員会は「下水道の地震対策についての最終提言[11)]」をまとめた。それによると、耐震設計に際しては従来対象としていた地震動（レベル１）に加え、直下型地震などによるより大きな地震動(レベル２)を考慮することとし、すべての新設管渠でレベル１対応を(従来は重要幹線管渠のみ)、重要な幹線等については新設・既設を問わずレベル２対応をする事が提言された。

上記のように下水道管路施設について大規模地震を考慮することとなると、液状化時の浮上がりについて対策を行う必要が生じる。液状化による管路施設の浮き上がり対策として考えられる各種工法の中で施工性、周辺環境への影響、および経済性を考慮した場合、現時点で適用性が高い工法として、以下のものがあげられる[3)]。

(1) 砕石による埋戻し

(2) 安定処理土による埋戻し

(3) 矢板による締め切り

しかし、下水道管路施設に対する上記の浮上がり対策工法の選定基準、各工法の効果および設計法については現時点では十分明らかにされていない。

本報は、模型振動台実験により、管路施設の浮上がり安定性に及ぼす原地盤の液状化強度・埋戻し材料・埋戻し深さ・管径等の影響について調べ、既存の浮上がり安定性評価手法としての浮上がり安全率[7)]の下水道管路施設への適用性について検討を行い、さらに、管路施設の浮上がり対策工としての砕石による埋戻し、および安定処理土による埋戻しの適用性について検討を行った結果についてとりまとめたものである。

なお、本報に述べた内容は、下水道事業調査費「下水道施設の液状化被害の予測および対策に関する調査」（平成６～８年度）の調査研究成果の一部である。

１．２　既往の研究

本研究に関連する下水道管路施設等の地中管路施設の地震時浮上がりに関する既往の研究については、文献12）にまとめられている。ここでは文献12）以降に行われた既往の研究のうち、主に実験的に検討されたものについて以下に示す。

(1) 田中ら[3)]の研究（1994）

釧路沖地震により浮き上がったマンホールに対し被災したマンホールの周辺の地盤調査を行った。調査は浮上がりの生じたマンホールの水準測量、マンホール周辺原地盤および埋戻し部の標準貫入試験、それにより採取される試料の粒度試験、および復旧工事時の開削調査を行った。その結果、埋戻し部の液状化により浮上がりが生じたこと、浮き上がったマンホールの直下に埋戻し部の砂が回り込んでいることを確認した。また、被害の著しい箇所においては、周辺原地盤部の液状化、およびマンホール上方に１m程度以上の泥炭層の存在を確認し、周辺原地盤部の液状化とマンホール上方の透水性の低い泥炭層が浮上がり量に影響していることを明らかにしている。さらに、原地盤部のN値等に基づき、浮き上がったマンホールに対し共同溝設計指針[7)]で設定されている浮上がり安全率Fsを水平震度ks＝0.25として求め、その結

果マンホールの突出量に関わらず浮上がり安全率Fsは1.0以下となることを示した。

(2) 古賀ら[12]の研究（1988）

半地下構造物である掘割道路を対象として、掘割道路直下の液状化しやすい層の層厚が浮上がり特性に及ぼす影響、および浮上がり対策として掘割道路側方地盤の締固め効果を模型振動台実験により検討を行った。実験は、長さ250cm、高さ60cm、奥行き68cmの剛な土槽に、幅30cm、高さ25cm、奥行き68cmの掘割道路模型を埋設した模型に対し行われた。その結果、液状化砂層厚が大きいほど砂の回り込みが起こりやすくなり、掘割道路の浮上がり量が大きくなること、掘割道路側方の地盤を締め固めた場合、ある加振レベルまでは砂の回り込みを防ぐため浮上がりを押さえる効果があり、加振レベルをあげると締固め部の変形が生じて浮き上がるが、その量は無対策よりも小さくなることを示した。また、掘割道路模型の重量を小さくしてゆく静的な浮上がり実験を行い、その結果、静的な浮上がり実験では、砂の回り込みを伴わない浮上がりが生じることを示した。これらの結果より、掘割道路の周辺地盤が一様に液状化した場合には、地盤の変形を伴う掘割道路の浮上がりが加振中から加振終了後にかけて比較的急速に生じ、地盤の変形を伴わない浮上がりが加振終了後にゆっくりと生じると推測した。

(3) 古関ら[13),14),15)]の研究（1994～1995）

共同溝を対象に地盤の相対密度を変化させた振動台実験、および遠心模型実験により検討を行った。模型振動台実験は、共同溝周辺地盤の液状化強度の深度方向の分布が変化した場合の共同溝の地震時浮上がり特性を明らかにするために、共同溝の周辺地盤の密度を変えた3種類の模型に対し行った。土槽は長さ400cm、高さ200cm、奥行き100cmの剛な箱形土槽で、共同溝模型は幅60cm、奥行き97cm、高さ30cmのアクリル製の箱である。その結果、共同溝下部の地盤密度の高い方が共同溝下部地盤密度の低いモデルより、浮上がり量が小さくなること、共同溝模型上方の砂地盤は共同溝模型とともに浮き上がり、側方の地盤は共同溝模型直下に回り込み沈下すること、共同溝設計指針[7]で設定されている浮上がり安全率が1.0程度で浮き上がりが生じることを示した。遠心模型実験は、縮尺1／50の模型として、長さ80cm、高さ20cm、奥行き20cmの剛な土槽に、幅10cm、高さ7cmの共同溝模型を埋設した模型、および振動台実験の縮尺1／20模型に対し行われた。その結果、遠心模型実験おいても共同溝の浮上がりは生じ、上記の振動台実験をモデルとした遠心実験では、共同溝模型の挙動はある程度定量的にも振動台実験の結果と一致するが、加振後の過剰間隙水圧の消散は遠心力実験の方が早い結果となることを示した。

(4) 安田ら[16),17),18),19)]の研究（1994～1995）

埋設管渠およびマンホールに対し模型振動台実験により検討を行った。埋設管渠を対象として、浮上がりに挙動に及ぼす、地盤密度、埋設管の比重、埋設管の管径の影響を模型振動台実験により調べた。実験は幅1.0m、奥行0.6m、高さ0.7m、の土槽で、地盤は豊浦砂で作成した。その結果、地盤密度が低く、埋設管の比重が大きく、管径が大きいほど浮上がり量は小さくなることを示した。また、埋設管渠およびマンホールを対象として、模型地盤に埋戻し部を設け、浮上がりに及ぼす埋戻し部の影響について、埋戻し部の深さ、埋戻し部の幅を変えて模型振動台実験により検討を行った。実験は、原地盤の相対密度Dr＝90％、埋戻し部の相対密度Dr＝30％で行われた。その結果、埋戻し部が深いほど、また埋戻し部の幅が広いほど、浮上がり速さ、および浮上がり量が大きいことを示した。さらに、埋戻し部周囲にビニール

を敷き埋戻し部と埋戻し部周辺地盤を不透水とし、周辺地盤への透水性の影響について検討し、周囲への過剰間隙水圧の消散がしにくいほど浮上がり量が増すことを示した。また彼らは、模型振動台実験により砂層のガラス面に貼り付けたうどんの動きをビデオ撮影することにより、地中構造物が浮き上がる際の、周辺地盤の液状化砂の動きを観察した。その結果、地中構造物の浮上がりに際して、周辺地盤の液状化砂が構造物底部に回り込んでいることを確認し、管径が大きいほど、浮上がりに伴う液状化砂の回り込みに時間を要するため浮上がり速度が遅くなることを示した。また、マンホール模型においては、浮上がりに伴う液状化砂の回り込みの影響範囲が狭くなることを確認し、これはマンホール上部の砂が回り込む必要がないことによると考えている。さらに、埋設管渠の浮上がり対策として砂の回り込みを阻止すればよいと考え、埋設管に羽根を取り付けた場合、および周辺地盤に矢板を敷設した場合の効果を振動台実験で検討した。その結果、羽根を埋設管の縦に取り付けた場合、および横に取り付けた場合のいずれも、羽根を長くするほど浮上がり対策として効果があること、縦羽根より横羽根の方が周辺地盤の回り込みにくくなることから浮上がり対策として効果があることを示した。矢板による締め切りでは、矢板の敷設間隔が狭くなるほど管路上部の砂の回り込みが起こりにくくなるため浮上がり量が小さくなること、矢板の剛性と浮上がり量には顕著な差は見られず、従って周辺地盤から伝播する過剰間隙水圧のみでは浮上がり現象は発生しにくいことを示した。

(5) 永瀬ら[20]の研究（1996）

液状化砂の埋設管渠底部への回り込みを阻止すればよいと考え、周辺地盤として透水性のない泥炭地における埋戻し土を想定して、ジオテキスタイルを用いた工法の浮上がりに対する有効性を振動台実験により検討した。その結果、敷設するジオテキスタイルの目が細かく、曲げ剛性が大きいほど、埋設管渠は浮き上がりにくくなること、浮上がりの対策効果を高めるためには、敷設幅は埋設管の設置に伴う掘削の幅よりも大きくし、その両端を周辺地盤に密着させる必要があることを明らかにした。

(6) 平野ら[21]・[22]・[23]の研究（1995）

遠心模型実験により水平飽和砂地盤に管渠模型を埋設したモデルに対し検討を行った。実験は、長さ60cm、高さ30cm、奥行き25cmのせん断土槽に、管渠模型φ35mmの塩ビ管および継ぎ手部を有したアクリル管を埋設した模型で、遠心加速度40Gで行われた。その結果、水平地盤、管渠埋設地盤とも、液状化の発生とともに地盤の応答加速度は減少し、その程度は地表に向かうに従って大きくなることを示した。また、過剰間隙水圧に関しては、水平地盤において過剰間隙水圧比はほぼ1となるのに対し、管渠模型を埋設したモデルでは浅い位置においては1以下となることを示した。また、同様の遠心模型実験により、振動特性に及ぼす地盤の相対密度の影響および埋設管の設置深さの違いによる管渠周辺地盤の動的挙動の変化について検討を行った。その結果、地盤の相対密度によらず有効応力比は1近くまで上昇し、その時、応答加速度は減少すること、地盤の相対密度が70％以上では埋設管の浮上がりは見られないことを示した。さらに、埋設管の液状化対策工法の一つとして、粗粒材（平均粒径D_{50}＝2.6mm）を用いた埋戻しについて検討を行った。その結果、埋戻し部が排水層として周辺地盤の間隙水圧の上昇を抑えることにより、粗粒材による埋戻しが浮上がり対策として効果のあること、有効応力比が0.8以上になると、液状化地盤で見られるような応答加速度の急速な減少が起こることを示した。

(7) 西尾[24]の研究（1994）

マンホールに作用する、地震時に発生する過剰間隙水圧を考慮した浮力、マンホールの自重、および非液状化層のせん断抵抗力の釣り合い条件にもとづき、マンホールが浮き上がる条件について考察を行った。その結果、浮上がりを生じ得る条件は非常に限られたものであり、マンホールに対する地盤の拘束力を確保する程度の対策で、浮上がりは十分防ぐことができると考えた。

(8) 吉見ら[25),26),27)]の研究（1991～1996）

地中構造物の液状化時の浮上がり対策としての止水壁による締め切りの効果について振動台実験により検討を行った。実験は地中構造物周辺に礫層と止水壁を設けた場合と、地中構造物の周辺に止水壁のみを設けた場合の比較を行った。その結果、止水壁に排水層として礫層を設けた場合には礫の回り込みが若干生じたが、止水壁を用いたいずれの場合も浮上がり抑制効果を十分期待できることを明らかにした。また、止水壁を用いた浮き上がり対策の設計法に関して、静的な力の釣り合いによる２つの簡易的な手法について検討した。その結果、止水壁を地中構造物に固定とし、かつ止水壁は完全に柔らかいと仮定した場合は、構造物底面に作用する揚圧力および止水壁に生じる張力の上限を与え、他方、構造物と止水壁の境界の摩擦は無いものと仮定した場合、止水壁に生じる曲げ応力および構造物の浮上がり量の上限を与えることを示した。

以上、既往の研究により明らかになったことをまとめると以下のとおりである。

(1) 浮上がりに伴い周辺の液状化した砂の回り込みが生じる。

(2) 浮上がりの主な原因は埋戻し土の液状化である。

(3) 周辺地盤の液状化が浮き上がり量に影響している可能性がある。

(4) 砕石等の粗骨材による埋戻し、矢板・ジオテキスタイル等による砂の回り込みの防止により浮き上がりを防ぐことができる。

(5) 浮上がり安全率などの評価手法により浮き上がり安定性の有無を判断することができる。

しかし、上記の結果は十分明らかになったものではなく、以下の点に関して検討の余地を残している。

(1) 浮上がり安定性に及ぼす埋戻し材料、埋戻し深さ、幅などの影響

(2) 浮上がり安定性に及ぼす周辺地盤の液状化強度の影響

(3) 浮上がり対策工の選定基準と具体的な設計法の確立

(4) 浮上がり安定性評価手法に関し、異なる地盤条件による評価法の適用性、および変形量を考慮した評価手法の確立

2．研究目的および研究内容

本研究の目的は、以下のとおりである。

(1) 液状化時の管路施設の浮上がり安定性に及ぼす原地盤の液状化強度・埋戻し材料・管径・埋戻し深さ等の違いが浮き上がり安定性に及ぼす影響を明らかにする。

(2) 管路施設の浮上がり安定性評価手法としての浮上がり安全率の適用性のを明らかにする。

(3) 管路施設の浮上がり対策工として砕石埋戻し・安定処理土による埋戻しの適用性を明らかにする。

これらの目的のもとに、平成6年度～平成8年度の3年間、管路施設の浮上がりに関する模型振動台実験を行い、以下に示す検討を行った。

(1) 管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その1）

管路およびマンホールについて原地盤が液状化しやすい場合としにくい場合について、埋戻し材料・管径・基礎の形式等の違いが管路の浮上がりメカニズムに及ぼす影響について調べるとともに、浮上がり対策工法としての砕石埋戻し・安定処理土による埋戻しの効果について検討した。

(2) 管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その2）

管路について原地盤が液状化しやすい場合としにくい場合について、管渠下の基礎の有無・埋戻し深さの違いが浮上がりメカニズムに及ぼす影響について調べるとともに、平成6年三陸はるか沖地震により被災した管渠を参考に、埋戻し部上部を十和田湖砂礫により埋め戻した場合について検討した。

(3) 管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その3）

管路を対象に、浮上がり対策工としての砕石埋戻しの効果に及ぼす原地盤密度・砕石埋戻しの位置の影響について検討した。

3．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その１）

3．1　実験目的

埋設された管路について原地盤の密度が低く液状化しやすい場合と密で液状化しにくい場合について、埋戻し材料・管径・基礎等の違いが管路の浮上がりメカニズムに及ぼす影響について調べた。

3．2　実験模型

実験には、図３．１に示す４つの模型地盤を用いて、合計11ケースの模型について行った。各ケースの実験条件を表３．１にまとめて示す。実験は管渠模型とマンホール模型を対象として行い、管渠の大きさは標

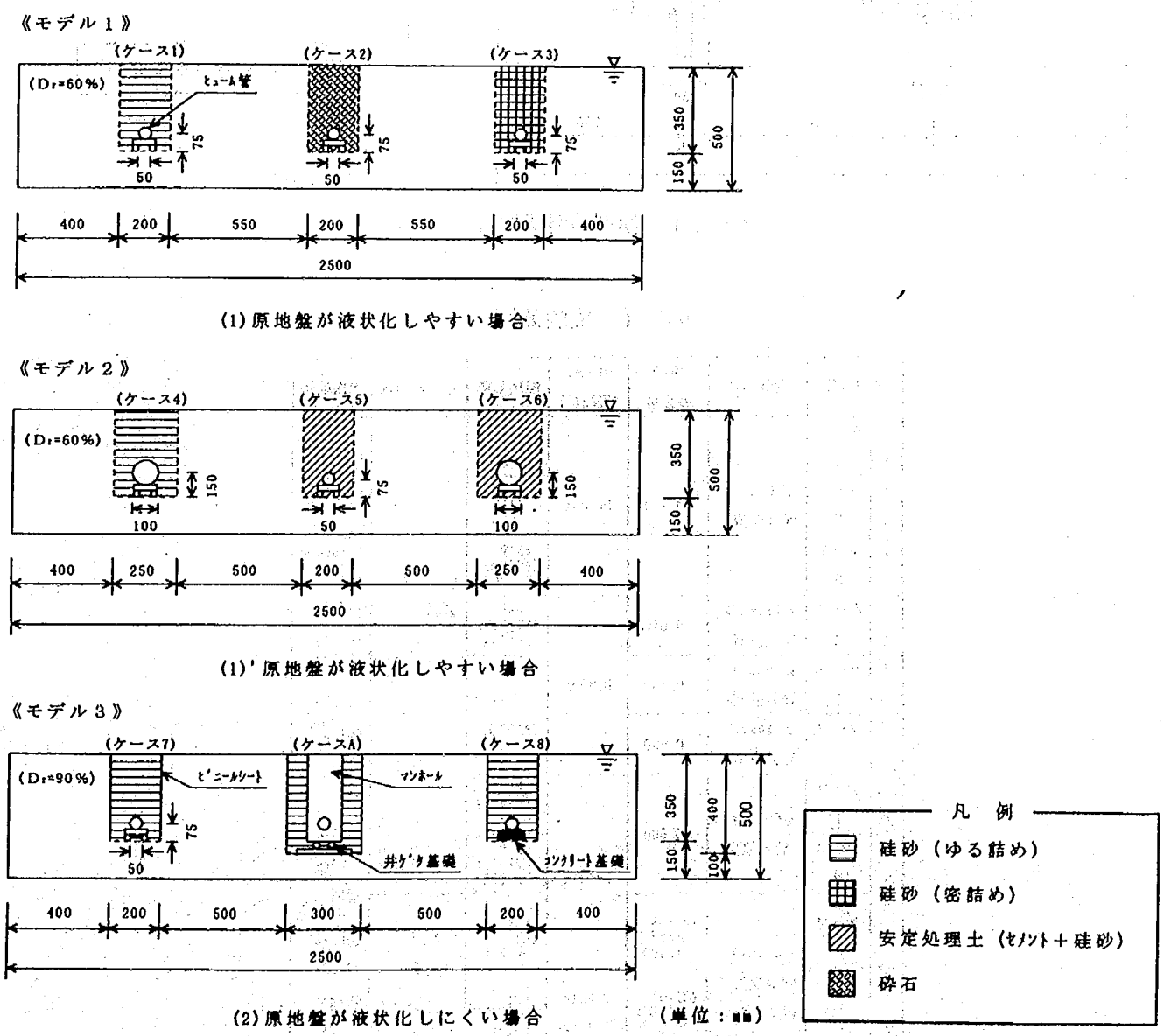


図３．１　模型地盤概要図(1)

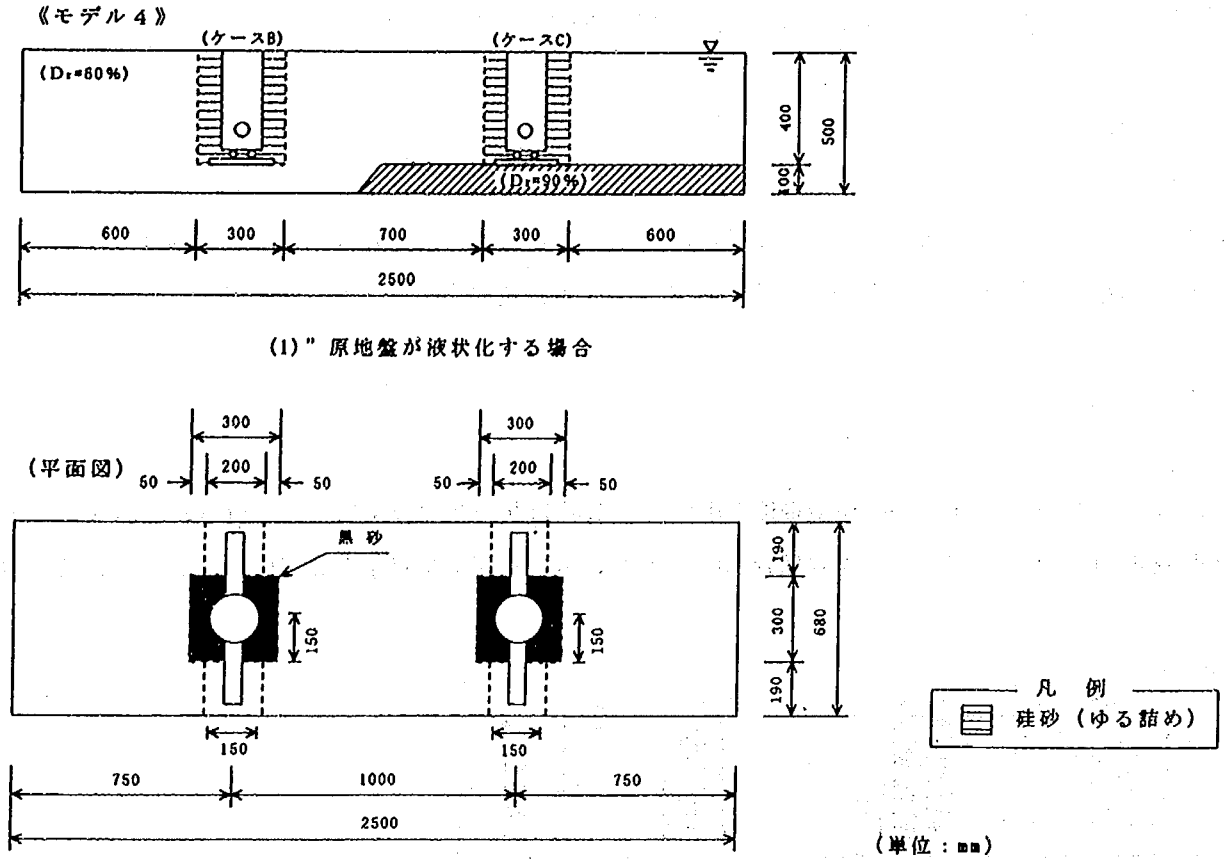


図３．１　模型地盤概要図(2)

表３．１　実験条件

模型番号		模型形状	模型の比重	原地盤（豊浦砂）	埋戻し部	基礎の種類	加振条件
モデル1	ケース1	φ60mmの管渠模型	0.750	Dr=60%	硅砂（緩詰め）Dr=35%	はしご胴木基礎	正弦波 5Hz 20波 加振加速度 103, 124 144, 163 186, 207 259, 307 398, 505 gal
	ケース2				砕石		
	ケース3				硅砂（密詰め）Dr=90%		
モデル2	ケース4	φ114mmの管渠模型	0.650	Dr=59%	硅砂（緩詰め）Dr=34%		
	ケース5	φ60mmの管渠模型	0.750		安定処理土		
	ケース6	φ114mmの管渠模型	0.650				
モデル3	ケース7	φ60mmの管渠模型	0.600	Dr=91%	硅砂（緩詰め）Dr=32%		正弦波 5Hz 20波 加振加速度 166, 212 262, 310 407gal (407galのみ100波)
	ケース8				硅砂（緩詰め）Dr=35%	コンクリート基礎	
	ケースA	φ60mmの管渠模型付φ165mmのマンホール模型	(マンホール模型) 1.100		硅砂（緩詰め）Dr=29%	マンホール部 井桁基礎 管渠部 はしご胴木基礎	
モデル4	ケースB		(管渠模型) 0.600	Dr=61% ケースCはマンホール下のみ（密詰め）Dr=92%	硅砂（緩詰め）Dr=31%		
	ケースC		平均 (1.029)		硅砂（緩詰め）Dr=32%		

準で、埋戻し部材や埋戻し密度を変えた実験（ケース1，2，3，5）、管渠の大きさを大きくして、埋戻し部材を変えた実験（ケース4，6）、原地盤の密度を大きくして、管渠下の基礎を変えた実験（ケース7，8）、マンホール模型を用いた実験（ケースA，B，C）を行った。また、実験に用いた管路模型の概要を図3．2に、基礎の概要を図3．3に示す。管渠模型はφ60mmと114mmの2種類の塩ビ管を、マンホール模型はφ165mmの塩ビ管の下部にφ60mmの塩ビ管をつなぎ合わせた模型を用いている。コンクリート基礎は管渠模型に接着させた。井桁基礎およびはしご胴木は松材で作成し、模型作成時には基礎部分を砕石で作成した後に井桁基礎・はしご胴木を乗せ、この上に管渠・マンホール模型を設置した（砕石、井桁基礎・はしご胴木、管渠・マンホール模型は、それぞれ独立している。）。模型の埋戻し幅は、実際の施工時における掘削幅を参考にして決めており、φ60mm管渠の場合は20cm、φ114mmの管渠の場合25cm、φ165mmのマンホール模型の場合30cmとした。

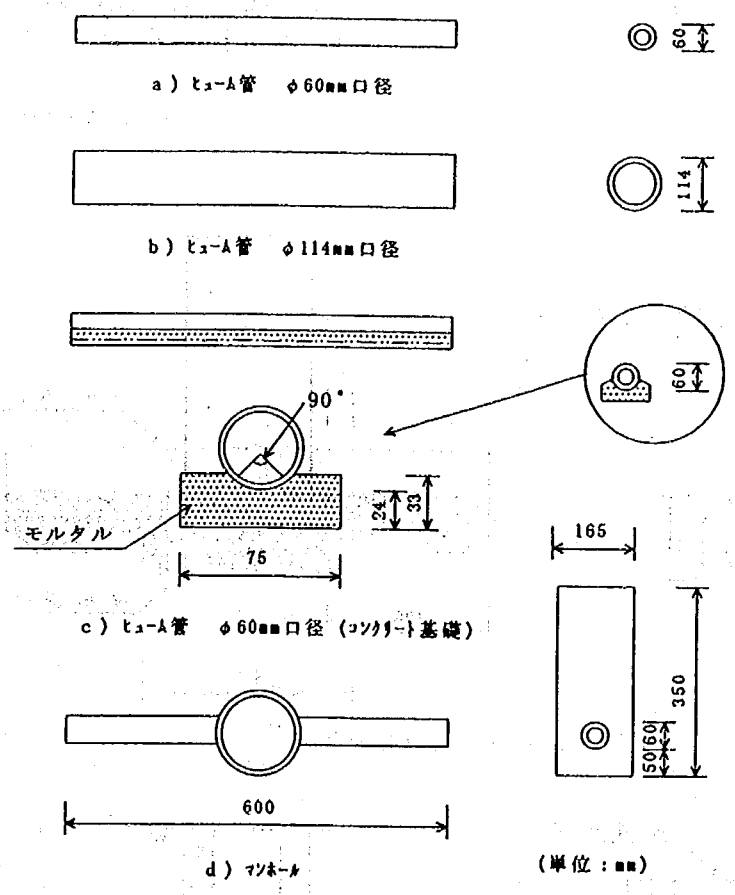
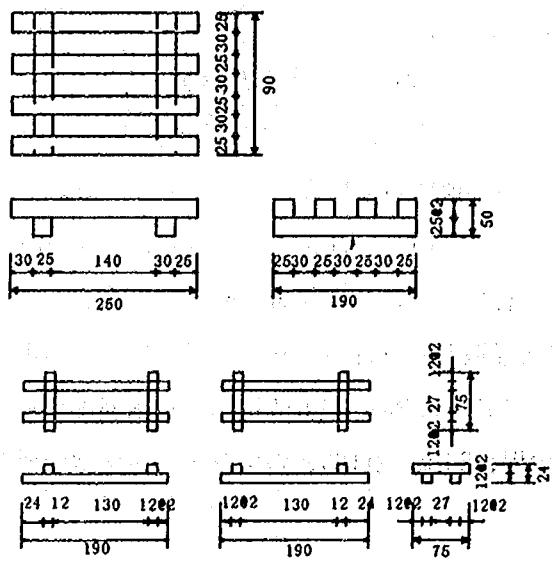
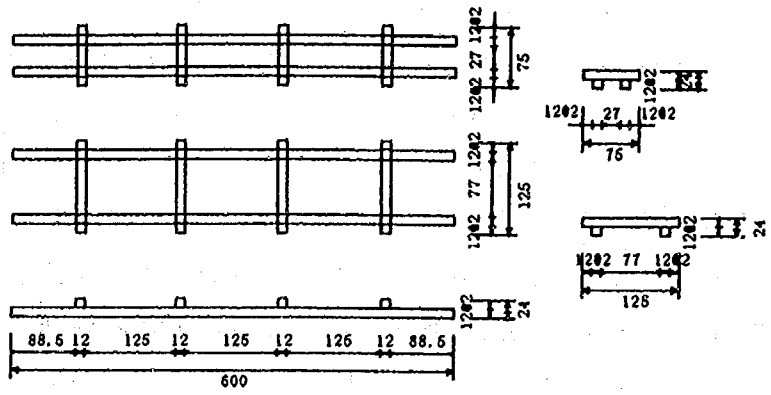


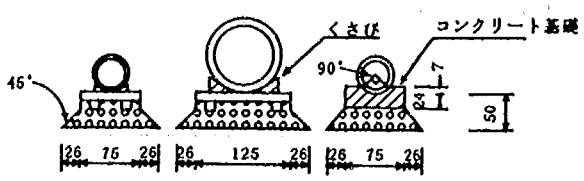
図3．2　管路模型概要



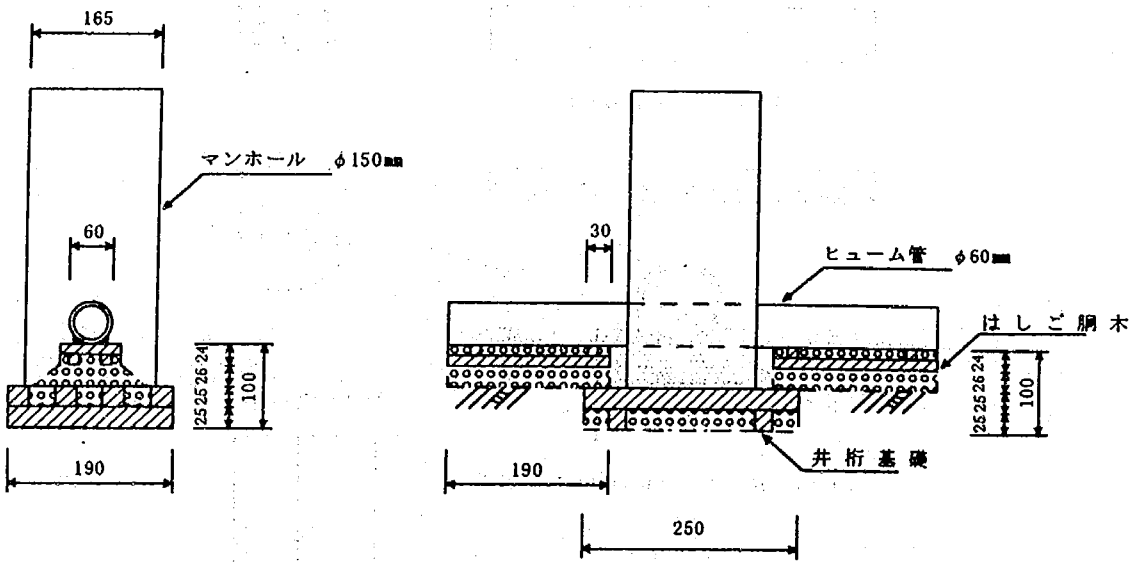
a）井桁基礎とはしご胴木



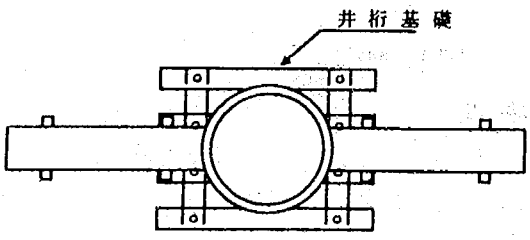
b）はしご胴木



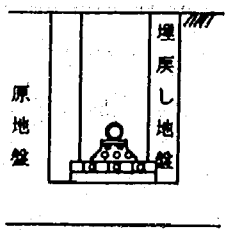
c）ヒューム管基礎断面



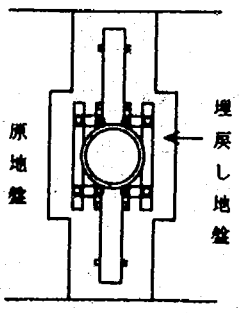
d）マンホール模型基礎断面図



e）マンホール模型基礎平面図



① 土槽断面図



② 土槽平面図

（単位：㎜）

図3．3　井桁基礎およびはしご胴木基礎概要

3．3　実験方法

3．3．1　模型作成

実験に用いた地盤材料（原地盤：豊浦砂、埋戻し部分：７号硅砂、砕石（６号、７号））の物理試験結果を表３．２に、粒径加積曲線を図３．４にそれぞれ示す。

表３．２　地盤材料の物理試験結果

試験項目			豊浦砂	７号硅砂	６号砕石	７号砕石
粒度試験	中礫分	(%)			0.00	0.00
	砂礫分	(%)	0.00		93.80	18.22
	粗砂分	(%)	0.30	0.00	0.00	3.23
	細砂分	(%)	99.60	96.01		
	シルト分	(%)	0.10	3.99		
	最大粒径	(mm)	0.85	0.425	19.00	9.50
	均等係数	Uc	1.80	1.53	1.62	1.73
	曲率係数	Uc'	1.08	0.85	0.92	0.94
砂の最大・最小密度	最大密度 ρ_{dmax}	(g/cm³)	1.657	1.614		
	最小密度 ρ_{dmin}	(g/cm³)	1.358	1.226		
土粒子の密度 ρ_s		(g/cm³)	2.640	2.613		
備考			混合砕石（重量比６号：７号＝１：４）の比重 D_b*＝2.741			

※D_bは、JIS A 1110「粗骨材の比重および吸水率試験方法」により求めた絶対乾燥状態の比重

模型の作成方法は以下のとおりである。

(1)　４ｍ×４ｍの大きさの振動台テーブル（建設省土木研究所内のダム耐震実験施設にある振動台[1,2]）上に、長さ250cm、高さ60cm、奥行68cmの鋼な箱形の土槽を２つ設置した。土槽概要を図３．５、写真３．１に示す。

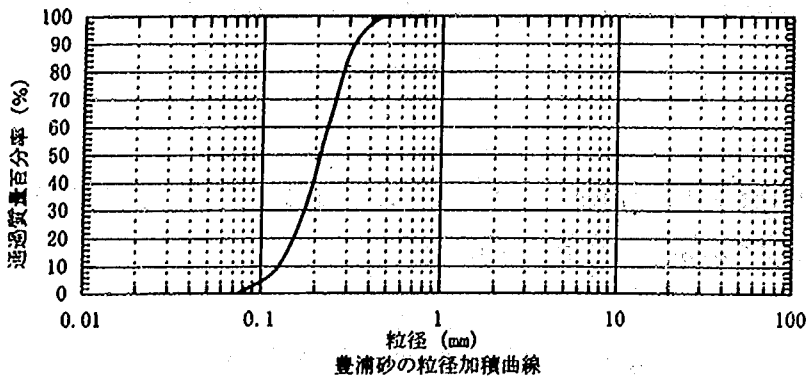
・原地盤部が液状化しやすい場合（モデル１，２，４）

(2)　原地盤については、サンドホッパーを用いて気乾状態の豊浦砂を空中落下させ、Dr＝60％程度の地盤を作成した。(地盤の密度は、あらかじめ密度検定をした結果から、ホッパーのスリット開口幅：5.7mm、落下高さ：104cm、移動速度：25cm／secで砂まきを行った。)

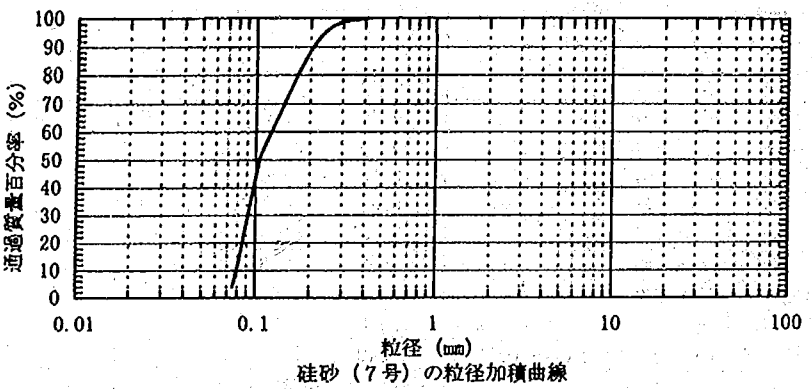
モデル４(ケースC)については、あらかじめ基礎地盤層厚10cmをバイブレータで締め固めた後にホッパーで原地盤部を作成した。

モデル１，２では15cm原地盤部を作成したところで砕石・はしご胴木を用いて管渠基礎部分を作成し、モデル４ではケースB側10cmの原地盤部を作成したところで、砕石・井桁基礎を用いて基礎部分を作成したあと、原地盤と埋戻し部分とを分けるための仕切り板（67cm×45cm、厚さ３mmの鉄板）を設置した。

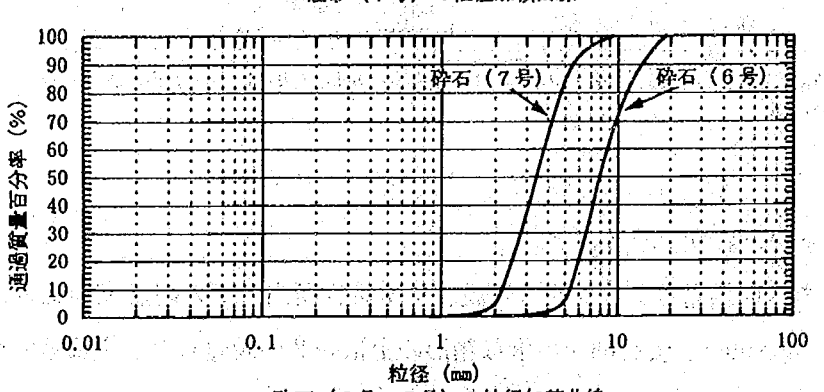
(3)　仕切り板設置後に、モデル１，２では原地盤部と埋戻し部を５cmづつ作成したところで、管渠模型を設置した。モデル４では原地盤部を10cm，埋戻し部５cm分の層厚を作成したところでマンホール模型の管渠部分における基礎（砕石とはしご胴木を用いている）を作成し、マンホール模型を設置した。模型



豊浦砂の粒径加積曲線



硅砂（7号）の粒径加積曲線



砕石（6号，7号）の粒径加積曲線

図3．4　基盤材料の粒径加積曲線

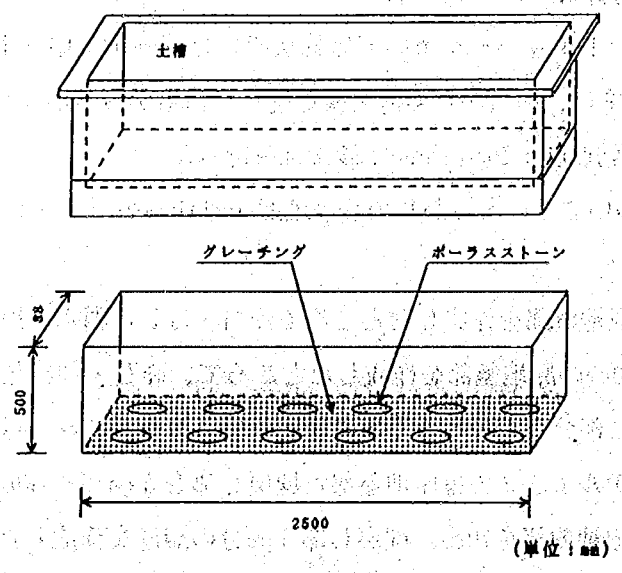


図3．5　土槽概要図

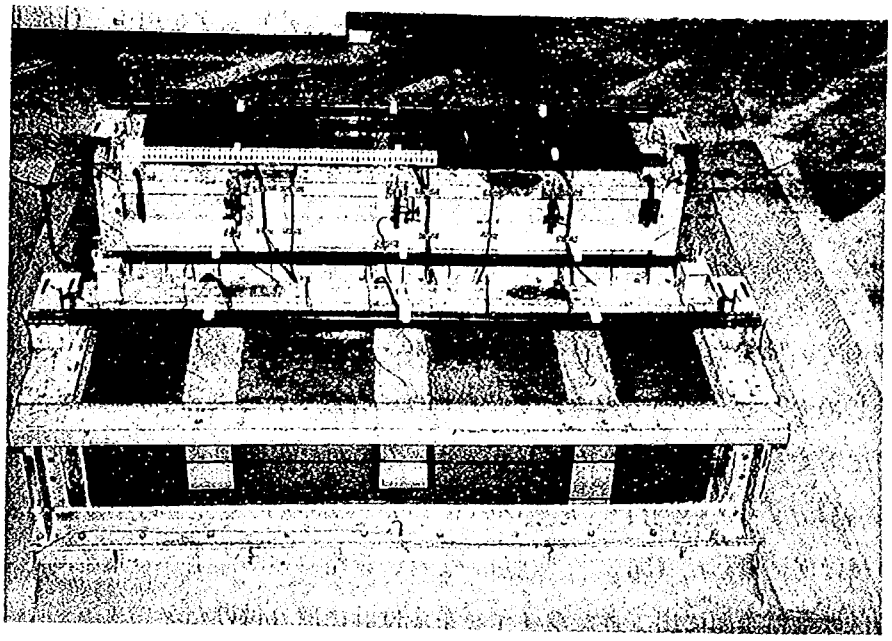


写真３．１　実験土槽

は、表３．１に示す見かけの単位体積重量になるように、鉛散弾を用いて重量調整を行った。土槽の側面摩擦の影響を取り除くために、模型（長さ60cm）を側面にふれないように設置した。埋戻し部に用いた硅砂・砕石・安定処理土は、投入後の埋戻し部の体積と投入量を計測しつつ密度管理をし、密詰めのケース（ケース３）では必要に応じて締め固めた。なお、硅砂は７号硅砂を、砕石部は７号砕石と６号砕石を４：１、安定処理土は硅砂と超微粒子セメントを１：0.03の重量比で配合したものを用いている。

(4) この後、原地盤と埋戻し部を交互に作成してゆき、完成後に地盤にあまり影響を与えないように、静かに仕切り板を引き抜き地表面の仕上げを行った。

(5) 土槽側面は透明なアクリル板となっているので、この面を通して変形状況を記録するために、アクリル板に接する原地盤・埋戻し部に染色砂を用いて底面から10、30cmの位置に水平メッシュを、埋戻し部の側面には鉛直のメッシュを描いた。染色砂は、原地盤部は豊浦砂，埋戻し部は硅砂に墨汁をまぶして炉乾燥させて作成した。

・原地盤部が液状化しにくい場合（モデル３）

(2) あらかじめ土槽に仕切り板を設置し、土槽内に水を高さ20cm入れ、原地盤部に相対密度90％で層厚が10cmに相当する量の豊浦砂をホッパーで投入し、その後振動台の加振による締固めを行った。締固め加振力は、実際の実験における最大加速度よりも大きな加速度で行った。所定の高さまで締固めた後に、アクリル面側にメッシュを描いた。

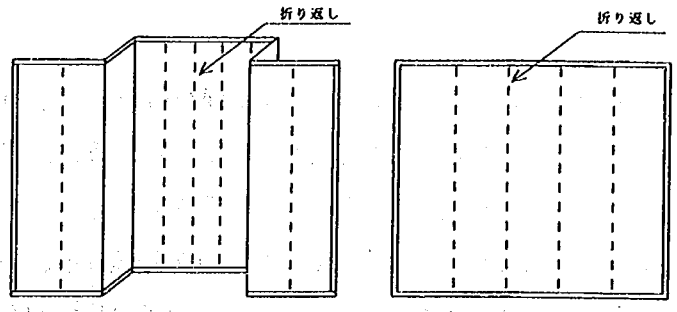
(3) 水中の落下高さが20cmになるように水位を調整しながら、豊浦砂の投入・振動台の加振を繰り返す。完成後、地盤中の水を抜き水締めを行った。

(4) 水締め後、鉄筋を用いて埋戻し部と原地盤部の境界に穴をあけて縦メッシュを作成した。仕切り板を撤去し、埋戻し部脇に加振時の過剰間隙水圧の伝播を防ぐためのビニールシート（図３．６参照）を設

置した。その後、ケースAのマンホール模型用の基礎を砕石と井桁基礎を用いて作成した後に、ケース7，8，Aの埋戻し部分を5cm作成し管渠模型用の基礎を砕石とはしご胴木を用いて作成した。基礎を作成後、管渠・マンホール模型をそれぞれ設置し、その後埋戻し部を作成した。埋戻し部の作成方法は、モデル1，2，4と同様の方法を行った。

・全モデル共通

(6) (2)～(5)の手順中で、地盤中の所定の位置に加速度計・間隙水圧計を埋設した。(原地盤が密なモデル3では、あらかじめセンサーを糸で固定してから地盤の作成を行った。) 地盤が液状化したときにこれらのセンサーが沈下することを防ぐために、センサーのまわりに発泡スチロールをつけて見かけの比重を1.9gf／cm³に調整した。加速度計は、加振中のセンサーの向きの変化を最小限に抑えるためにアクリル板を2枚はり付けて使用した（図3．7参照)。また、管路模型の浮上がり量を測定するために模型上部にワイヤーを付け地盤表面に出てきたワイヤーを変位計に取り付けた。



マンホール模型の場合（ケースAで使用）　管渠模型の場合（ケース7，8で使用）

図3．6　ビニールシート形状概要図

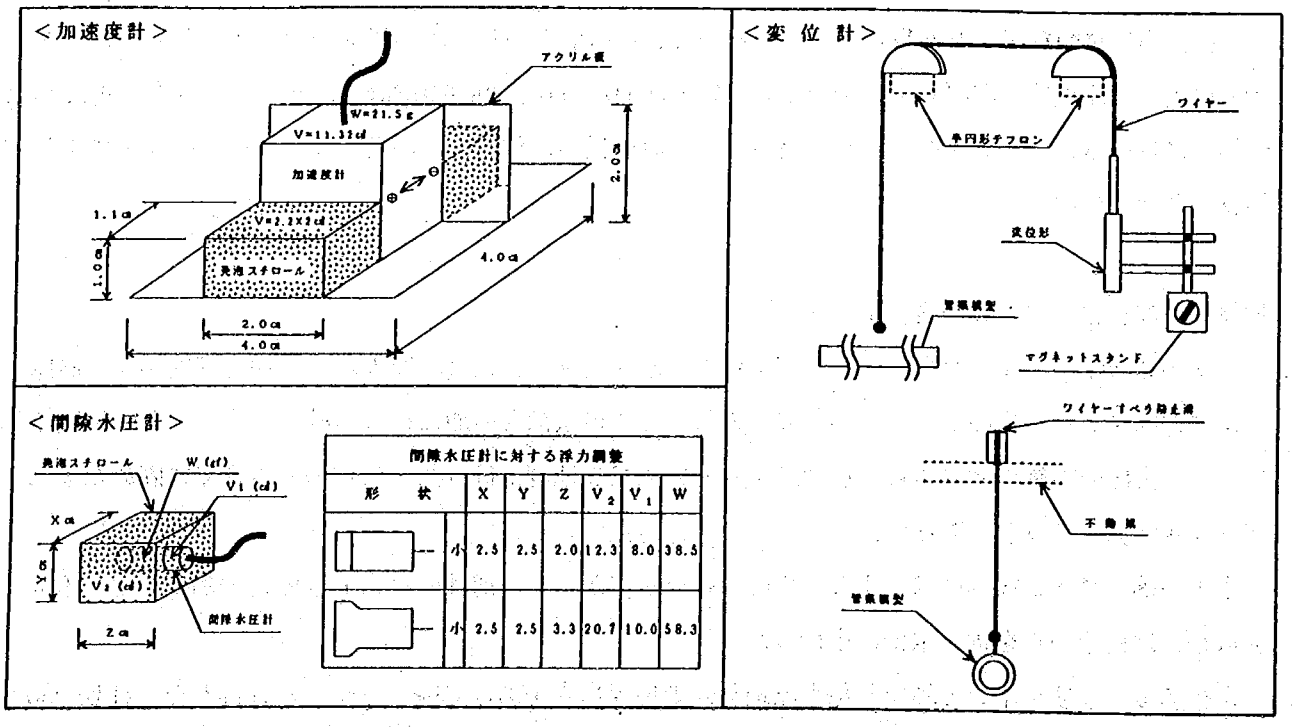


図3．7　計測器の浮力調整および設置方法

(7) 土槽底部から二酸化炭素を注入し、模型地盤内の空気と置換した。地盤表面に二酸化炭素が上がってくるまで、約3時間注入を続けた。

(8) 土槽底部から脱気水を注入し、模型地盤を飽和させた。飽和時間は、水位が地盤の表面と一致するまでゆっくりと行った（約3時間)。埋戻し部分に安定処理土を用いたケースでは、飽和後に3日間養生させてから実験を行った。なお、マンホールの基礎に使用した井桁基礎及びはしご胴木については、地盤作成前に水に浸けて真空ポンプで脱気し、完全飽和状態にして実験に用いている。

3．3．2　加振および計測

各実験における加振条件を表3．3に示す。加振は5 Hzの正弦波を入力波として、ステップ加振を行った。モデル3・4では、ステップ加振の影響を少なくするためにステップ数を減らし、さらに最終加振では、100波（20秒）の加振を行った。加振実験中の計測は64chのデジタルデータレコーダを用いて、加振直前から過剰間隙水圧が消散するまで行った。収録されたデータは、実験後に大型計算機を用いて図化処理を行った。また、各加振後に地盤表面高さを測定するとともに、側面のアクリル板を通して変形状況を記録した。

各模型地盤の計器配置は図3．8に示すとおりで、原地盤と管渠・マンホール模型の加速度、原地盤と埋戻し部の間隙水圧、管渠・マンホール模型の下端に生じる過剰間隙水圧（ただし、ケース5，6のみ埋戻し部直下)、管渠・マンホール模型の浮上がり量等を計測するために加速度計，間隙水圧計，変位計を用いている。また、使用したセンサーの仕様を表3．4に示す。

表3．3　加振条件

項目 / モデルNo.	ステップNo.	目標加速度 (gal)	加振周波数 (Hz)	入力波形	加振時間 (秒)
1・2	1	100	5 Hz	正弦波	4
	2	120			
	3	140			
	4	160			
	5	180			
	6	200			
	7	250			
	8	300			
	9	400			
	10	500			
3・4	1	150			
	2	200			
	3	250			
	4	300			
	5	400			20

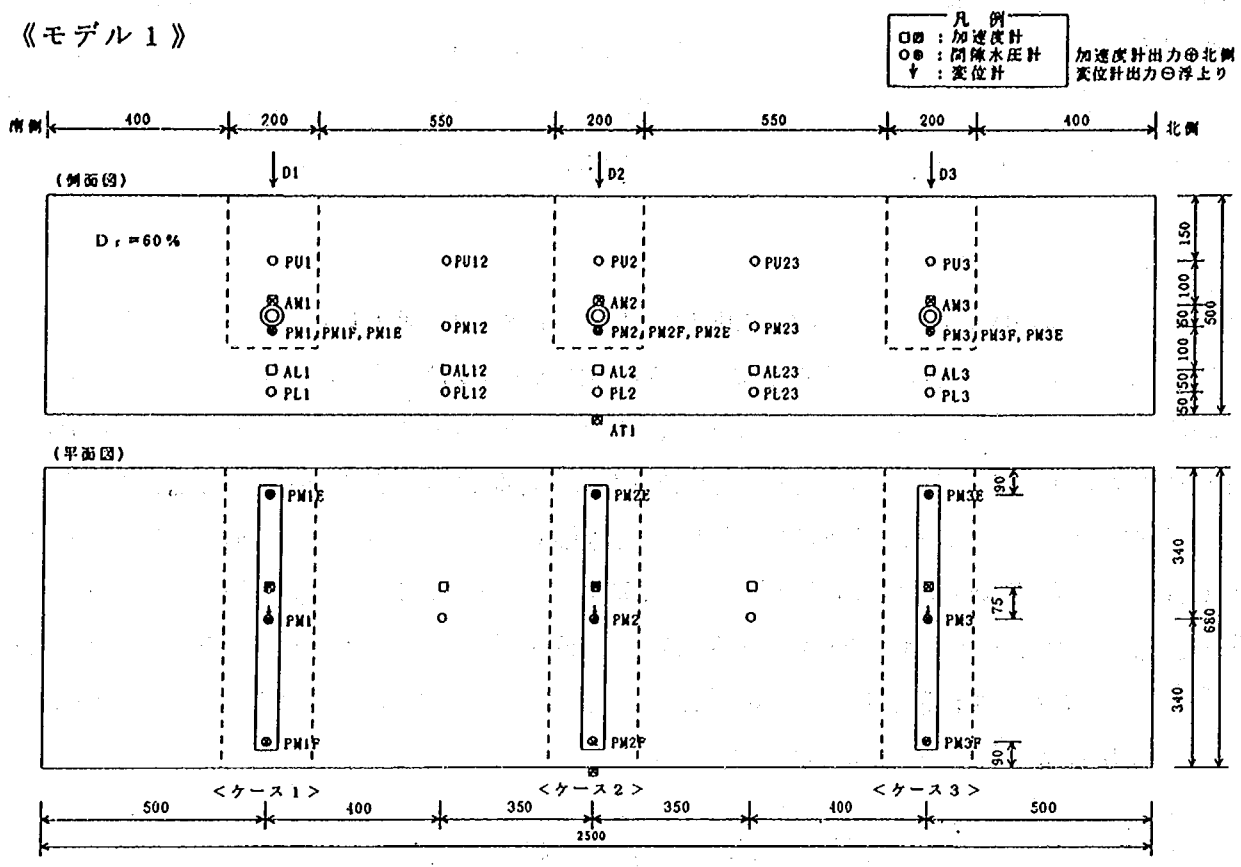
表3．4　センサーの仕様

計器名	記号	設置位置	時刻歴の符号	仕様
加速度計	AT-＊	振動台	図3.7の北向き＋	共和電業　AS-2GA 容量：2G
	AM-＊	管渠・マンホール模型		
	AL-＊	原地盤部		
間隙水圧計	PU-＊	埋戻し部上部（150mm）	増加＋	・管渠模型直下（ケース5,6,8は除く） SSK 容量：0.1～0.5kgf/cm²
	PM-＊	管渠・マンホール模型直下		
	PL-＊	原地盤部（埋戻し直下450mm）		
	PU-＊＊	原地盤部（150mm）		・その他 共和電業 容量：0.5～1kgf/cm²
	PM-＊＊	原地盤部（300mm）		
	PL-＊＊	原地盤部（450mm）		
変位計	D-＊	管渠・マンホール模型	浮上がり－	共和電業　50mm, 30mm

加速度計は全て水平方向に設置した。記号の中の＊には、センサー番号が入る。

実験終了後には地盤内を掘削して、模型の浮上がり状況やそれに伴う周辺地盤の変形状況を目視にて観察・スケッチした。

《モデル１》



《モデル２》

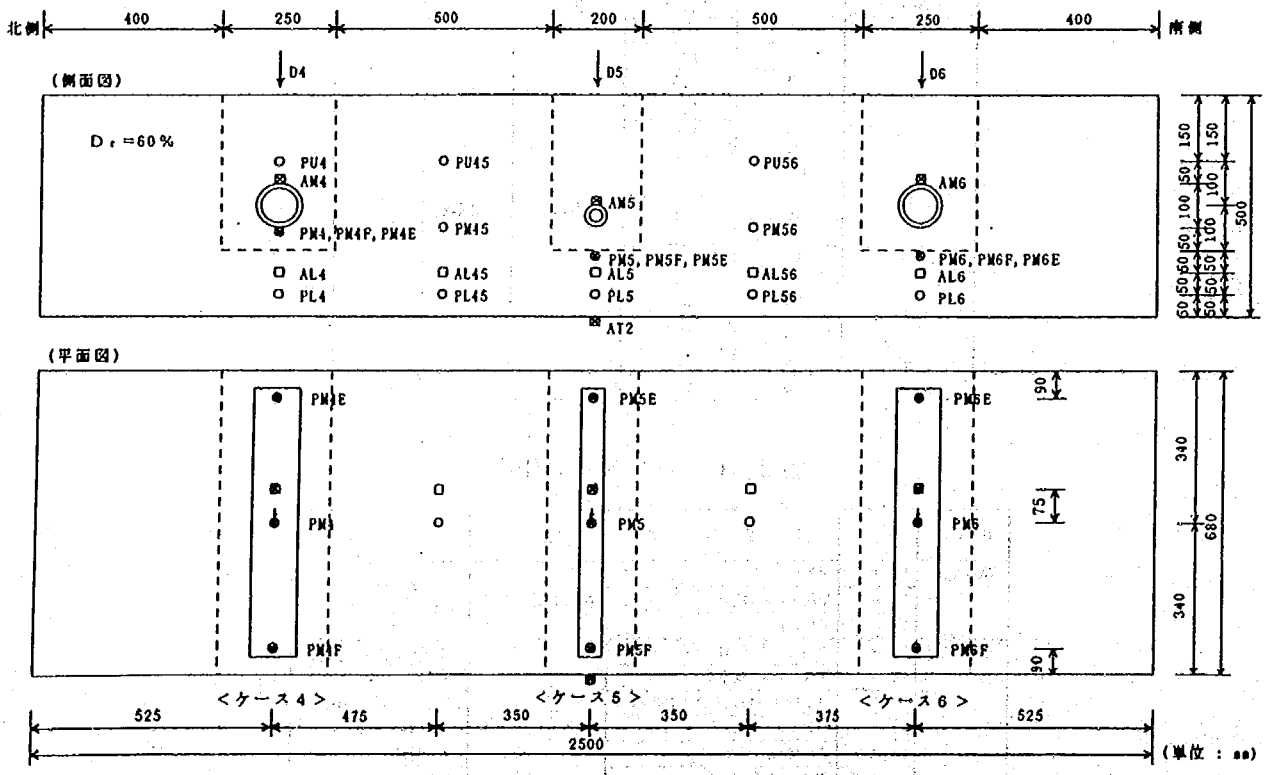
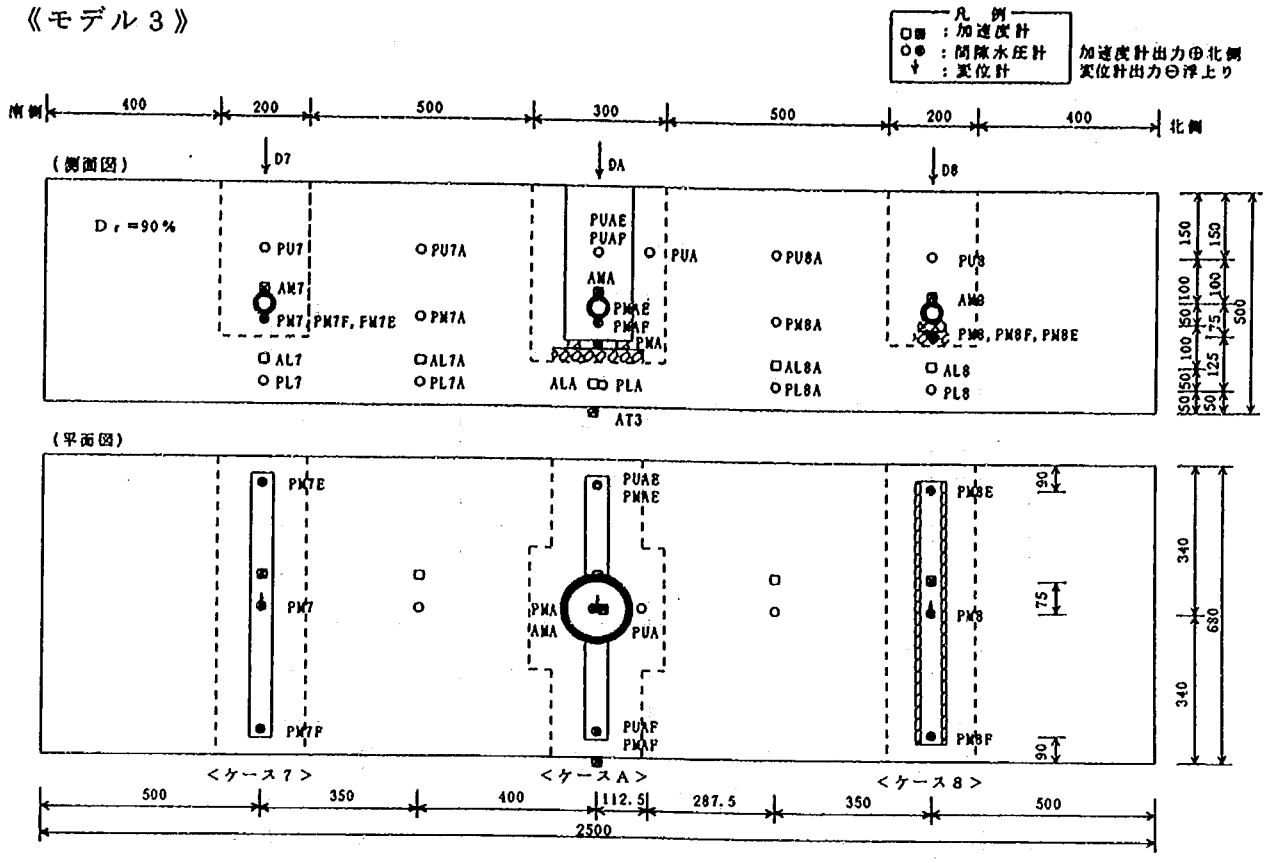


図３．８　計測器設置位置概要図（モデル１、２）

《モデル３》



《モデル４》

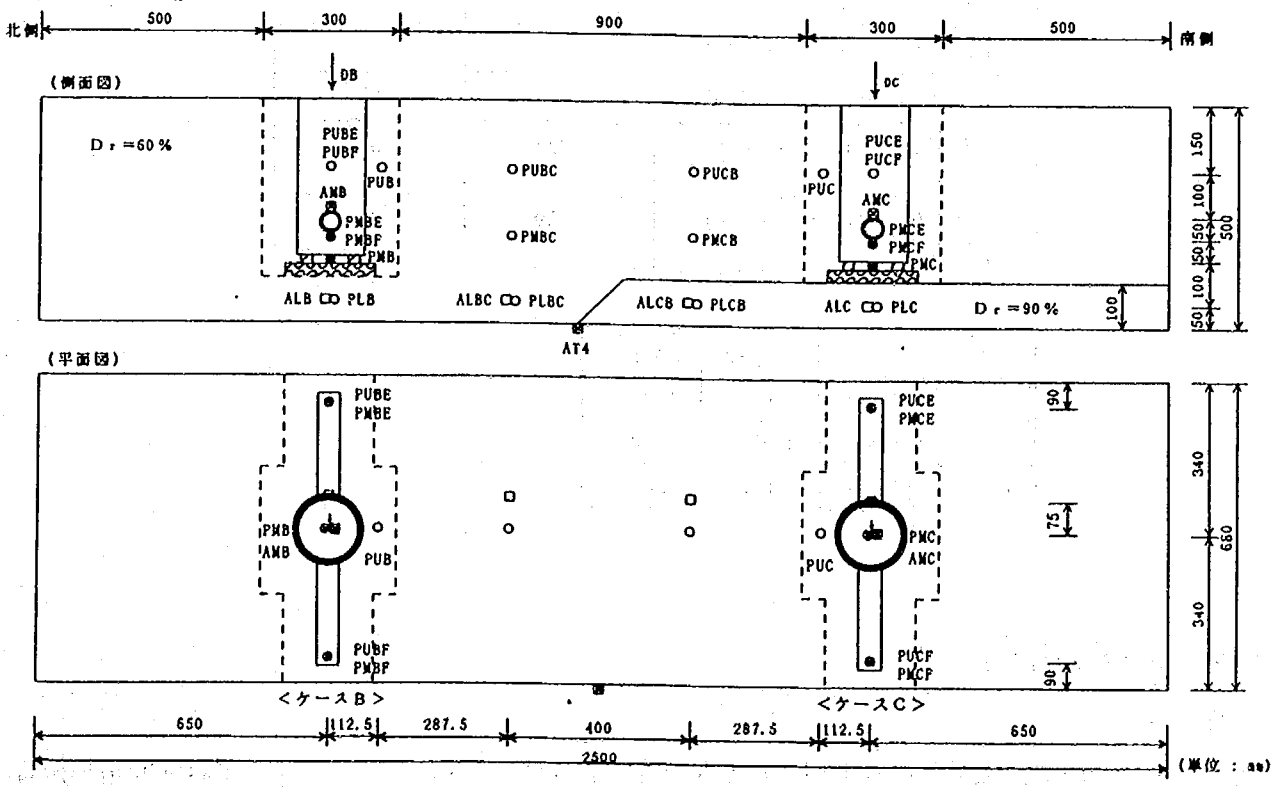


図３．８　計測器設置位置概要図（モデル３、４）

3．4　実験結果および考察

模型地盤の作成結果を表3．5に示す。原地盤部では液状化しやすい場合は平均Dr＝60％、液状化しにくい場合はDr＝91％、埋戻し部の硅砂緩詰めの場合では平均Dr＝32.6％であることから、各ケースについてほぼ同じような地盤を作成することができた。

表3．5　模型地盤作成結果

項目			乾燥密度 (g/cm³)	相対密度 (%)
モデル1	原地盤	（豊浦砂）	1.523	60
	埋戻し地盤	ケース1（硅砂・緩）	1.340	35
		ケース2（砕石）	1.596	—
		ケース3（硅砂・密）	1.562	90
モデル2	原地盤	（豊浦砂）	1.519	59
	埋戻し地盤	ケース4（硅砂・緩）	1.334	34
		ケース5（安定処理土）	1.434	60
		ケース6（安定処理土）	1.475	70
モデル3	原地盤	（豊浦砂）	1.625	91
	埋戻し地盤	ケース7（硅砂・緩）	1.327	32
		ケース8（硅砂・緩）	1.340	35
		ケースA（硅砂・緩）	1.319	29
モデル4	原地盤	（豊浦砂）	1.525	61
	埋戻し地盤	ケースB（硅砂・緩）	1.324	31
		ケースC（硅砂・緩）	1.329	32

項目	豊浦砂	7号硅砂
ρ_{dmax} (g/cm³)	1.657	1.614
ρ_{dmin} (g/cm³)	1.358	1.226
ρ_s (g/cm³)	2.640	2.613

3．4．1　管渠模型の場合

(1)　時刻歴

各ケースについて、模型が浮き上がったときの時刻歴（ケース1，2，3，7，8は400gal加振時、ケース4，5，6は180gal加振時）を代表として図3．9(1)～(3)に示す。また、各間隙水圧計の設置位置における初期有効上載圧を表3．6に示す。

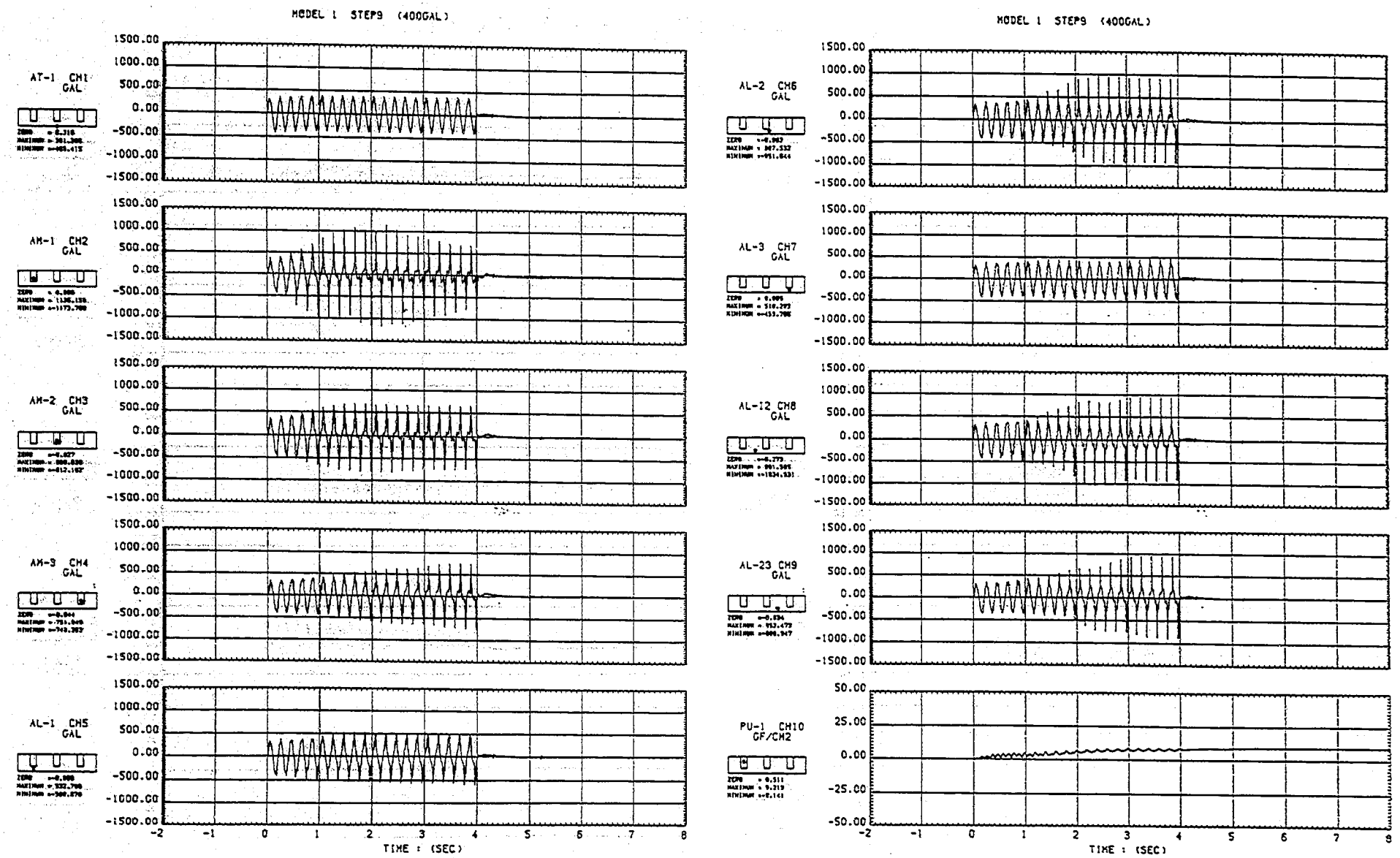


図3.9(1) 測定データの時刻歴（ケース1、2、3：400gal）

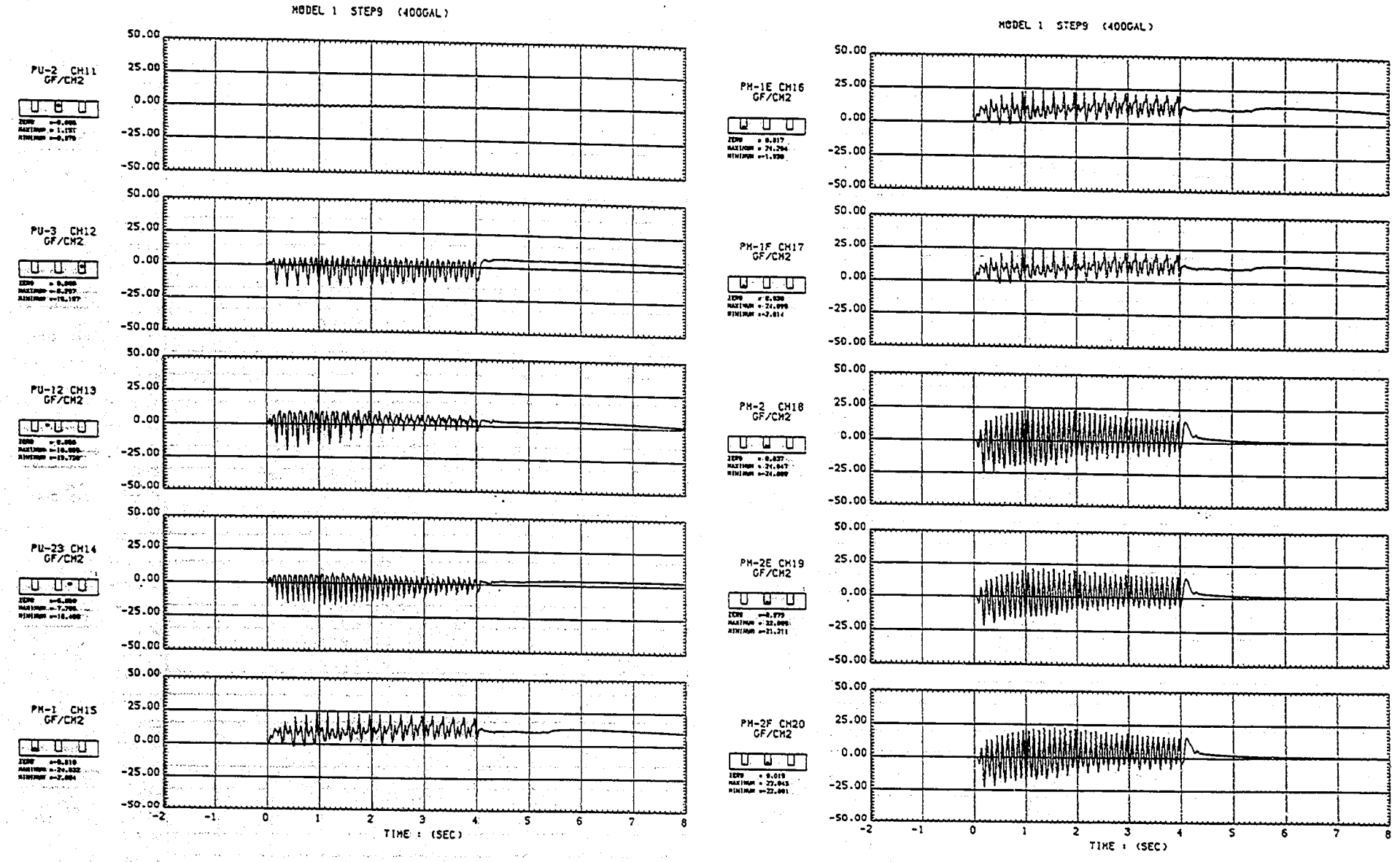


図3．9(1) 測定データの時刻歴（ケース1、2、3：400gal）

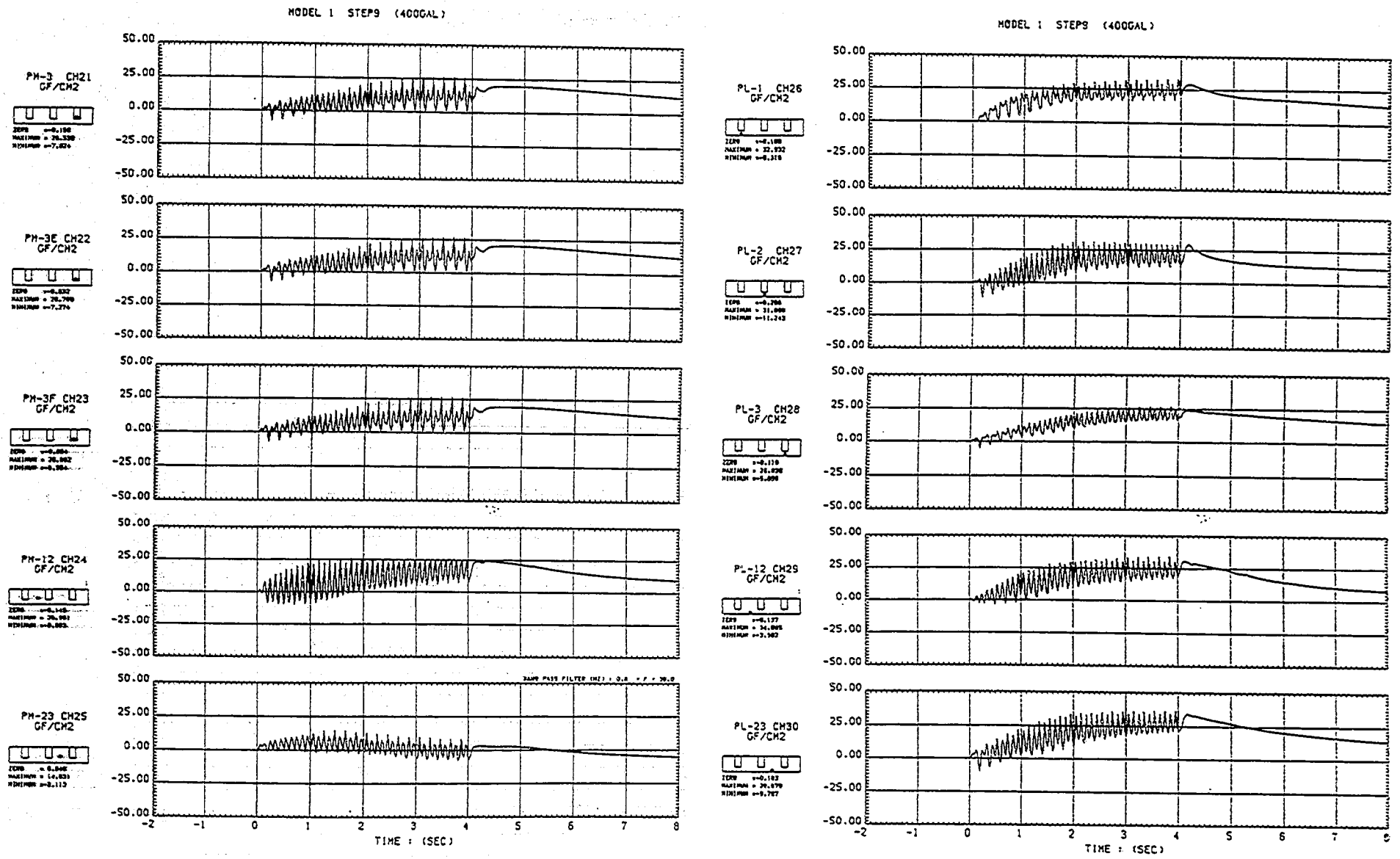


図３．９(1) 測定データの時刻歴（ケース１、２、３：400gal）

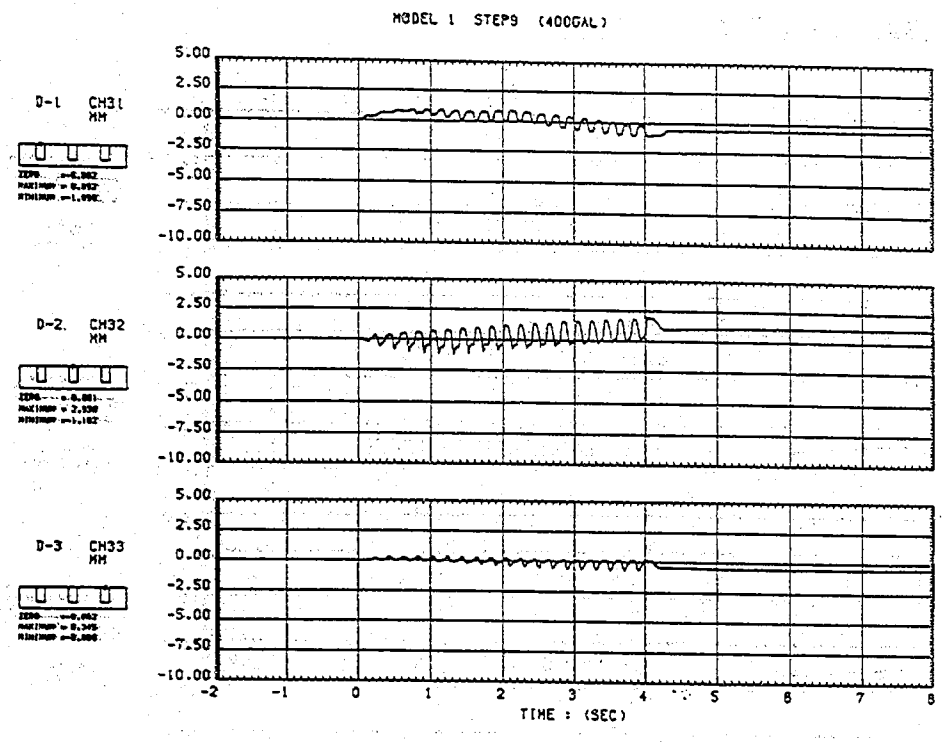


図3.9(1) 測定データの時刻歴（ケース1、2、3：400gal）

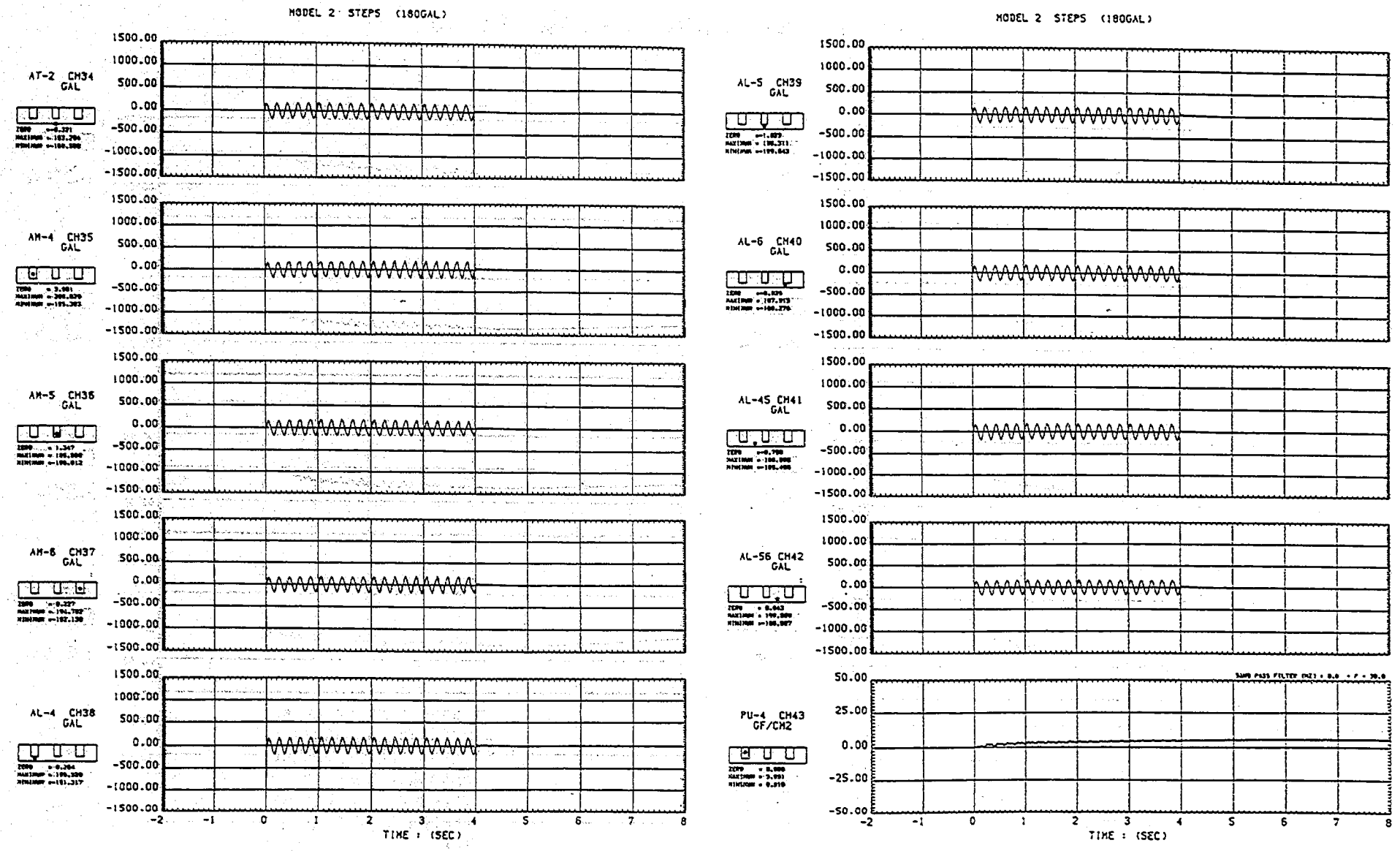


図３．９(2)　測定データの時刻歴（ケース４、５、６：180gal）

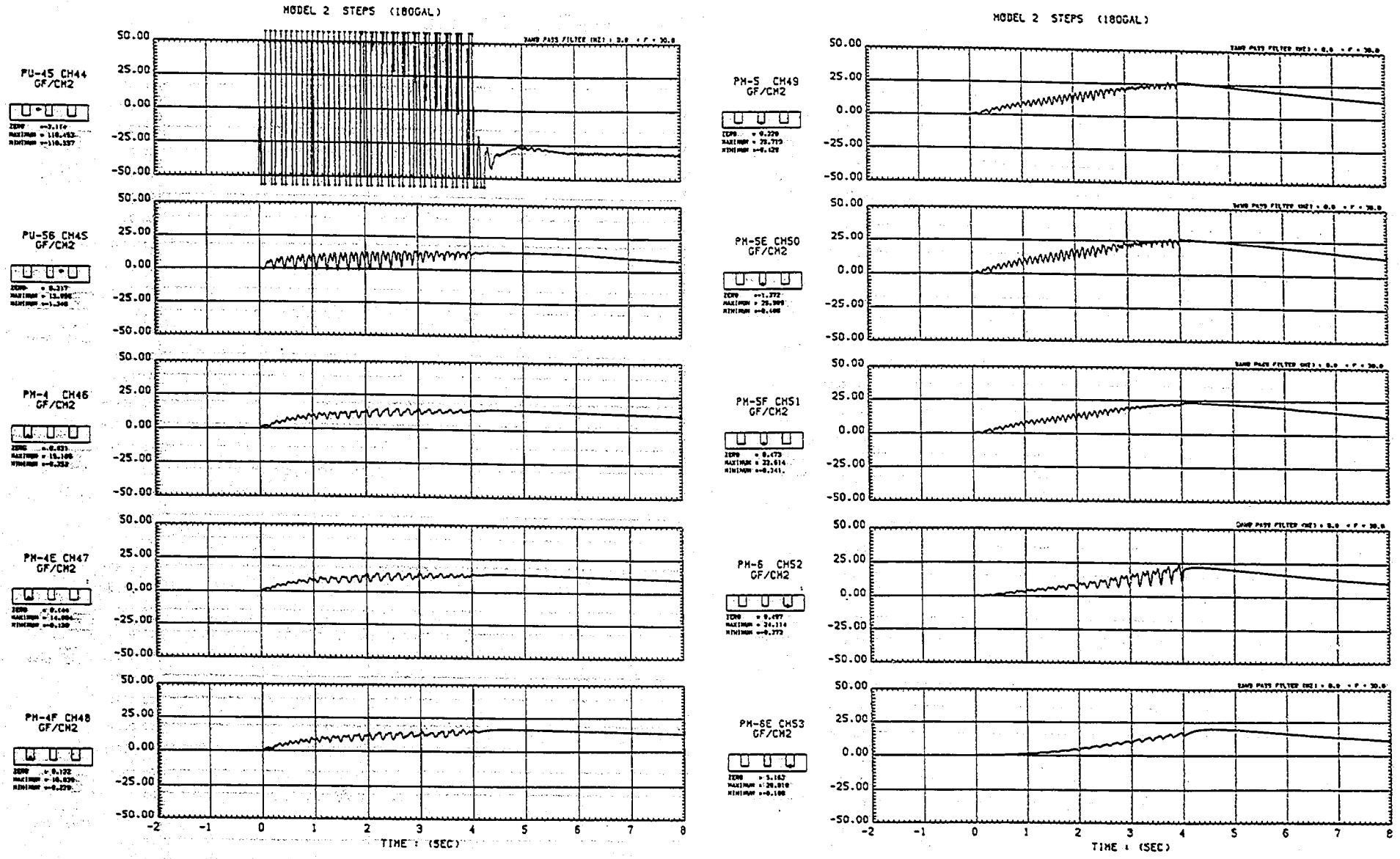


図３．９(2)　測定データの時刻歴（ケース４、５、６：180gal）

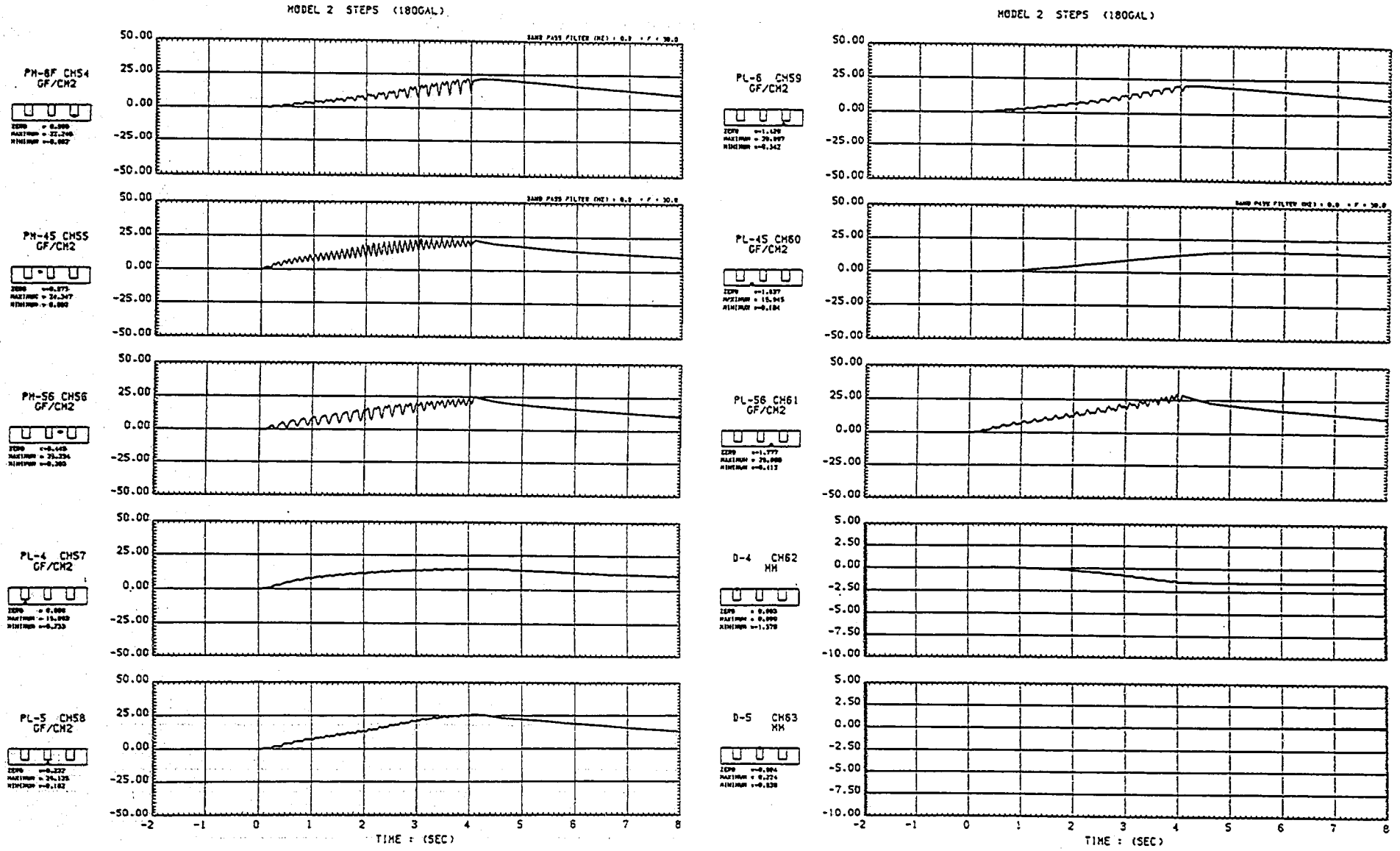


図3.9(2) 測定データの時刻歴（ケース4、5、6：180gal）

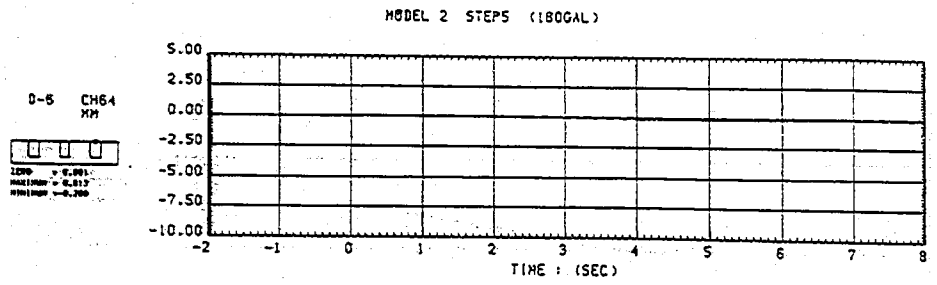


図3．9(2) 測定データの時刻歴（ケース4、5、6：180gal）

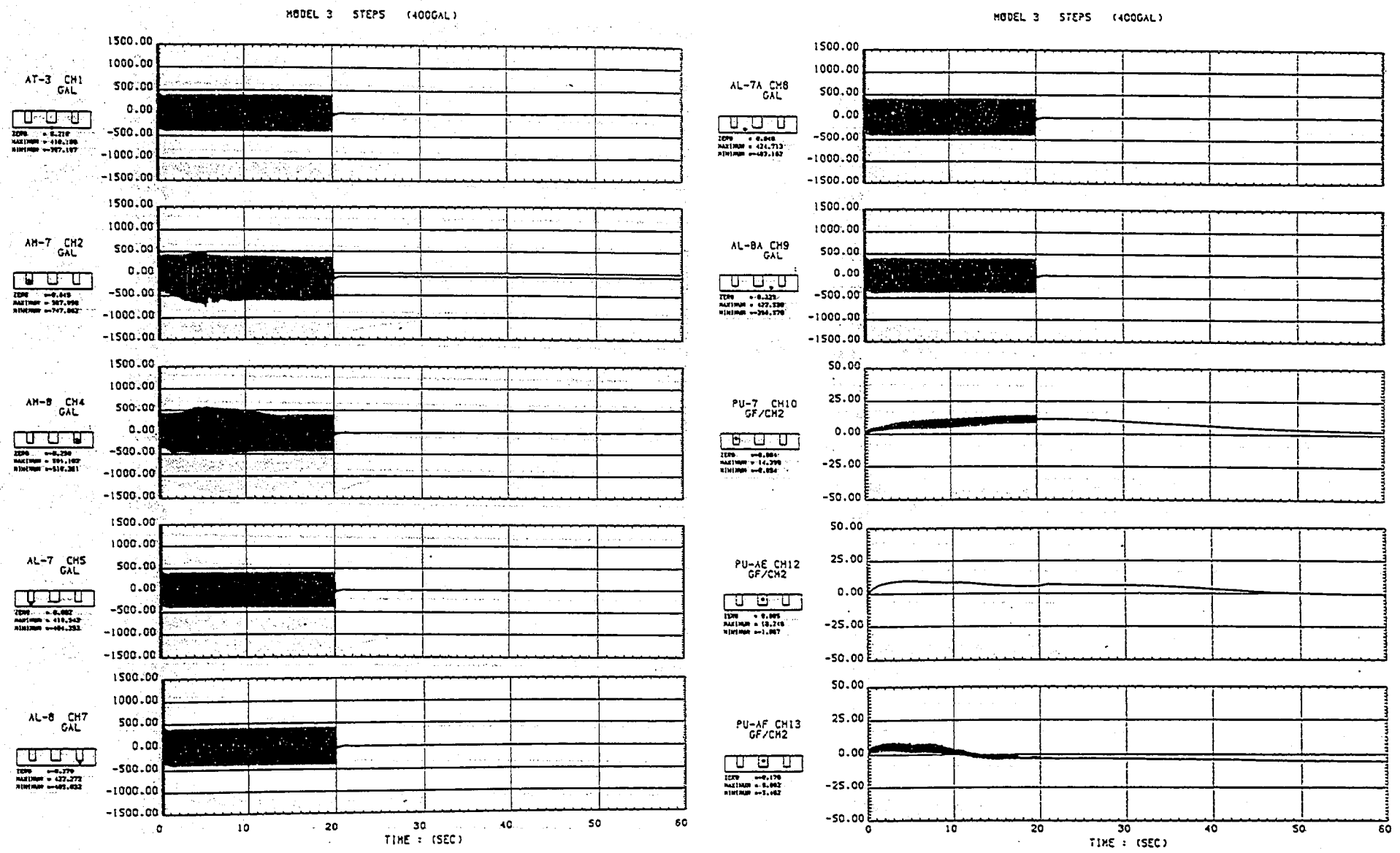


図3.9(3) 測定データの時刻歴（ケース7、8：400gal）

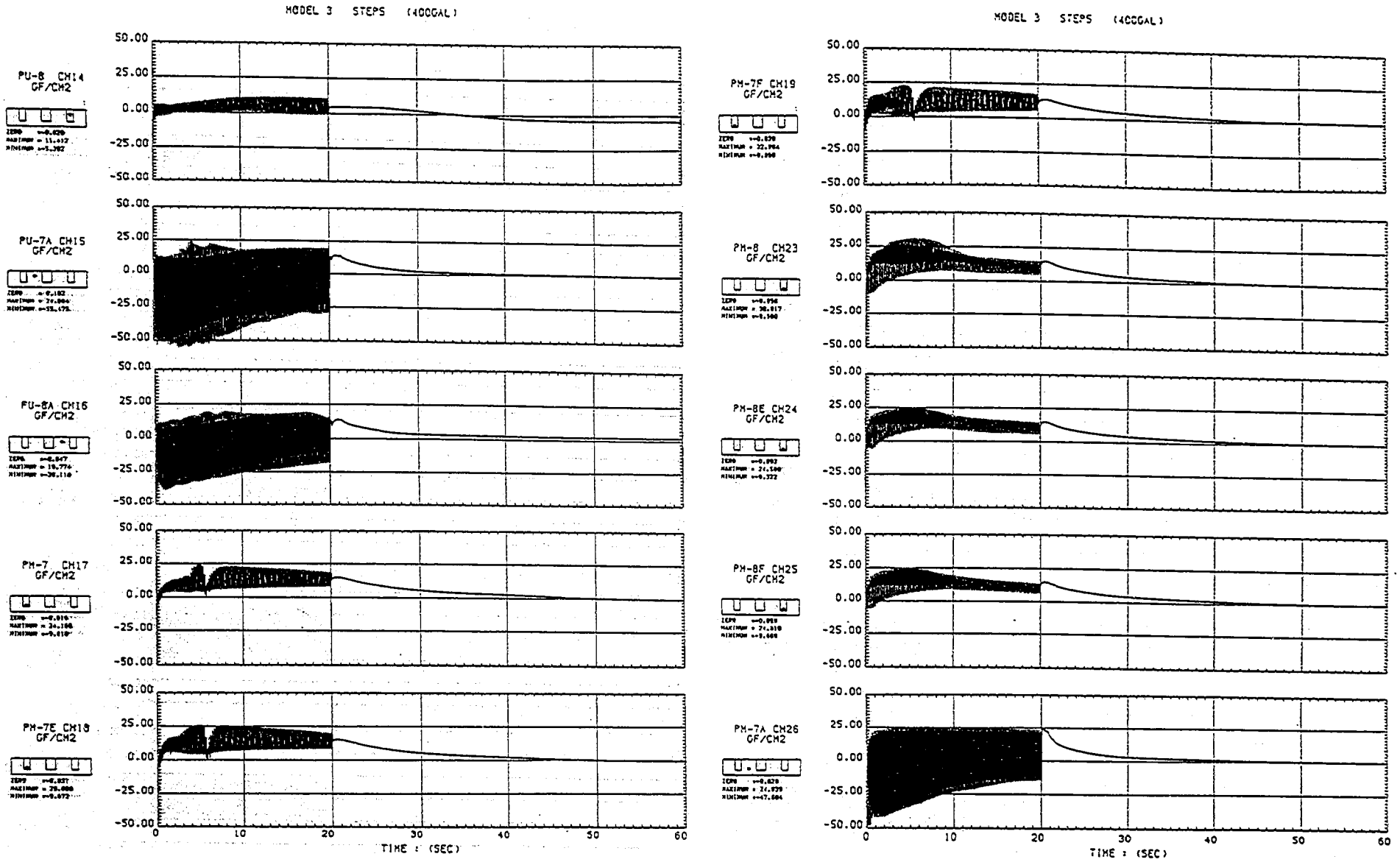


図3．9(3) 測定データの時刻歴（ケース7、8：400gal）

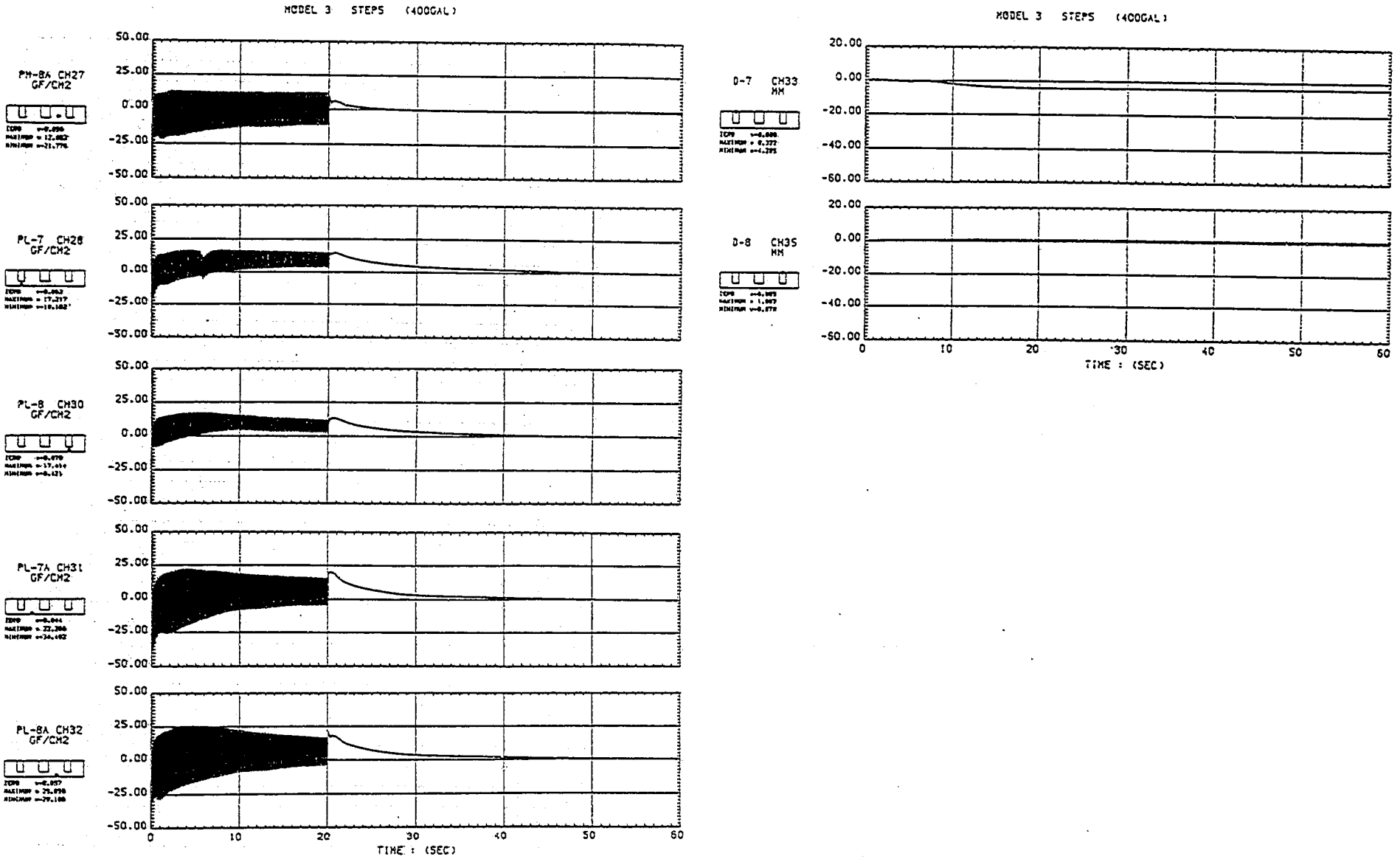


図３．９(3) 測定データの時刻歴（ケース７、８：400gal）

表3．6　初期有効上載圧（管渠型、マンホール模型）

モデルNo.	センサーNo.	深度 (cm) GL.－	原地盤	埋戻し	砕石	管路	σv' (gf/cm2)
モデル1	PU-1	15		15			12.408
	PU-2	15		15			14.088
	PU-3	15		15			14.463
	PU-12	15	15				14.192
	PU-23	15	15				14.192
	PM-1	30		24		6	18.352
	PM-1E	30		24		6	18.352
	PM-1F	30		24		6	18.352
	PM-2	30		24		6	21.041
	PM-2E	30		24		6	21.041
	PM-2F	30		24		6	21.041
	PM-3	30		24		6	21.041
	PM-3E	30		24		6	21.641
	PM-3F	30		24		6	21.641
	PM-12	30	30				28.383
	PM-23	30	30				28.383
	PL-1	45	10	24	5	6	34.842
	PL-2	45	10	24	5	6	36.495
	PL-3	45	10	24	5	6	37.159
	PL-12	45	45				42.575
	PL-23	45	45				42.575
モデル2	PU-4	15		15			12.352
	PU-45	15	15				14.154
	PU-56	15	15				14.154
	PM-4	30		18.5		11.5	11.209
	PM-4E	30		18.5		11.5	11.209
	PM-4F	30		18.5		11.5	11.209
	PM-5	30		24	5	6	27.882
	PM-5E	30		24	5	6	27.882
	PM-5F	30		24	5	6	27.882
	PM-6	30		18.5	5	11.5	27.233
	PM-6E	30		18.5	5	11.5	27.233
	PM-6F	30		18.5	5	11.5	27.233
	PM-45	30	30				28.309
	PM-56	30	30				28.309
	PL-4	45	10	18.5	5	11.5	26.765
	PL-5	45	10	24	5	6	36.056
	PL-6	45	10	18.5	5	11.5	28.776
	PL-45	45	45				42.463
	PL-56	45	45				42.463

モデルNo.	センサーNo.	深度 (cm) GL.－	原地盤	非液状化	埋戻し	砕石	ｺﾝｸﾘ基礎	管路	σv' (gf/cm2)
モデル3	PU-7	15			15				12.287
	PU-A	15			15				12.213
	PU-AE	15			15				12.213
	PU-AF	15			15				12.213
	PU-8	15			15				12.408
	PU-7A	15	15						15.142
	PU-8A	15	15						15.142
	PM-7	30			24			6	17.260
	PM-7E	30			24			6	17.260
	PM-7F	30			24			6	17.260
	PM-A	30						35	3.500
	PM-AE	30			24			6	17.141
	PM-AF	30			24			6	17.141
	PM-8	30			25		2.4	6	20.605
	PM-8E	30			25		2.4	6	20.605
	PM-8F	30			25		2.4	6	20.605
	PM-7A	30	30						30.284
	PM-8A	30	30						30.284
	PL-7	45	10		24	5			33.617
	PL-A	45	5			5		35	14.766
	PL-8	45	10		24	2.6	2.4	6	33.131
	PL-7A	45	45						45.426
	PL-8A	45	45						45.426
モデル4	PU-B	15			15				12.260
	PU-BE	15			15				12.260
	PU-BF	15			15				12.260
	PU-C	15			15				12.306
	PU-CE	15			15				12.306
	PU-CF	15			15				12.306
	PU-BC	15	15						14.173
	PU-CB	15	15						14.173
	PM-B	35						35	3.500
	PM-BE	30			24			6	17.215
	PM-BF	30			24			6	17.215
	PM-C	30						35	3.500
	PM-CE	30			24			6	17.289
	PM-CF	30			24			6	17.289
	PM-BC	30	30						28.346
	PM-CB	30	30						28.346
	PL-B	45	5			5		35	14.408
	PL-C	45		50		5		35	14.962
	PL-BC	45	45						42.519
	PL-CB	45	40	50					42.854

○ケース1，2，3（400gal加振時）図3．9(1)

ケース1では加振開始から数波で管直下（PM1，PM1F，PM1E）の過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達したのに対し、埋戻し部の密度の高いケース3（PM3，PM3F，PM3E）では加振後半で有効上載圧に達していることから、埋戻し部分の密度増加による効果が現れていることが分かる。埋戻し部直下の加速度（AL1，AL2，AL3）はケース2のAL2を除きあまり波形は乱れていない。また、AL2と同様の位置にある原地盤部の加速度計（AL12，AL23）でも同様の波形の乱れが見られた。これは、透水性の一番よいケース2の方に間隙水が集まっていったためと考えられる。しかし、さらに5cm下（埋戻し部からは10cm下）の位置に設置されている間隙水圧計（PL2，PL12，PL23）には、この影響は見られない。またケース2の周囲の原地盤部の間隙水圧計（PU12，PU23，PM12，PM23）については、ケース1と2の間にあるPU12，PM12がそれぞれ初期有効上載圧の77,90％程度上昇しているのに対し、ケース2と3の間にあるPU23，PM23ではそれぞれ約50％程度の上昇である。このことから、原地盤部の間隙水圧の動きは周囲の埋戻し部の状態や模型の配置に大きく影響されるが、その影響範囲は埋戻し部の側方方向には大きく、鉛直方向には小さいものと推測される。また、ケース1と2の埋戻し部上部の間隙水圧計（PU1，PU2）は、ケース3のものと比べると変動が小さい。PU1は、同じような条件（管径の大・小の違いのみ）であるケース4のPU4と同じような変動をしていることから、ステップ加振により埋戻し地盤が締まったために、変動が小さくなったと思われる。PU2は、5章でほぼ同じ条件で行っているケース16のPU16と比べても明らかに小さいことから、センサーの不良が原因と思われる。浮上がり量についてはケース1では一旦沈下してから浮き上がっていったのに対し、ケース3では少しずつ浮き上がっている。砕石で埋め戻したケース2では、加振直後に一旦浮き上がり、その後沈下する傾向にあった。また、管渠直下の過剰間隙水圧が初期有効上載圧以上の時に、管渠が浮上がりまたは沈下の動きを始めている。

○ケース4，5，6（180gal加振時）図3．9(2)

原地盤部の一番下にある間隙水圧計（PL4，PL5，PL6，PL45，PL56）を見比べてみると、ケース5，6側の間隙水圧計（PL5，PL6，PL56）の方がケース4，5側の間隙水圧計（PL4，PL45）よりも大きな値を示している。これは、先に述べたケース1，2，3の場合と同様に埋戻し部の透水性の違いによるものであると考えられる。ケース4の管直下の間隙水圧（PM4，PM4F，PM4E）よりも安定処理土直下の間隙水圧（PM5，PM5F，PM5E，PM6，PM6E，PM6F）の方が約2倍ほど大きな値を示している。しかし、ケース5，6は浮上がり（D5，D6）が生じていないこと、管渠上部の加速度計（AM5，AM6）に変化が見られない（この後の加振でも見られなかった）ことから、安定処理土による埋戻しの効果が見られることが分かる。安定処理土で埋め戻したケース5と6では、管渠径の大小による加速度・間隙水圧の違いは時刻歴上では確認できなかった。また、ケース4の管渠直下の過剰間隙水圧（PM4，PM4F，PM4E）は、同じ加振加速度の時のケース1（PM1，PM1F，PM1E）と比べると、極端に大きな値を示している（約3倍）。この差が、管渠の浮上がりに大きく影響しているものと思われる。この中で唯一浮き上がったケース4は、ケース1，2，3と同様に管渠直下で液状化した時点で管渠の浮上がり（D4）が始まっている。

○ケース7，8（400gal加振時）図3．9(3)

原地盤部については、設置した加速度計の応答はほぼ入力加速度と等しく、液状化も地表面から15cm付近までしか液状化していない。また、原地盤部の間隙水圧は埋戻し部のものと比べ、サイクリックモビリティーの影響により変動が大きくなっている。これに対し、管渠の加速度（AM7，AM8）はともに、加振開始とともに加速度応答が大きくなっている。しかし、AM8では、途中から台加速度とほぼ同じ応答をしている。またこのとき、管渠直下の水圧（PM8，PM8F，PM8E）の上昇がなくなり、減少傾向にある。ケース7では、管渠が浮き上がり始める直前に管渠直下の水圧（PM7，PM7F，PM7E）と加速度（AM7）の応答に奇妙な変化が見られる。また、管渠は他のケースと同様に管渠直下の過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達したときに浮上がり始める。ケース1と同じ加振時間（4秒）のところでケース1と7を比べると、ケース7では管渠の比重がケース1（0.750）よりも小さい0.600であるにもかかわらず浮上がり量に極端に差が出ている。これは、管渠の加速度（AM7）がケース1の加速度（AM1）に比べてほとんど応答が小さいことから、原地盤部を液状化しにくくしたことが影響しているためである。管渠の基礎をコンクリート基礎に変えた場合、比重が大きくなったことによりさらに浮き上がりにくくなったが、このことは時刻歴上での管渠の加速度（AM7とAM8）応答に多少の差があるくらいで、他にはあまり違いは認められない。

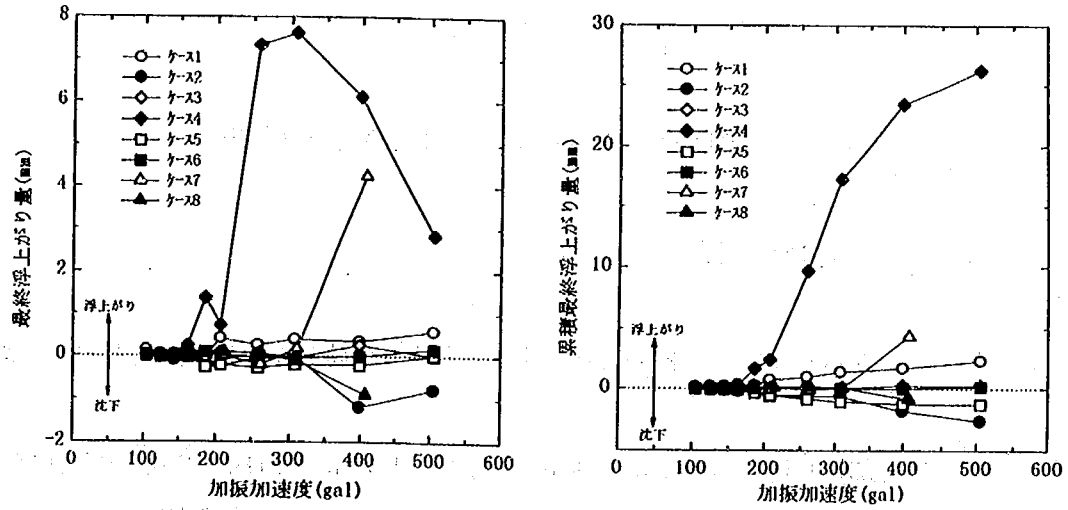
表3．7　模型の浮上がり量（管渠模型）

項目	STEP No.	台加速度 (gal)	ケース1 D1 (mm)	ケース2 D2 (mm)	ケース3 D3 (mm)	ケース4 D4 (mm)	ケース5 D5 (mm)	ケース6 D6 (mm)	台加速度 (gal)	ケース7 D7 (mm)	ケース8 D8 (mm)
最終浮上がり量	1	103.69	0.135	0.007	-0.003	0.010	0.000	-0.003	165.82	0.100	0.042
	2	124.52	0.029	-0.038	0.003	-0.020	-0.022	-0.004	211.85	-0.006	0.093
	3	143.97	0.024	-0.107	-0.030	0.014	-0.011	0.010	262.22	-0.210	0.056
	4	162.74	0.113	-0.049	0.023	0.240	-0.022	0.010	310.04	0.154	-0.125
	5	186.32	-0.030	-0.091	-0.051	1.374	-0.264	0.087	406.68	4.251	-0.905
	6	206.94	0.416	-0.247	0.078	0.722	-0.226	0.008			
	7	258.68	0.255	-0.071	0.061	7.333	-0.275	-0.053			
	8	306.98	0.395	-0.027	-0.063	7.615	-0.213	-0.045			
	9	398.40	0.339	-1.187	0.246	6.110	-0.218	-0.016			
	10	504.87	0.590	-0.788	-0.003	2.827	-0.004	0.162			
最終累積浮上がり量	1	103.69	0.135	0.007	-0.003	0.010	0.000	-0.003	165.82	0.100	0.042
	2	124.52	0.164	-0.031	0.000	-0.011	-0.022	-0.007	211.85	0.093	0.135
	3	143.97	0.188	-0.138	-0.030	0.003	-0.033	0.003	262.22	-0.116	0.191
	4	162.74	0.301	-0.187	-0.007	0.243	-0.055	0.013	310.04	0.038	0.066
	5	186.32	0.271	-0.278	-0.058	1.617	-0.319	0.100	406.68	4.288	-0.839
	6	206.94	0.687	-0.524	0.020	2.338	-0.545	0.108			
	7	258.68	0.942	-0.595	0.081	9.671	-0.820	0.055			
	8	306.98	1.336	-0.622	0.018	17.286	-1.033	0.010			
	9	398.40	1.676	-1.809	0.264	23.395	-1.261	-0.006			
	10	504.87	2.265	-2.597	0.261	26.222	-1.255	0.156			

＋：浮上がり，－：沈　下
ケース7，8のSTEP5は、20秒加振時の値

(2) 浮上がり量

加振ステップごとの浮上がり量を表3．7に、管渠模型の浮上がり量（加振ごと、累積値）と加振加速度との関係を図3．10(1)～(2)に示す。管径が一番大きいケース4は160galで浮き上がりはじめ、全ケース中で最も浮上がり量が大きかった。これに対し、地盤条件がほぼ同じで管径が小さいケース1，7は、300gal加振以降でわずかに浮上がっただけだった。埋戻し部が密であったケース3では、浮上がりは生じなかった。埋戻し部が砕石のケース2、安定処理土のケース5，6、コンクリート基礎を用いたケース8については、逆に沈下する傾向にあった。埋戻し部の密度の違うケース1と3では、埋戻し部分の密度が緩いケース1の方が微妙な差ではあるが浮き上がりが生じている。原地盤が液状化しにくいモデルのケース7は400gal加振で大幅に上昇している。しかし、これは加振時間が20秒間あったためであり、他のケースと比較するために加振開始から4秒時点での値を見てみると約0.5mmの浮き上がりである。これはケース1とほぼ同じか小さいくらいである。このことから、周囲の地盤の密度が高い場合においても管渠の浮上がりを多少は抑制するということがわかる。図3．9(1)においてケース4で浮上がり量が減少しているのは、ステップ加振の影響と加振が始まると管渠模型がいったん沈下してから浮き上がっている傾向があるためである。



(1)加振ステップごと　　(2)累積値

図3．10　浮上がり量と加振加速度との関係

(3) 模型下端の過剰間隙水圧

ケース1～8の管渠模型下端の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係を図3.11に示す。（ただし、ケース5，6は埋戻し部が安定処理土であるため安定処理土の下の過剰間隙水圧の値を、ケース8はコンクリート基礎の下の過剰間隙水圧の値を用いている。）なお、図中に示してある各ケースの初期有効上載圧は表3．6に示すとおりである。一番浮上がり量の大きかったケース4では160gal程度の加振で初期有効上載圧（$\sigma v'$）まで上がっている。またこの加速度の時、図3．10より浮上がりが始まっていることがわかる。他のケースについては、250gal加振以降に$\sigma v'$に達している。埋戻し部が緩いケース1、埋戻し部が密のケース3、埋戻し部は緩いが原地盤部が密なケース7を比べてみると、管渠底部が液状化

する前（300gal）までは過剰間隙水圧はケース１＞ケース３＞ケース７の順であり、原地盤の密度を多くした方が過剰間隙水圧を抑制するということがわかるが、液状化してしまうとほとんど差がなくなってしまうことがわかる。ただし、ケース１，３に関しては、両ケースの間に砕石埋戻しのケース２があったことから、透水性の良いケース２の方に水が流れていった可能性があり、ケース２がもしなかったとしたら、ケース１，３の過剰間隙水圧はもう少し小さい加速度で有効上載圧に達していたのではないかと思われる。

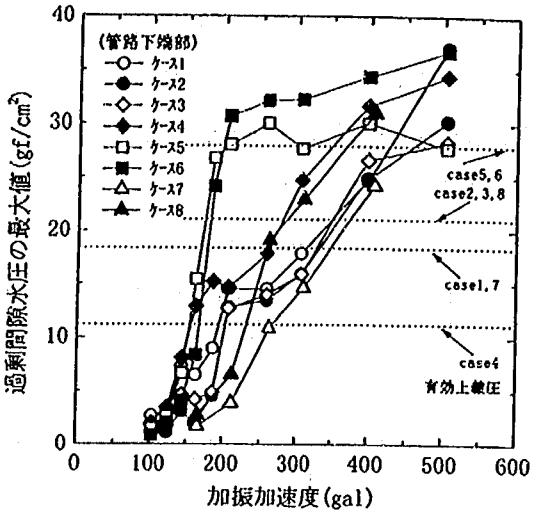


図３．11　過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係

３．４．２　管渠付きマンホール模型の場合

(1)　時刻歴

各ケースについて、マンホール模型が初めて浮き上がったときの時刻歴（150gal加振時）を図３．12に示す。

どのケースについても加振直後からマンホール下部の水圧（PMA，PMB，PMC）が初期有効上載圧（約3.5gf／cm²）よりもはるかに大きな値を示している（ちなみに、マンホールが存在せず埋戻し部のみと仮定した場合の初期有効上載圧は、約28.6gf／cm²である。）。しかし、ケースAでは浮上がらず、ケースB，Cでは浮上がりが生じている。この差は、埋戻し部直下の過剰間隙水圧（PLA，PLB，PLC）にあり、原地盤が液状化しにくいモデルにあるケースAでは初期有効上載圧（約14.8gf／cm²）に達していないのに対し、原地盤が液状化しやすいモデルであるケースB，Cでは初期有効上載圧（約14.4gf／cm²）にほぼ達している。ケースBとCの浮上がり量の差は、ケースCでは埋戻し部直下の原地盤を締め固めたために、埋戻し部の底面に水が回り込みにくくなったためである。このことはPLB，PLCと同じ深度にある間隙水圧計（PLBC，PLCB）を見比べてみると、PLBCの方がPLCBよりも約5.3倍大きな過剰間隙水圧を生じていることからもわかる。また、マンホール模型の浮上がりは模型下部の過剰間隙水圧（PMB，PMC）の値がピークに達した時点から始まっている。

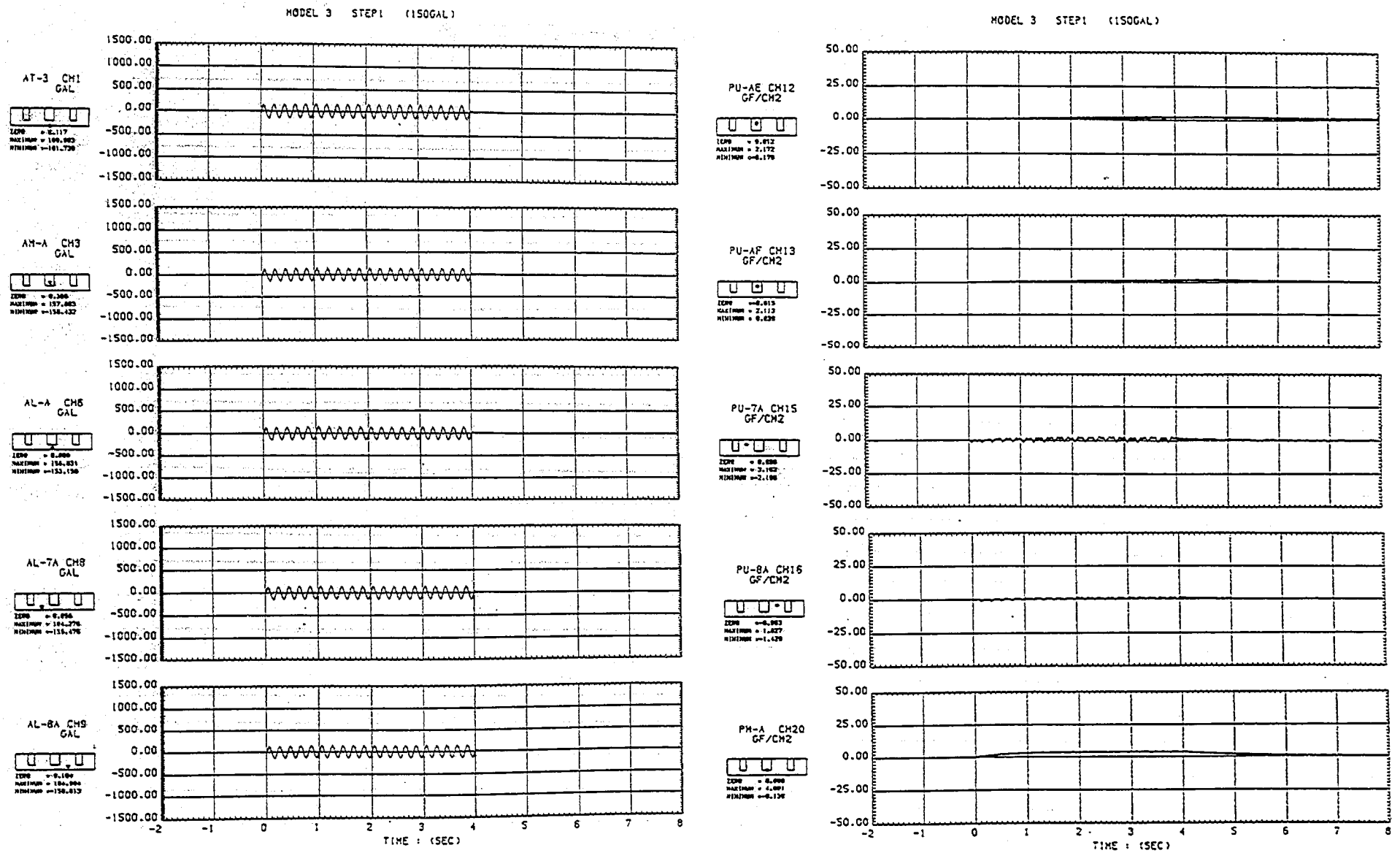


図3.12　計測データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal）

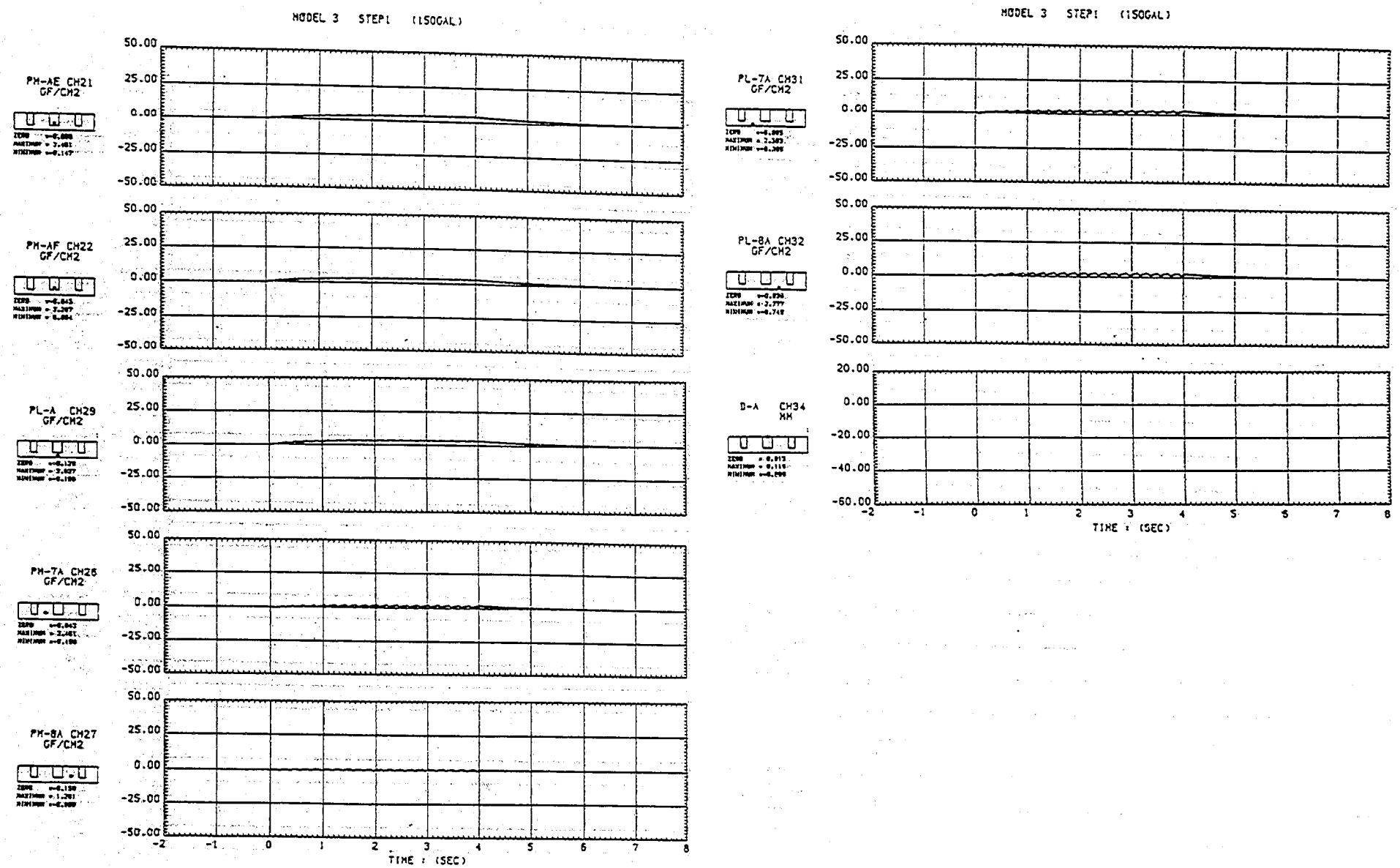


図3.12 計測データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal）

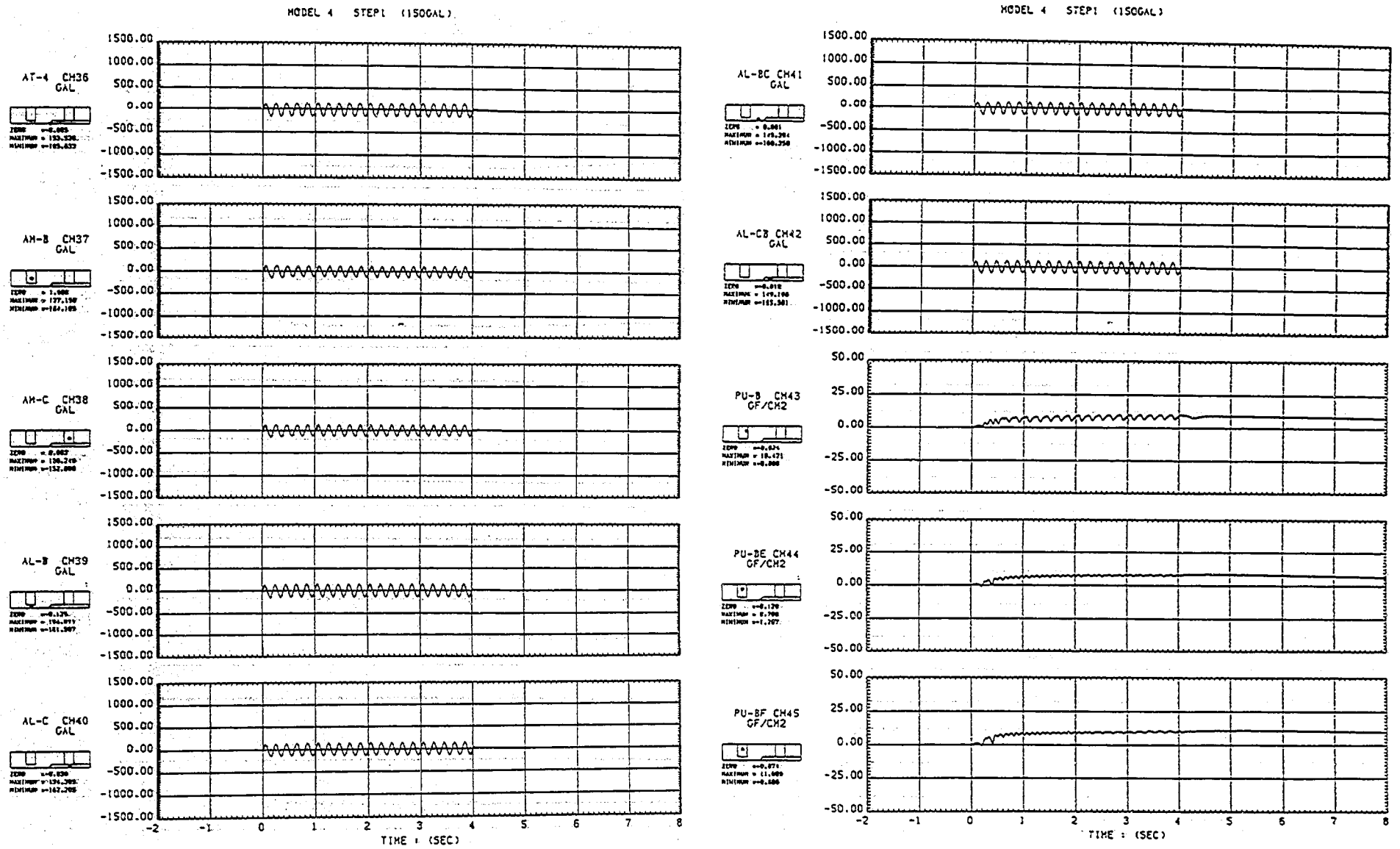


図3.12 計測データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal）

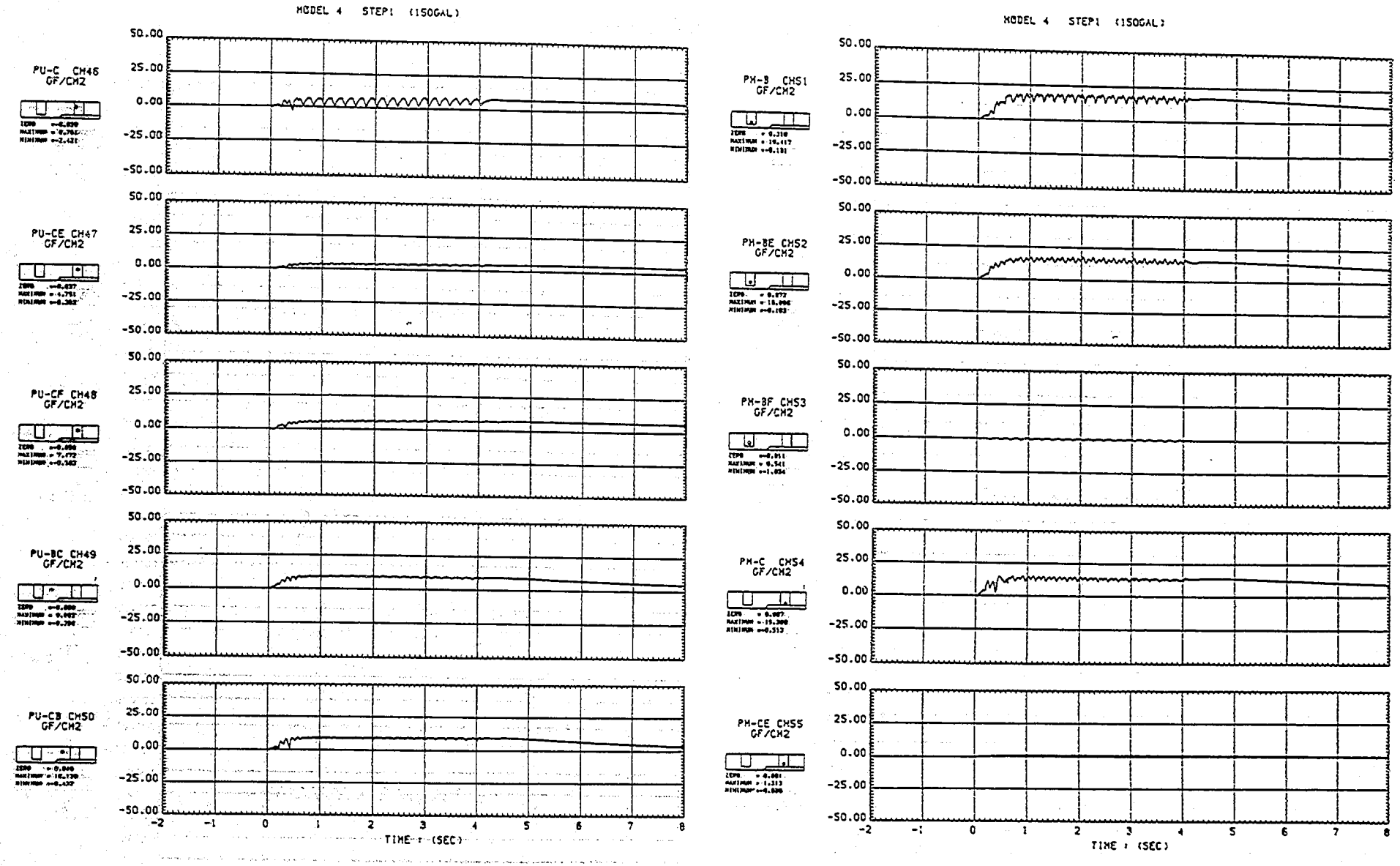


図3.12 計測データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal）

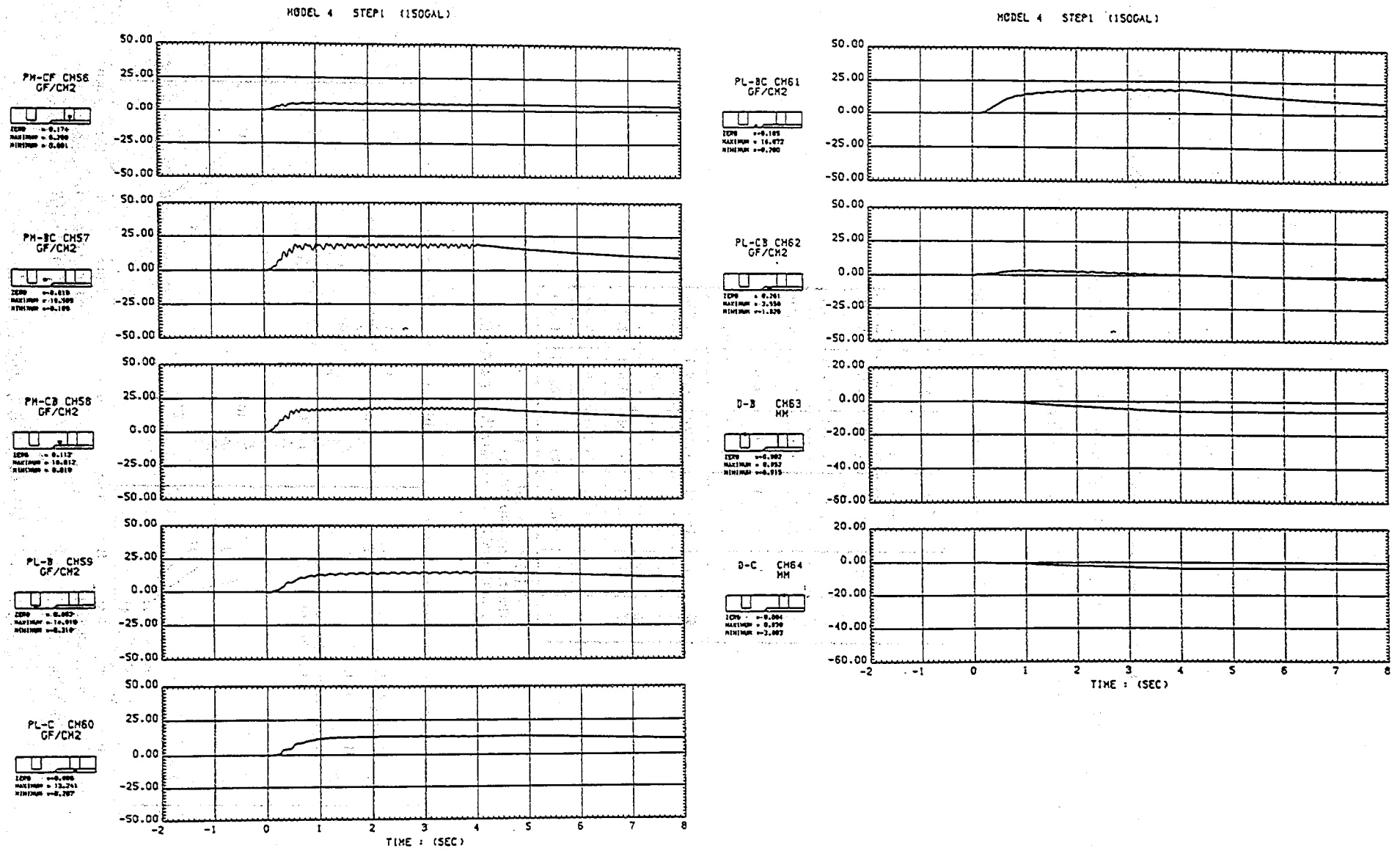


図3.12 計測データの時刻歴（ケースA、B、C：150gal）

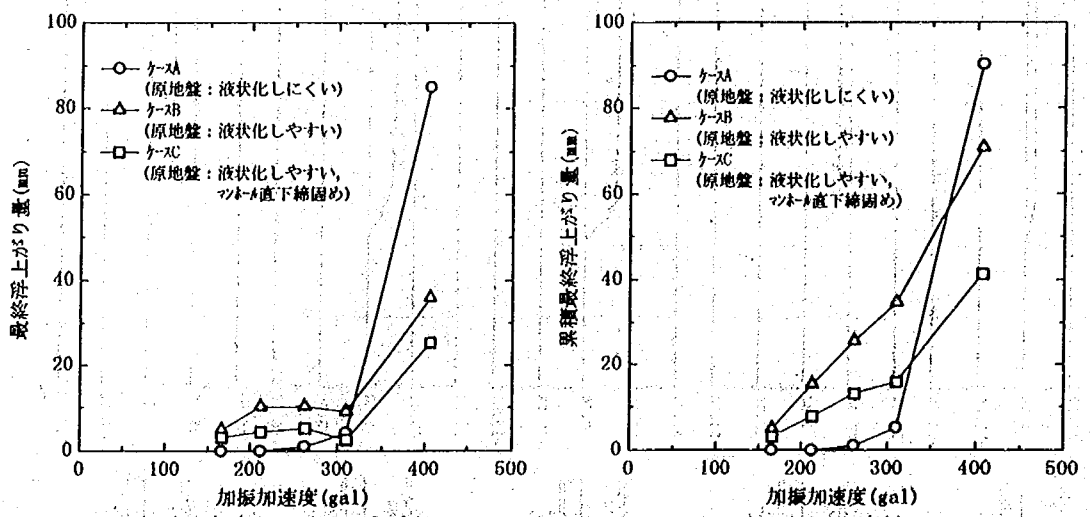
(2) 浮上がり量

加振ステップごとの浮上がり量を表3．8に、模型の浮上がり量（加振ごと、累積値）と加振加速度との関係を図3．13(1)～(2)に示す。原地盤が液状化しやすいモデルのケースB，Cは、150gal加振時から浮上がりの傾向がみられるのに対して、原地盤が液状化しにくいのケースAは300gal加振時に浮上がりはじめ、最終ステップ時に顕著な浮上がりを見せた。また、図3．13(1)において200～300galの間で浮上がり量があまり増えていないのは、ステップ加振による影響である。図3．13(2)において浮上がり量は、（無対策のケースB）＞（埋戻し下部の原地盤のみ締め固めたケースC）＞（原地盤全てを締め固めたケースA）の順であり、原地盤を締め固めるだけでも、ある程度の浮上がりの抑制ができることがわかる。また、管渠模型のみの場合（図3．10(1)、(2)）と比べると、大きな浮上がりであることがわかる。

表3．8　模型の浮上がり量（マンホール模型）

項目	STEP No.	台加速度 (gal)	ケースA DA (mm)	ケースB DB (mm)	ケースC DC (mm)
最終浮上がり量	1	165.82	0.007	4.911	3.256
	2	211.85	0.002	10.293	4.551
	3	262.22	0.985	10.297	5.290
	4	310.04	4.169	9.155	2.708
	5	406.68	85.000	36.083	25.405
最終累積浮上がり量	1	165.82	0.007	4.911	3.256
	2	211.85	0.009	15.204	7.807
	3	262.22	0.994	25.501	13.097
	4	310.04	5.162	34.655	15.805
	5	406.68	90.162	70.738	41.209

＋：浮上がり，－：沈　下
STEP5は、20秒加振時の値
STEP5のDAの値はスケール計測値による最終値



(1)加振ステップごと　　(2)累積値

図3．13　浮上がり量と加振加速度との関係

(3) 過剰間隙水圧

ケースA，B，Cの模型下端の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係を図3.14に示す。なお、図中に示してある各ケースの初期有効上載圧は表3.6に示すとおりである。マンホール下端の過剰間隙水圧は無対策のケースBが最も大きく、埋戻し下部の原地盤のみ締め固めたケースC、原地盤全てを締め固めたケースAの順であった。またマンホール付属の管渠部についても、ケースBがやはり最も大きな値を示した。ケースCは一番小さい値を示しているが、この測定値については他の2つと見比べても値が異常に小さく、測定精度の問題があった可能性がある。この結果から、原地盤を締め固めることによってマンホール直下の過剰間隙水圧を少しは抑制することができるということがわかる。しかし、ケースAについても加振加速度が大きくなっていくと管渠下端部の過剰間隙水圧が有効上載圧に達し、大きな浮上がりが生じている（図3.13(1)参照）ことから、原地盤だけではなくやはり埋戻し部についても何らかの対策が必要であることもわかる。

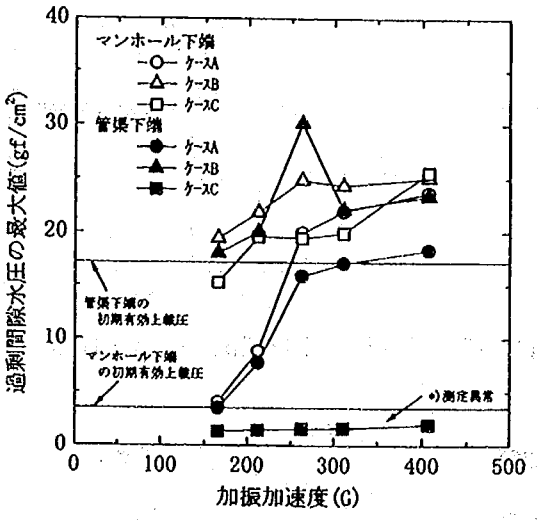


図3.14　過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係

3.4.3　全実験模型の変形状況

400gal加振後の各模型の変形状況を図3.15に示す。主な特徴は以下の通りである。

ケース2は原地盤部が埋戻し部を押し込んでいるように見えるが、これは砕石部分の間隙に原地盤の砂が入り込んだためであり、実際には埋戻し部は変形していなかった。埋戻し部が緩いケース1でメッシュの乱れが見られないのは、3.4.1(3)で述べたように透水性の良いケース2の方に水が流れていった可能性があるために埋戻し部が液状化しにくく、その結果あまり乱れなかったと考えられる。ケース4の埋戻し部は原地盤部に押し込められているが、水平のメッシュに有意な動きはない。安定処理土で埋戻し対策されているケース5，6でも、原地盤が液状化したことによる埋戻し下部メッシュの乱れ以外は特に変化は見られない。原地盤が液状化しにくいケース7，8では、地表面の沈下が見られる程度であった。

マンホール模型のケースB，Cは、埋戻し部（図で表示されているのは付属の管渠部の埋戻し部分）が押し込められていることがわかる。また、ケースBとCでは埋戻し部下部の原地盤が締め固められていないケー

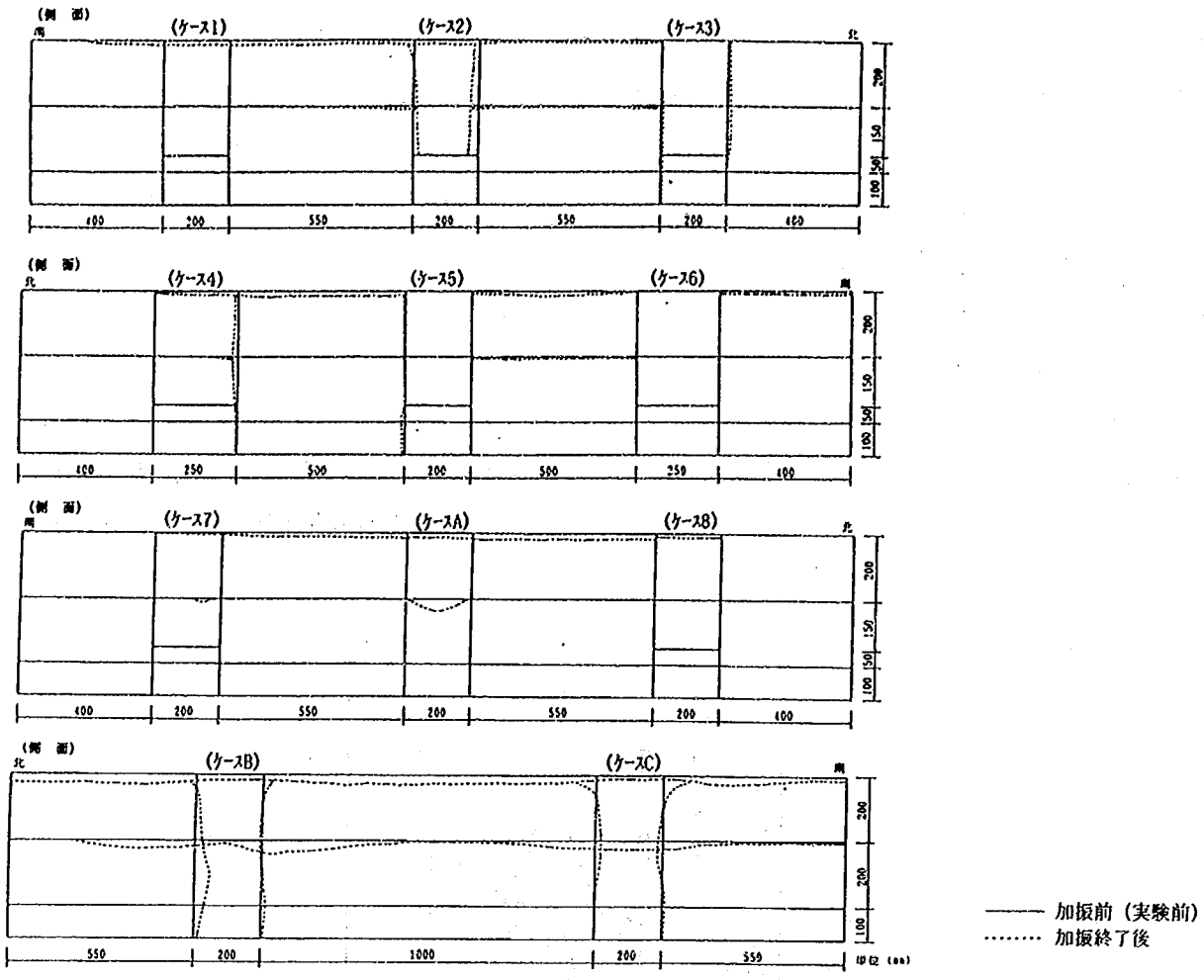


図3.15　各模型の変形状況（400gal加振後）

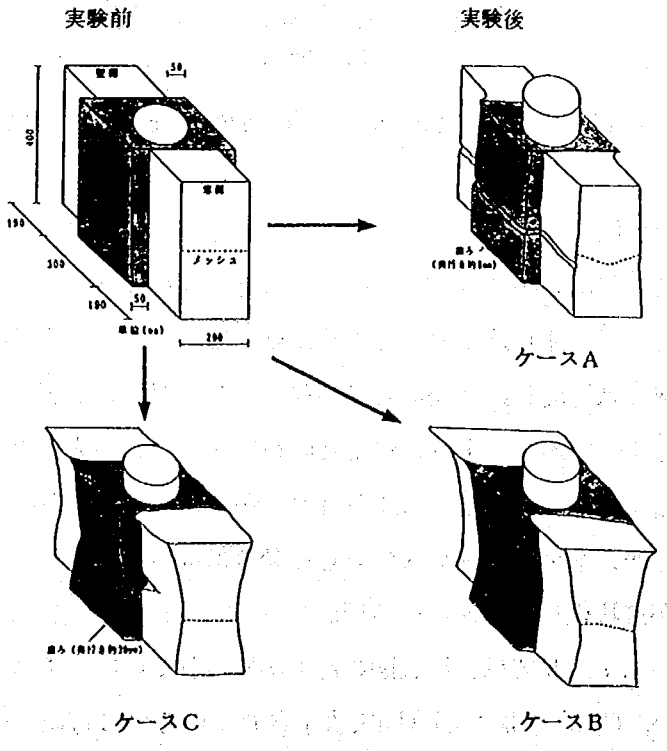


図3.16　模型解体時の変形状況（マンホール模型：ケースA～C）

スBの方が下部の変形が大きいことがわかる。ケースAでこの現象が確認できなかったのは原地盤が締め固められていて密度が大きかったために変形が抑制されたためと思われる。

またマンホール模型のケースA～Cの実験後に模型を解体したときの変形図を図3.16に示す。全体の変形の特徴としては、ケースAが埋戻し部全体が原地盤部に押されるように変形したのに対し、ケースB，Cでは中央部から地表面及び底面にかけて変形が大きくなっている。地表面部分を見てみても、ケースAが幅が狭くなっているのに対し、B，Cでは管渠部分が広がるように変形していた。変形は管渠部の方がマンホール部分よりも大きい。これはマンホールが埋戻し部の底面から地表面まで全体的にあるために、この部分の埋戻し部の変形が抑制されたものと考えられる。ケースA，Cでは、横メッシュを入れたあたりの埋戻し部にへこみや亀裂が存在した。

また、解体時の地表面から30cmの深さでの状況を図3.17、写真3.2に示すが、ケースにより量の差はあるが、管渠部分の砂がマンホール部分に回り込んでいる。ケースA，Bではマンホールと管渠の接合部分あたりから管渠部の埋戻し土が回り込んでいるのに対し、ケースCでは管渠部の埋戻し土がマンホール部分を押し込むように変形している。

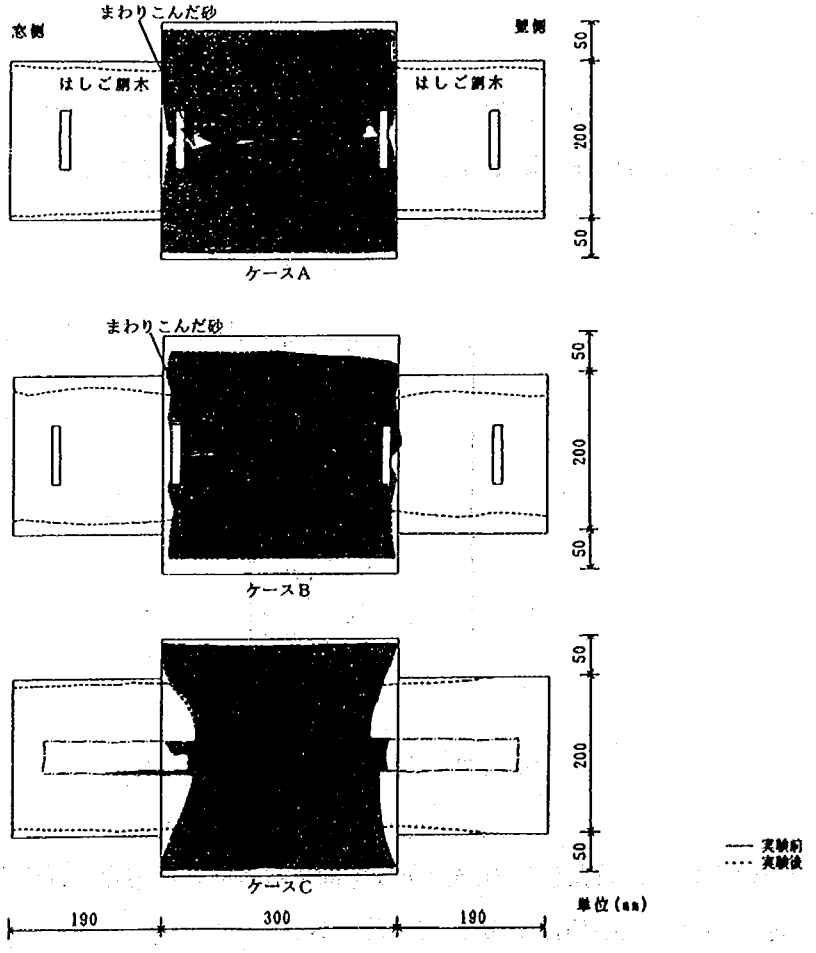


図3.17　地表面から30cmの深さでの状況（マンホール模型：ケースA～C）

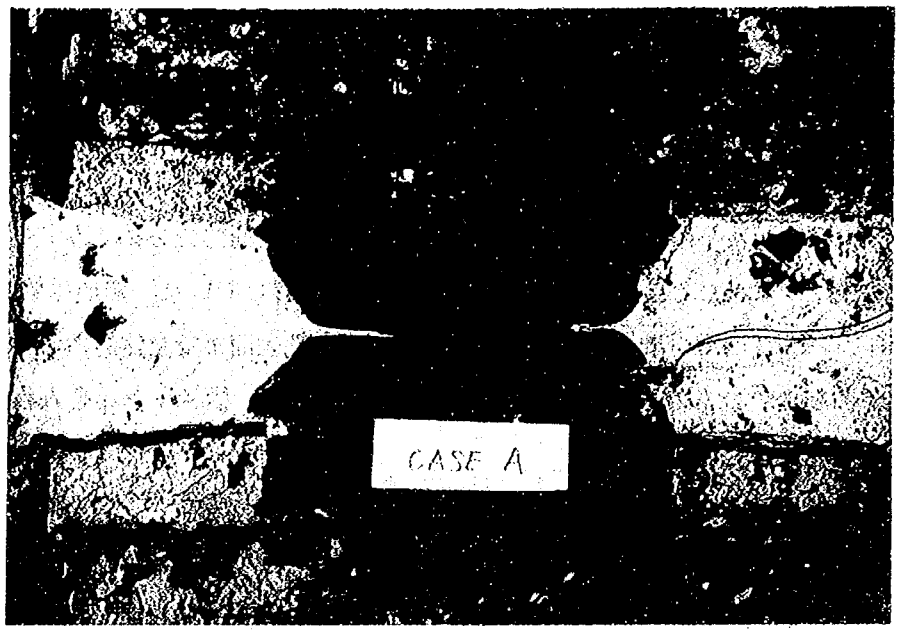


写真３．２　実験後の解体状況（ケースA）

３．４．４　浮上がり安全率の計算

(1)　浮上がり安全率の定義

地震時に円形断面である管路模型に作用する力として図３．18に示す５つの力を考える。ただし、鉛直方向の地震動による管路模型自身の慣性力は、①実験において鉛直加振を行っていないこと、②水平加振時においても鉛直加速度は非常に小さいことから考慮していない。

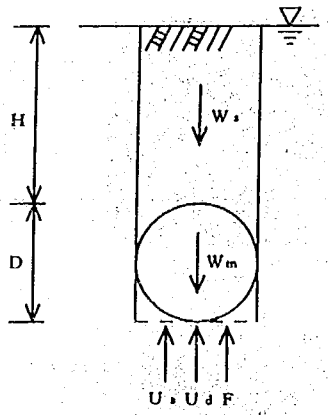


図３．18　管渠模型に作用する力

浮上がり安全率の定義は、管路模型の浮上がりを抑える下向きの力と、浮上がりを生じさせる上向きの力の比とする。浮上がり安全率Fuは、次式で定義する。[7),12)]

$$Fu=\frac{Ws+Wm}{Us+Ud+F} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.1)$$

なお、常時（加振前の状態）は、Ud＝0、F＝0であるので常時の安全率は次式のようになる。

$$Fu\ (常時) = \frac{Ws+Wm}{Us} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.2)$$

(2) 浮上がり安全率の計算方法

○管渠模型の浮上がり安全率は、次のように計算した。

1）上載土の自重：Ws（gf）

$$Ws = \left\{ D\left[H+\frac{D}{2}\right] - \frac{1}{2}\cdot\frac{\pi D^2}{4} \right\}\cdot L\cdot\gamma_{sat} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.3)$$

ここで、D　：管の外径（cm）

H　：管の上端から地表面までの距離（cm）

L　：管の長さ（cm）

γ_{sat}：埋戻し部の単位体積重量（gf／cm³）

2）管の自重Wm（gf）

$$Wm = \frac{\pi D^2}{4}\cdot L\cdot\gamma_{ts} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.4)$$

ここで、γ_{ts}：管の見かけの単位体積重量（gf／cm³）

3）静水圧による浮力Us（gf）

$$Us = \left\{ D\left[H+\frac{D}{2}\right] - \frac{1}{2}\cdot\frac{\pi D^2}{4} \right\}\cdot L\cdot\gamma_w \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.5)$$

4）過剰間隙水圧による揚力Ud（gf）

管路半断面に等方状態で過剰間隙水圧（Ru一定）が作用するとして、図3.19(a)のように管渠模型半断面において水平位置からθの角度の位置からさらにdθの角度だけいった位置までの間（図中の太い黒線部分）に過剰間隙水圧u_dが作用したとする。この位置に揚力分の力として作用する過剰間隙水圧の大きさは$u_d \sin\theta$、この間の長さはD/2×dθ、管渠の奥行Lより、この面に作用する揚力はD/2×dθ×L×$u_d \sin\theta$となる。よって管路模型半断面全体に作用する揚力Udは、管路模型底面の間隙水圧計で測定した過剰間隙水圧の値をu_{db}として計算すると以下のようになる。

$$Ud = 2L\int_{\theta=0}^{\pi/2} u_d\cdot\sin\theta\cdot\frac{D}{2}\,d\theta$$

$$= D\cdot L\cdot\gamma'\cdot Ru\int_{\theta=0}^{\pi/2}\left\{\left[H+\frac{D}{2}\right]\sin\theta+\frac{D}{2}\sin^2\theta\right\}d\theta$$

$$= D\cdot L\cdot\gamma'\cdot Ru\left\{\left[H+\frac{D}{2}\right]+\frac{D}{2}\cdot\frac{\pi}{4}\right\}$$

$$= Us\cdot\frac{\gamma'}{\gamma_w}\cdot Ru$$

$$= \frac{Us}{(H+D)\gamma_w}\cdot u_{db} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.6)$$

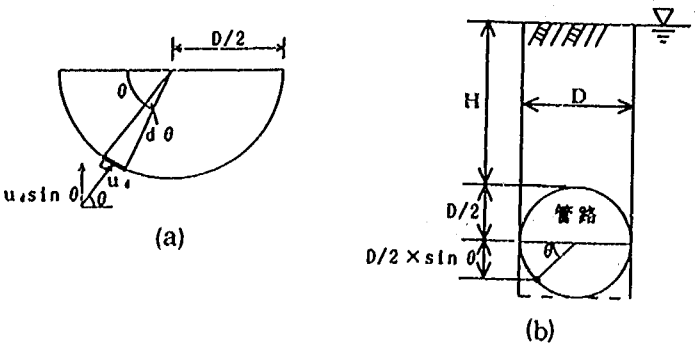


図3.19　管路下端に作用する力

u_d：管路下のある点に作用する過剰間隙水圧（gf／cm²）

u_d部分における有効上載圧$\sigma v'$は図3.19(b)より$\sigma v' = \{H+D/2\ (1+\sin\theta)\} \times \gamma'$と表すことができる。また$Ru = u_d / \sigma v'$より

$$u_d = Ru \cdot \sigma_v'$$

$$= Ru \cdot \left\{ H + \frac{D}{2}(1+\sin\theta) \right\} \cdot \gamma' \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.7)$$

$\sigma v'$：有効上載圧（gf／cm²）

γ'　：埋戻し部の水中単位体積重量（gf／cm³）

Ru　：過剰間隙水圧比

また、管渠模型底面部における過剰間隙水圧u_{db}は式（3.7）において$\theta = \pi/2$とすることにより求めることができ、$u_{db} = Ru \times (H+D) \times \gamma'$となる。よって

$$Ru = \frac{U_{db}}{(H+D)\gamma'} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.8)$$

5）浸透水力に起因する力F（gf）

管路半断面下の土塊（土粒子部のみ）に作用する力を考える（図3.20）と、浸透水力Sが土塊の有効重量Tよりも大きくなると、土塊全体が管路部を押し上げるような動きをする。このときの押し上げる力を浸透水力に起因する力Fとして、次式より求めた。

$$F = \begin{cases} S - T & (S \geqq T\text{の場合}) \\ 0 & (S < T\text{の場合}) \end{cases} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.9)$$

ここで、S：土塊底面に作用する過剰間隙水圧による揚力（gf）

$S = L \cdot D \cdot u_{ds} - Ud$

u_{ds}：管下方の原地盤における過剰間隙水圧（gf／cm²）

T：土塊の有効重量（gf）図3.20より

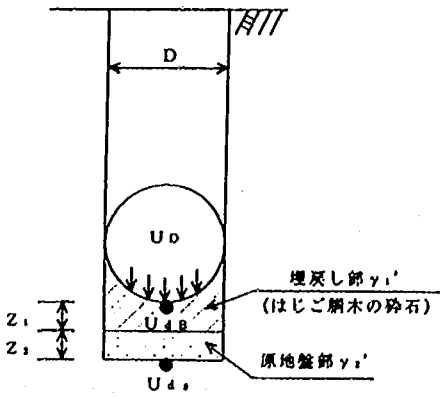


図3.20　管路半断面下の土塊に作用する力

$$T=\underbrace{\gamma_1'\cdot L\left\{\left(Z_1+\frac{D}{2}\right)\cdot D-\frac{1}{2}\cdot\frac{\pi D^2}{4}\right\}}_{①}+\underbrace{\gamma_2'\cdot L\cdot Z_2\cdot D}_{②}+\underbrace{\gamma'\cdot L\cdot D_v\cdot D}_{③} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.10)$$

①：管渠下の埋戻し部の有効重量（gf）

②：埋戻し部直下の原地盤の間隙水圧計から埋戻し部までの原地盤の有効重量（gf）

③：管渠の浮上がりによって新たに生じた管渠下埋戻し部の有効重量（gf）

Z_1：管の下端部から埋戻し部底面までの距離（cm）

Z_2：埋戻し部底面からその下のu_{d_2}計測点までの距離（cm）

γ_1'：管下方の埋戻し部の水中単位体積重量（gf／cm³）

γ_2'：管下方の原地盤部の水中単位体積重量（gf／cm³）

Dv：管路の変位量（cm）

○マンホール模型部分、安定処理土埋戻し部分の浮上がり安全率については次のように計算した。

1）上載土の自重Ws（gf）

模型・安定処理土ともに地表面まで達していることからWs＝0

2）管の自重Wm（gf）

マンホールについては次式のとおり、安定処理土については埋戻し部分の体積と投入量から求めた。

$$Wm=\frac{\pi D^2}{4}\cdot H\cdot\gamma_{ed} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.11)$$

ここで、H：マンホールの高さ（cm）

3）静水圧による浮力Us（gf）

$$Us=A\cdot Z\cdot\gamma_w \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.12)$$

ここで、A：模型の底面積（cm²）

Z：模型底面の深さ（cm）

4）模型底面での有効上載圧$\sigma v'$（gf／cm²）

$$\sigma_v' = \frac{(Ws+Wm)-Us}{A} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.13)$$

5）過剰間隙水圧による揚力Ud（gf）

模型底面の過剰間隙水圧をPMとすると、

$$Ud = PM \cdot A \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.14)$$

6）浸透水力に起因する力F（gf）

式（3．9）と同様の考え方で求めた。ただし、浸透水力Sは次式により求めた。

$$S = u_1 \cdot A - Ud \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.15)$$

ここで、u_1：土塊の底面に作用する過剰間隙水圧（gf／cm²）

また、マンホールについては最終的に、実際のマンホール模型（マンホール＋管渠）の全体の浮上がり安全率を次式により算定した。

$$Fu = \frac{\Sigma Ws + \Sigma Wm}{\Sigma Us + \Sigma Ud + \Sigma F} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (3.16)$$

ここで、ΣWs　：管渠模型上部の上載土の自重（gf）

ΣWm：マンホールと管渠の自重の合計（gf）

ΣUs　：マンホールと管渠それぞれにおける静水圧による浮力の合計（gf）

ΣUd　：マンホールと管渠それぞれにおける過剰間隙水圧による揚力の合計（gf）

ΣF　：マンホールと管渠それぞれにおける浸透水力に起因する力の合計（gf）

(3) 浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化

管渠・マンホール模型について一番顕著に浮き上がったケース4，A，Bにおける浮上がり安全率の計算結果を代表として表3．9(1)～(7)に、それぞれについての浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化の関係を図3．21に示す。管渠模型で一番浮き上がったケース4は、加振開始とともに浮上がりが始まっている。この時浮上がり安全率Fuも加振開始と同時に小さくなっている。また、Fu＜1となっている間では浮上がり量が大きくなっていることがわかる。加振終了後は、浮上がりがほぼ終了しこの時には安全率も1以上の値に回復していく傾向があった。マンホール模型のケースA，Bについても同様のことがいえる。原地盤が液状化しにくいケースAの方が無対策のケースBよりも加振加速度が大きいのにもかかわらず、加振後の安全率の回復が早い。これは、ケースAのほうが過剰間隙水圧が消散しきってしまう時間が短いためである。このことから、浮上がり安全率は過剰間隙水圧の大きさに最も影響されやすいということがわかる。

表3．9(1) 浮上がり安全率計算結果（ケース4、ステップ5）

＜初期状態＞ (ｹｰｽ4-STEP5-180gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 18.46 cm
2)管の外径 D = 11.5 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.823 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.650 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 4050.89 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.823 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 1.224 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB (gf/cm2) PM4F (gf/cm2)	PM4 (gf/cm2)	PM4E (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL4) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0	24769	19819	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	11779	0	1.454
1.0	0	24769	19819	9.971	10.756	10.509	10.412	10.412	6888	8.356	-1123	11779	0	1.079
2.0	0.27	24735	19800	12.368	12.823	13.590	12.927	12.954	8570	12.293	-88	11794	0	1.015
3.0	0.78	24671	19765	13.994	14.890	14.477	14.454	14.532	9613	14.619	474	11823	0	0.978
4.0	1.38	24595	19724	16.270	14.679	14.350	15.100	15.238	10079	15.514	626	11857	0	0.961
5.0	1.54	24575	19713	16.654	14.510	14.055	15.040	15.194	10050	14.798	161	11866	0	0.962
10.0	1.56	24572	19711	11.190	8.985	8.651	9.609	9.765	6459	8.535	-569	11867	0	1.094

表3．9(2) 浮上がり安全率計算結果（ケースA、ステップ3、管渠部分）

＜初期状態＞ (ｹｰｽA-STEP3-250gal 管渠部)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.99 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 43.5 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.814 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 737.96 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.814 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 10.0 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 5.0 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 1.244 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 1.009 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PMAF (gf/cm2)	PMAE (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	11663	7659	0.000	0.000	0.000	0.000	0				0	1.619
1.0	0.070	11660	7658	7.693	6.177	6.885	6.892	1760				0	1.316
2.0	0.190	11654	7654	11.921	10.729	11.325	11.344	2897				0	1.174
3.0	0.590	11635	7644	14.185	14.270	14.228	14.287	3649				0	1.096
4.0	1.470	11593	7621	15.385	15.535	15.460	15.607	3986				0	1.062
5.0	1.660	11584	7616	11.638	13.174	12.406	12.572	3210				0	1.138
10.0	1.260	11603	7626	4.884	5.840	5.362	5.488	1401				0	1.367

表3．9(3) 浮上がり安全率計算結果（ケースA、ステップ3、マンホール部分）

<初期状態>　　(ケースA-STEP3-250gal　マンホール部)

1)マンホールの外径　D = 16.5 cm
2)マンホールの高さ　H = 35.0 cm
3)管の見かけの単位体積重量　γcq = 1.100 gf/cm3
4)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
5)マンホールの自重　Wm = 8232.25 gf
6)模型底面積　A = 213.82 cm2
7)マンホール底面から原地盤までの距離　Z1 = 5.0 cm
8)埋戻し部底面からPLA計測点までの距離　Z2 = 5.0 cm
9)マンホール底面から原地盤までの有効単位体積重量　γ1' = 1.244 gf/cm3
10)原地盤の有効単位体積重量　γ2' = 1.009 gf/cm3
11)土塊の有効重量　T = 2408.735 g
(A·Z1·γ1'+A/Z2·γ2')

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	模型底面の深さ Z (cm)	静水圧による浮力 Us (=AZγw) (gf)	常時の浮上がり安全率 Fus (=Wm/Us)	模型底面の有効上載圧 σv' ((Wm-Us)/A) (gf/cm2)	マンホール底部の過剰間隙水圧 PM: PM-A (gf/cm2)	PM: 浮上による補正 (gf/cm2)	土塊底面の過剰間隙水圧 PL-A (gf/cm2)	浸透水力 S (gf)	浸透水力による力 F (gf)	過剰間隙水圧比 PM／σv'	動的揚圧力 Ud (=PM·A) (gf)	浮上がりに作用する力① Us+Ud+F (gf)	浮上り安全率 Fu (=Wm/①)
初　期	0.000	34.98	7480	1.101	3.520	0.000	0.000	0.000	0	0	0.00	0	7480	1.101
1.0	0.070	34.97	7478	1.101	3.527	9.107	9.114	7.828	-275	0	2.58	1949	9427	0.873
2.0	0.190	34.96	7476	1.101	3.539	14.168	14.187	13.328	-184	0	4.01	3034	10509	0.783
3.0	0.590	34.92	7467	1.102	3.579	17.854	17.913	16.627	-489	0	5.01	3830	11297	0.729
4.0	1.470	34.83	7448	1.105	3.667	17.721	17.868	18.177	66	0	4.87	3821	11269	0.731
5.0	1.660	34.81	7444	1.106	3.686	13.813	13.979	12.702	-273	0	3.79	2989	10433	0.789
10.0	1.260	34.85	7453	1.105	3.646	5.732	5.858	4.979	-188	0	1.61	1253	8705	0.946

表3．9(4) 浮上がり安全率計算結果（ケースA、ステップ3、模型全体）

CASEA

①管の自重　Wm= 737.96 gf
②マンホールの自重　W = 8232.25 gf
③Wm+W　W2= 8970.21 gf

step3(250gal)

加振開始からの時間 t (sec)	上載土の自重 Ws(gf) 管渠	上載土の自重 Ws(gf) マンホール	静水圧による浮力 Us(g) 管渠	静水圧による浮力 Us(g) マンホール	過剰間隙水圧による揚力 Ud(g) 管渠	過剰間隙水圧による揚力 Ud(g) マンホール	浸透水力に起因する力 F 管渠	浸透水力に起因する力 F マンホール	浮上がり安全率 Fu
初　期	11663		7659	7480	0	0	0	0	1.363
1.0	11660		7658	7478	1760	1949	0	0	1.095
2.0	11654		7654	7476	2897	3034	0	0	0.979
3.0	11635		7644	7467	3649	3830	0	0	0.912
4.0	11593		7621	7448	3986	3821	0	0	0.899
5.0	11584		7616	7444	3210	2989	0	0	0.967
10.0	11603		7626	7453	1401	1253	0	0	1.160

表3．9(5) 浮上がり安全率計算結果（ケースB、ステップ1、管渠部分）

<初期状態>　　(ケースB-STEP1-150gal　管渠部)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 24.00 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 43.5 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.817 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 737.96 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.817 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 10.0 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 5.0 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 1.237 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.945 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PMBF (gf/cm2)	PMBE (gf/cm2)	平均値* (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	11687	7662	0.000	0.000	0.000	0.000	0				0	1.622
1.0	1.150	11632	7632	0.383	16.593	16.593	16.708	4267				0	1.040
2.0	2.060	11589	7608	0.541	16.703	16.703	16.909	4318				0	1.034
3.0	2.990	11545	7584	0.488	16.206	16.206	16.505	4214				0	1.041
4.0	3.720	11511	7565	0.436	15.708	15.708	16.080	4106				0	1.050
5.0	3.800	11507	7563	0.121	15.155	15.155	15.535	3967				0	1.062
10.0	3.560	11518	7569	0.226	8.245	8.245	8.601	2196				0	1.255

*Udbの平均値の計算ではPMBFの値は用いていない。

表3．9(6) 浮上がり安全率計算結果（ケースB、ステップ1、マンホール部分）

<初期状態>　　(ケースB-STEP1-150gal　マンホール部)

1)マンホールの外径　D = 16.5 cm
2)マンホールの高さ　H = 35.0 cm
3)管の見かけの単位体積重量　γeq = 1.100 gf/cm3
4)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
5)マンホールの自重　Wm = 8232.25 gf
6)模型底面積　A = 213.82 cm2
7)マンホール底面から原地盤までの距離　Z1 = 5.0 cm
8)埋戻し部底面からPLA計測点までの距離　Z2 = 5.0 cm
9)マンホール底面から原地盤までの有効単位体積重量　γ1' = 1.237 gf/cm3
10)原地盤の有効単位体積重量　γ2' = 0.945 gf/cm3
11)土塊の有効重量　T = 2332.827 g
(A·Z1·γ1'+A/2·γ2')

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	模型底面の深さ Z (cm)	静水圧による浮力 Us (=AZγw) (gf)	常時の浮上がり安全率 Fus (=Wm/Us)	模型底面の有効上載圧 σv' ((Wm-Us)/A) (gf/cm2)	マンホール底部の過剰間隙水圧 PM PM-B (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	土塊底面の過剰間隙水圧 PL-B (gf/cm2)	浸透水力 S (gf)	浸透水力による力 F (gf)	過剰間隙水圧比 PM／σv'	動的揚圧力 Ud (=PM·A) (gf)	浮上がりに作用する力① Us+Ud+F (gf)	浮上り安全率 Fu (=Wm/①)
初期	0.000	35.00	7484	1.100	3.500	0.000	0.000	0.000	0	0	0.00	0	7484	1.100
1.0	1.150	34.89	7459	1.104	3.616	19.042	19.157	13.119	-1291	0	5.30	4096	11556	0.712
2.0	2.060	34.79	7440	1.107	3.706	19.202	19.408	14.552	-1038	0	5.24	4150	11590	0.710
3.0	2.990	34.70	7420	1.109	3.799	19.310	19.609	14.910	-1005	0	5.16	4193	11613	0.709
4.0	3.720	34.63	7404	1.112	3.872	19.202	19.674	14.731	-1036	0	5.06	4185	11590	0.710
5.0	3.800	34.62	7403	1.112	3.880	17.113	17.493	14.014	-744	0	4.51	3740	11143	0.739
10.0	3.560	34.64	7408	1.111	3.856	10.470	10.826	8.998	-391	0	2.81	2315	9723	0.847

表3．9(7)　浮上がり安全率計算結果（ケースB、ステップ1、模型全体）

CASEB

①管の自重　　Wm=　737.96 gf
②マンホールの自重　　W =　8232.3 gf
③Wm+W　　W2=　8970.2 gf

step1(150gal)

加振開始からの時間	上載土の自重 Ws(gf)		静水圧による浮力 Us(g)		過剰間隙水圧による揚力 Ud(g)		浸透水力に起因する力 F		浮上がり安全率 Fu
t (sec)	管渠	マンホール	管渠	マンホール	管渠	マンホール	管渠	マンホール	
初　期	11687		7662	7484	0	0	0	0	1.364
1.0	11632		7632	7459	4267	4096	0	0	0.878
2.0	11589		7608	7440	4318	4150	0	0	0.874
3.0	11545		7584	7420	4214	4193	0	0	0.876
4.0	11511		7565	7404	4106	4185	0	0	0.881
5.0	11507		7563	7403	3967	3740	0	0	0.903
10.0	11518		7569	7408	2196	2315	0	0	1.051

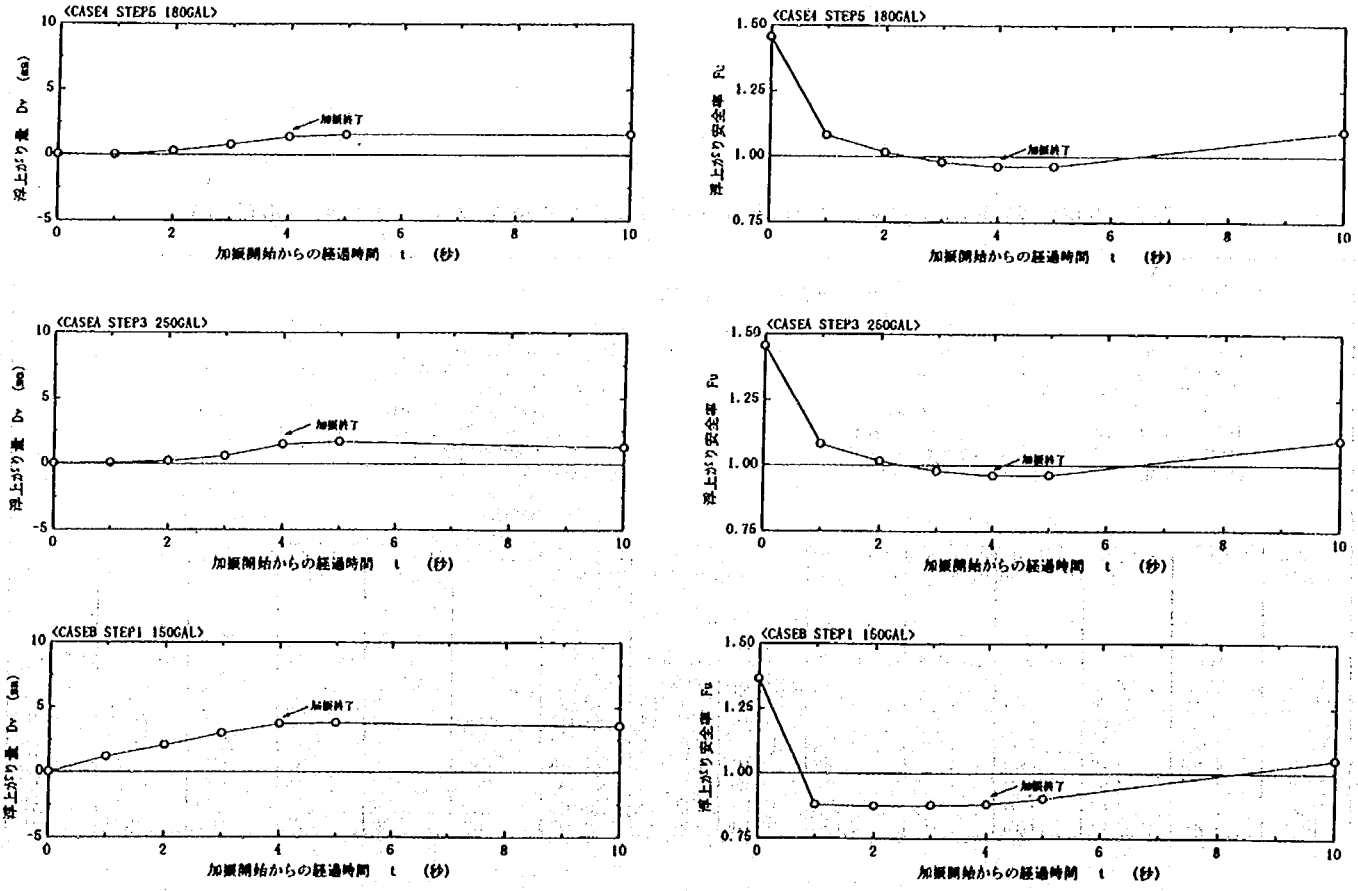


図3．21　浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化

(4) 浮上がり安全率と浮上がり量の関係

次に、ケース4，A，Bにおける浮上がり安全率と浮上がり量との関係を図3.22に示す。図中の数字は加振開始からの経過時間を示す。この図からも、先ほどと同様にFu＜1となった時点で急激に浮上がりが生じていることがわかる。また、どのケースにおいても加振が終了したにもかかわらず、Fu＜1で浮上がりが進行している時間がしばらくある。これは、過剰間隙水圧が消散し始めているものの、まだ模型を浮き上がらせるには十分な力が残っているということを示している。また、水圧の消散が進んでいくと模型はほぼ同じ位置か沈下する傾向にある。ケース4で沈下していないのは過剰間隙水圧の大きさがケースA，Bと比べて小さかったために、水圧消散時の影響を受けにくかったためである。浮上がり安全率と沈下量の関係は、これらのケースについては非常に相関の良いものであることがわかる。

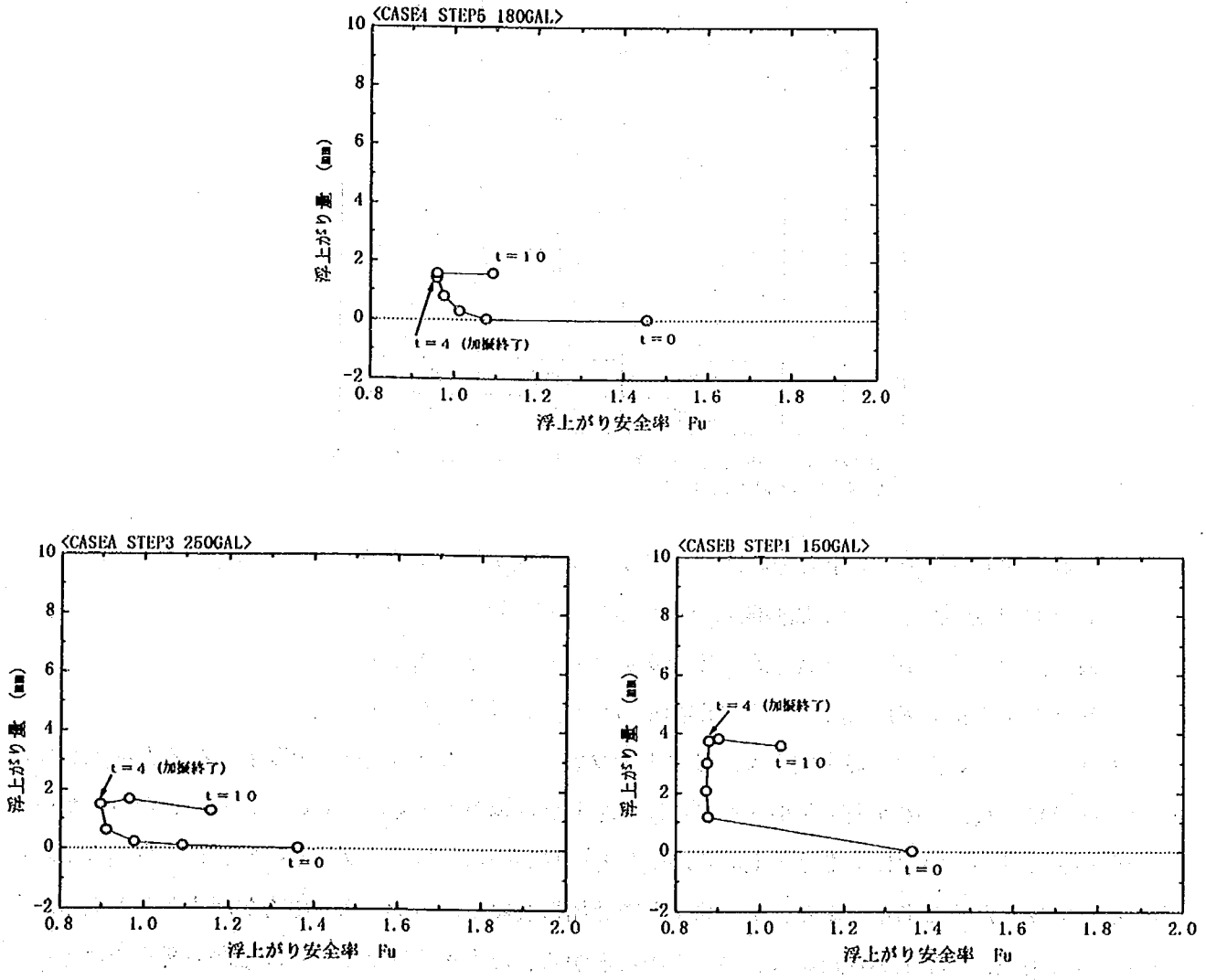


図3.22 浮上がり安全率と浮上がり量との関係

(5) 浮上がり安全率の妥当性

浮上がりが生じた各ケースにおける最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLO}の計算結果を表3.10に示し、それぞれの関係を図3.23に示す。

表3.10　最終浮上がり量と浮上がり安全率

CASE No.	STEP No.	最終浮上がり量 D_{uv} (mm)	浮上がり安全率 Fu 最小安全率 F_{umin}	浮上がり安全率 Fu リフトオフ安全率 F_{uLO}
1	9	0.339	0.923	0.970
	10	0.590	0.742	0.860
4*	5	1.374	0.962	1.015
	6	0.722	0.978	0.994
	7	7.333	0.934	0.950
	8	7.615	0.891	0.901
7	4	0.154	1.061	1.247
	5	4.251	0.985	1.011
A	3	0.985	0.912	1.095
	4	4.169	0.837	0.917
	5	85.000	0.813	0.881
B	1	4.911	0.874	0.878
	2	10.293	0.868	0.915
	3	10.297	0.848	0.848
	4	9.155	0.853	0.853
	5	36.083	0.791	0.796
C	1	3.256	1.030	1.030
	2	4.551	0.972	1.094
	3	5.290	0.984	0.984
	4	2.708	0.987	0.987
	5	25.405	0.920	0.950

*CASE4のstep9, 10は、管が浮き上がりきってしまったと思われるため、浮上がり計算には入れていない。

ここで、最終浮上がり量、最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLO}は次のように定義している。

最終浮上がり量　　：加振開始から40秒経過時の浮上がり量

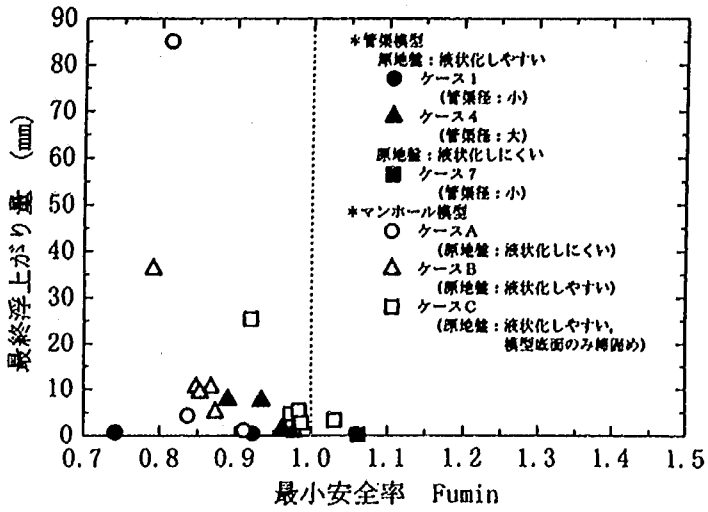
最小安全率F_{min}：浮上がり安全率を計算したときの最小値

リフトオフ安全率F_{uLO}：浮上がりが始まった時点の浮上がり安全率

管渠のケースについては、最小安全率，リフトオフ安全率ともに安全率が1.0以下になると浮上がりが生じる傾向が見られ、この安全率が小さくなるほど浮上がり量が大きくなっていることがわかる。ケース1は安全率が一番小さいのにあまり浮上がりが生じていないのは、ステップ加振の影響により浮き上がりにくくなっていたためである。また、ケース1と同じ加振履歴であるケース4の方が浮上がり安全率が大きいのにもかかわらず浮上がり量が大きい。このことから、浮上がり安全率から浮上がり量を予測することは困難であるということがわかる。

マンホールのケースについても、管渠の場合と同様な傾向を示している。管渠の場合は浮上がり安全率が1以下になったときに浮上がりが生じていたが、マンホールの場合は浮上がり安全率1付近で浮上がりの傾向が見られはじめ、安全率が0.9以下になると浮上がり量が増大する傾向にある。

最小安全率とリフトオフ安全率とでは有意な差は見られない。



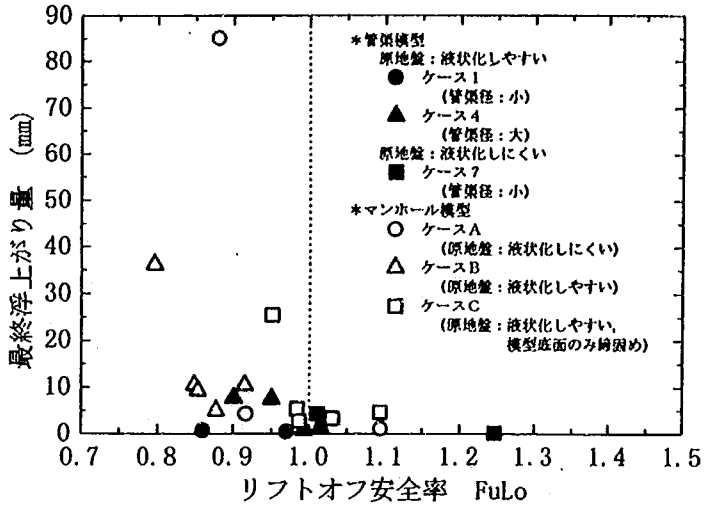


図3.23　最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLo}との関係

3.5. まとめ

(1) 管径の大きな管渠のほうが小さなものよりも大きな浮上がり量を示した。これに対し、砕石埋戻しのケースやコンクリート基礎の模型では、沈下する傾向にあった。浮上がり始めるときには、管直下の過剰間隙水圧は初期有効上載圧に達していた。管径の小さい管渠（ケース1）が管径の大きなケース（ケース4）と比べ極端に浮上がり量が小さかったのは、ケース1の近くに砕石を用いた排水性の高い埋戻し地盤（ケース2）があったために間隙水圧が上がりにくかったことが原因であったと考えられる。今回の実験では、模型配置の影響により浮上がり量に影響が出た可能性がある。

(2) マンホール模型では、管渠模型とは対照的に大きな浮上がりが生じた。浮き上がりが生じるときは、埋戻し部直下の原地盤のみを締め固めたケースCを除けば、マンホール直下と管渠直下の過剰間隙水圧が共に初期有効上載圧に達したときに浮き上がり始めていた（ケースCは測定値異常と思われるため不明）。埋戻し部分は、地表面及び底面から中央部にかけて、押し込められる様に変形していた。また、管渠部分の埋戻し部分の砂がマンホール部分に回り込んでいる現象が確認された。

(3) 各ケースについて浮上がり安全率Fuを求めたところ、浮き上がったケースではFu＜1となった時点で急激に浮上がり量が増加していることが確認された。また、この時の浮上がり安全率と浮上がり量との関係は相関が良かった。

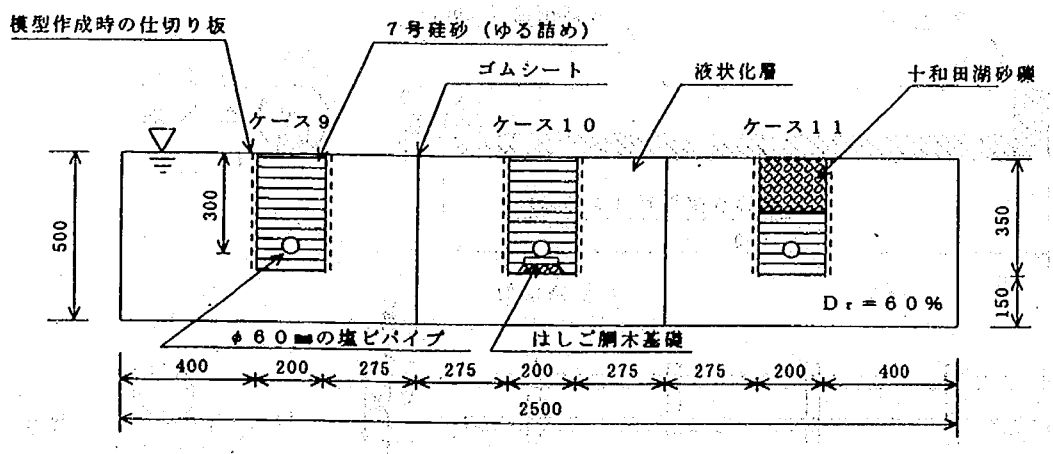
4．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その２）

4．1　実験目的

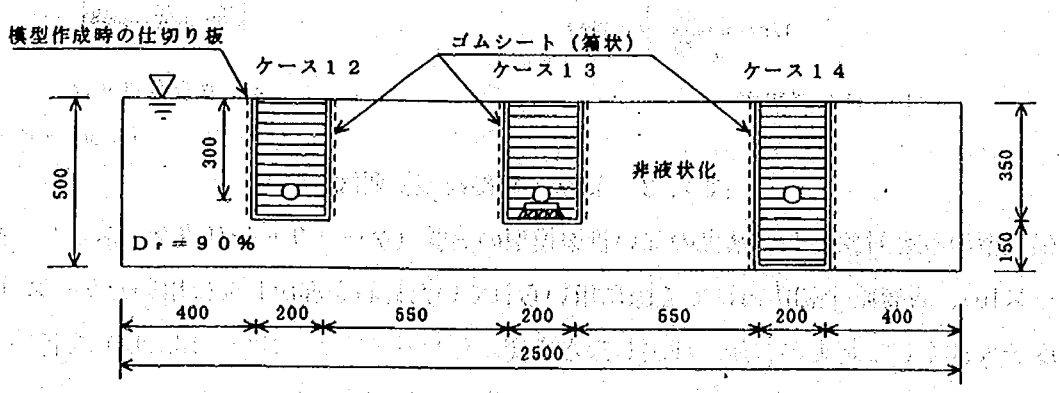
埋設された管路について原地盤が液状化しやすい場合としにくい場合について、管渠下の基礎の有無・埋戻し深さ等の違いが管路の浮上がりメカニズムに及ぼす影響について調べた。

4．2　実験模型

実験には、図4．1に示す２つの模型地盤を用いて、合計６ケースの模型について行った。各ケースの実験条件を表4．1にまとめて示す。また、実験に用いた管路模型と基礎の概要を図4．2に示す。



モデル５



モデル６　　（単位：㎜）

図4．1　模型地盤の概要

表4．1　実験条件

模型番号		模型形状	模型の比重	原地盤（豊浦砂）	埋戻し部	基礎の種類	加振条件
モデル5	ケース9	φ60mmの管渠模型	0.600	Dr=60%	珪砂（空中落下法 緩詰め）Dr=16%	なし	正弦波 5Hz
	ケース10				珪砂（空中落下法 緩詰め）Dr=20%	はしご胴木基礎	加振加速度
	ケース11				下部：珪砂（空中落下法 緩詰め）Dr=16% 上部：砕石 Dr=15%	なし	200gal 20波 306gal 20波
モデル6	ケース12			Dr=98%	珪砂（水中落下法 緩詰め）Dr=47%	なし	410gal 100波
	ケース13				珪砂（水中落下法 緩詰め）Dr=44%	はしご胴木基礎	
	ケース14				珪砂（水中落下法 緩詰め）Dr=52%	なし（埋戻し部が他よりも深い）	

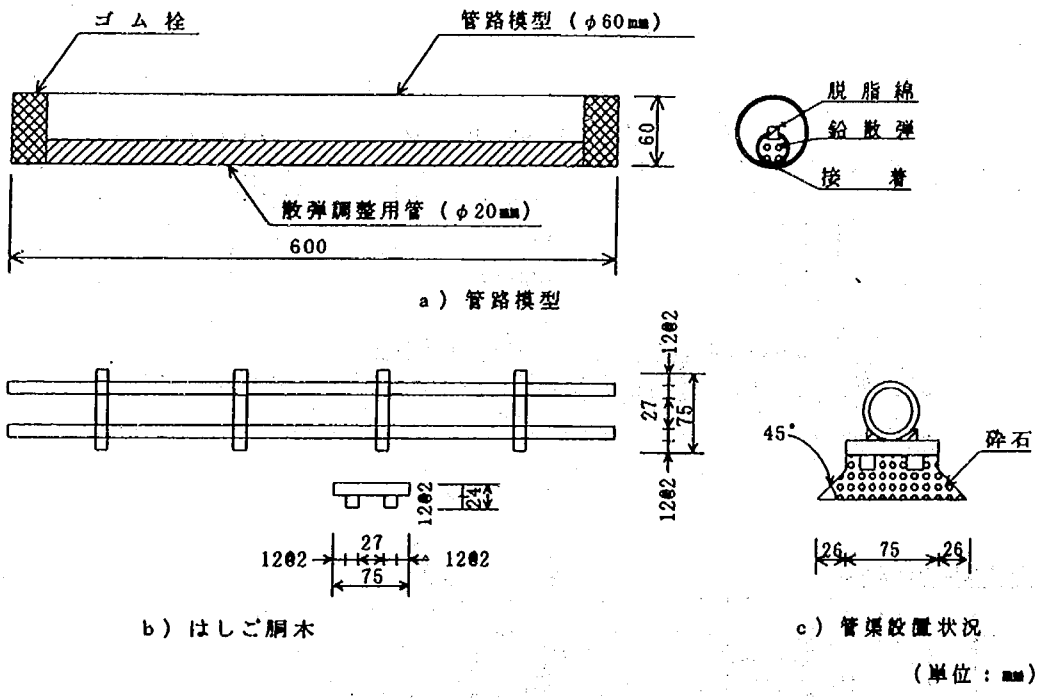


図4．2　管路・基礎模型概要図

実験は管渠模型のみを対象とし、基礎のない管渠模型の実験（ケース9）を基本ケースとし、基礎のあるケース（ケース10）、青森県十和田市にて実際に用いられていた砕石を埋戻し部に用いたケース（ケース11）、原地盤の密度を大きくして基礎の有無，埋戻し深さを変えたケース（ケース12，13，14）を行い、管渠下の基礎や埋戻し深さの影響が管渠の浮上がりにどのように影響を及ぼすのかを調べた。また、ケース11では三陸はるか沖地震（1994年12月）の際に被害を受けた時の埋戻し材料を用いて、この材料が管渠の浮上がりに及ぼす影響について調べた。

管渠模型，はしご胴木は3章の実験（その1）で用いたものと同様のものを用いている。（ただし、見かけの比重は0.6にしたものを用いている。）模型設置時には、基礎のない場合では管渠を直接埋戻し土の上に置き、基礎のある場合では実験（その1）と同様な方法で砕石基礎を作成した後にはしご胴木を設置し、その上に管渠模型を設置した。

4.3　実験方法

4.3.1　模型作成

実験に用いた地盤材料は、原地盤部は豊浦砂を埋戻し部には7号硅砂と十和田湖砂礫を用いた。地盤材料の物理試験結果を表4.2に、十和田湖砂礫の粒径加積曲線を図4.3に示す。豊浦砂と7号硅砂の粒径加積曲線は、図3.4に示したとおりである。十和田湖砂礫は、青森県十和田市の下水道の埋戻し材として用いられていたものであり、その概要[6]を図4.4に示す。埋戻し部は管渠周囲にはクッション用の砂を、その上部に十和田砂礫が用いられている。三陸はるか沖地震の時には、クッション砂部分が液状化し浮上がり被

表4.2　地盤材料の物理試験結果

試験項目			豊浦砂	7号硅砂	十和田湖砂礫	6号砕石	7号砕石
粒度試験	粗礫分	(%)			0.00		
	中礫分	(%)			21.72	0.00	0.00
	砂礫分	(%)	0.00		18.23	93.80	18.22
	粗砂分	(%)	0.30	0.00	38.12	0.00	3.23
	細砂分	(%)	99.60	96.01	17.68		
	シルト分	(%)	0.10	3.99	4.25		
	最大粒径	(mm)	0.85	0.425	26.50	19.00	9.50
	均等係数	Uc	1.80	1.53	11.18	1.62	1.73
	曲率係数	Uc'	1.08	0.85	1.00	0.92	0.94
砂の最大・最小密度	最大密度	ρ_{dmax} (g/cm³)	1.657	1.614	1.614		
	最小密度	ρ_{dmin} (g/cm³)	1.358	1.226	1.342		
土粒子の密度		ρ_s (g/cm³)	2.640	2.613	2.594		
備考			混合砕石（重量比6号：7号＝1：4）の比重D_D^*=2.741				

※D_Dは、JIS A 1110「粗骨材の比重および吸水率試験方法」により求めた絶対乾燥状態の比重

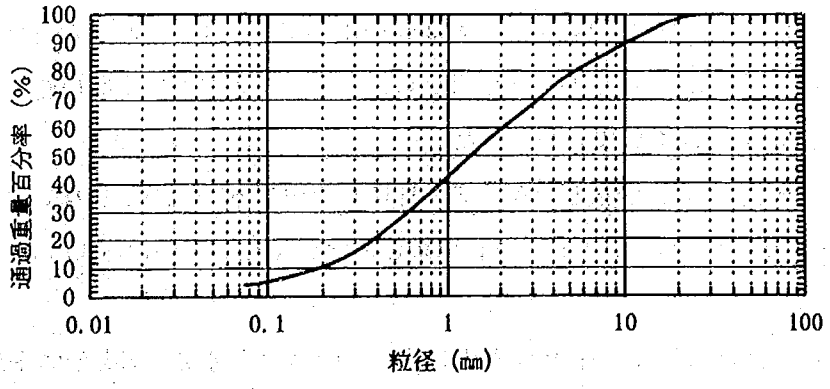


図4.3　十和田湖砂礫の粒径加積曲線

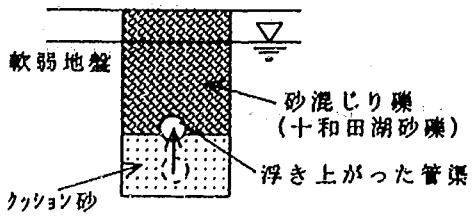


図４．４　十和田市における下水道管渠の概要

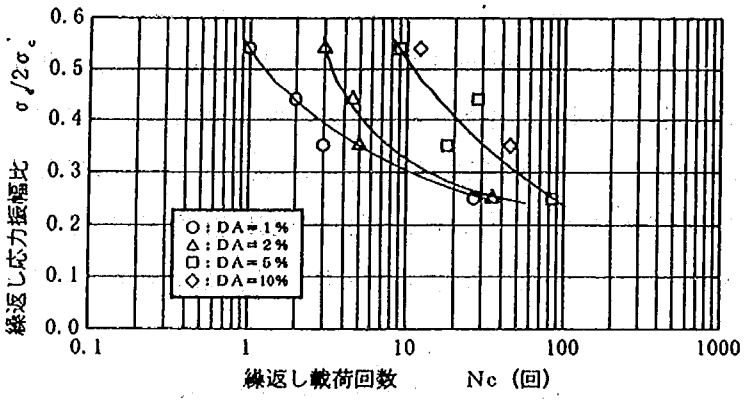


図４．５　十和田湖砂礫の非排水繰返し三軸試験結果

害が生じたと推測されている。十和田湖砂礫の非排水繰返し三軸試験の結果[28]を図４．５に示す。なお、供試体作成時の平均相対密度は約65％である。繰返し回数20回で両振幅軸ひずみ（DA）が５％に達する応力比は約0.4であることから、十和田湖砂礫は豊浦砂（Dr＝80％：DA＝５％で繰返し回数20回になるときの応力比は約0.2）よりも動的強度が大きな材料であることがわかる。なお、この試験は実際に被害を受けた下水道管渠の埋戻し部の相対密度が65％程度であると仮定して行ったものである。したがって、この試験よりも実際の相対密度が小さかった場合には動的強度は小さくなる可能性がある。

模型の作成方法は以下のとおりである。

(1)（その１）実験と同様に図３．５の土槽を２つ振動台上に設置した。

・原地盤部が液状化しやすい場合（モデル５）

(2)　原地盤については、ホッパーに気乾状態の豊浦砂を用いてDr＝60％程度の液状化地盤を作成した。（地盤の密度は、あらかじめ密度検定をした結果から、ホッパーのスリット開口幅：6.0mm、落下高さ：104cm、移動速度：25cm／secで砂まきを行った。）

実験（その１）の反省から、隣接したケースの埋戻し部分に水が流れ込まないように図４．６に示すゴムシートを設置した。（なお、ゴムシートは原地盤の流動についていけるように、長さに余裕が持たせてある。）

ホッパーを用いて原地盤部を15cm作成したところで、原地盤と埋戻し部を分けるための仕切り板（67cm×45cm、厚さ３mmの鉄板）を設置した。

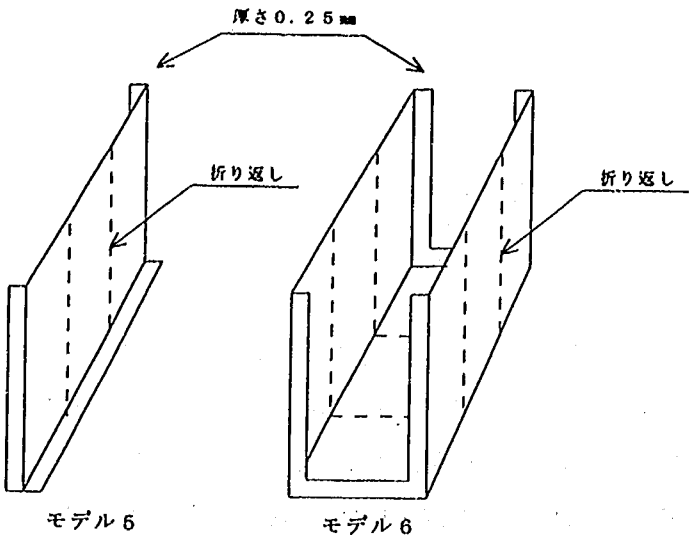


図4.6　ゴムシート概要図

(3) 仕切り板設置後に、原地盤とケース9，11の埋戻し部をそれぞれ5㎝作成したところでケース10の基礎を設置し、表4.1に示す見かけの比重0.600になるように重量調整を行った管渠模型を土層側面に触れないように設置した。埋戻し部に用いた硅砂（7号硅砂）は、埋戻し部分の変形状況を目視で確認できるように普通の硅砂(白色)と朱色に染めた硅砂を用いている。また、砕石部分には十和田湖砂礫（表4.2、図4.3参照）を用いている。埋戻し部分については極力密度が小さくなるように漏斗を用いて空中落下（十和田湖砂礫は手）で投入した。

(4) 原地盤と埋戻し部を10㎝ずつ作成してゆき、完成後に地盤にあまり影響を与えないように静かに仕切り板を引き抜き、地表面の仕上げを行った。

(5) 変形状況を記録するために、アクリル板に接する原地盤・埋戻し部に染色砂を用いて底面から10，30㎝の位置に横メッシュを、埋戻し部と原地盤の境界に縦メッシュを描いた。染色砂は、原地盤部は豊浦砂，埋戻し部は硅砂に墨汁をまぶして炉乾燥させて作成した。埋戻し部分はメッシュの他に、(3)で述べたように色を染めた硅砂と染めない硅砂を交互に入れて観察しやすいようにしている。

・原地盤部が液状化しにくい場合（モデル6）

(2) あらかじめ土槽に仕切り板を設置し、土槽内に水を高さ30㎝入れ原地盤部に相対密度100％，高さ15㎝相当の豊浦砂をホッパーで投入し、その後振動台の加振（最大加速度500gal）による締固めを行った。メッシュの位置は原地盤部が液状化しやすい場合と同じ位置に描いた。

(3) 水中落下高さが30㎝になるように水位を調整しながら、豊浦砂の投入・振動台の加振を繰り返した。完成後、地盤中の水位を0㎝にし、水締めを行った。

(4) 水締め後埋戻し部分を掘削し、仕切り板を静かに引き抜いた。埋戻し部掘削時には、原地盤部と埋戻し部の境界から原地盤の崩壊が起こらないように慎重に行った。仕切り板撤去後、加振時の過剰間隙水圧の移動を防ぐためのビニールシート（図4.6参照、地盤の変形についていけるように、長さに余裕が持たせてある。）を設置した。その後、ケース13の基礎作成し、埋戻し部の埋戻しを行った。

埋戻し部は、水中落下高さが20cmになるように水位を調整しながら①極力密度が小さくなるように、②ゴムシートが変形しないように、ということについて十分注意しながら水中落下法で埋戻しを行った。埋戻しに用いた硅砂は、モデル5と同様に色の付いたもの（朱色）とついていないものを用いた。また、所定の深さに達した時点で管渠模型を設置し引き続き埋戻し部を作成していった。

・全モデル共通

(6) (2)～(5)の操作途中で、地盤中の所定の位置に加速度計・間隙水圧計を埋設した。（原地盤が液状化しないモデル6では、あらかじめセンサーを糸で固定してから原地盤と埋戻し部を作成している。）地盤が液状化したときにこれらのセンサーが沈下することを防ぐために、センサーのまわりに発泡スチロールをつけて見かけの比重を1.9gf/cm³に調整した。加速度計は、加振中のセンサーの向きの変化を最小限に抑えるためにアクリル板を2枚はり付けて使用した（図3.7参照）。また、管路模型には地中での状況を知るために模型にワイヤーを付け地盤表面にワイヤーを出し変位計を取り付けた。

(7) 土槽底部から二酸化炭素を注入し、模型地盤内の空気と置換した。地盤表面に二酸化炭素が上がってくるまで、約3時間注入を続けた。

(8) 土槽底部から脱気水を注入し、模型地盤を飽和させた。飽和時間は、水位が地盤の表面と一致するまで約6時間かけて行った。なお、マンホールの基礎に使用したはしご胴木については、地盤作成前に水に浸けて真空ポンプで脱気し、完全飽和状態にして実験に用いた。

4.3.2 加振および計測

加振は5Hzの正弦波を入力波として、ステップ加振を行った。各実験における加振条件を表4.3に示す。（その1）実験のモデル1，2では繰返し加振の影響により管渠模型が浮き上がりにくかったものと考えられたので、今回は加振の影響をあまり受けないように加振回数を減らして行っている。

表4.3 加振条件

項目 / モデルNo.	ステップNo.	目標加速度 (gal)	加振周波数 (Hz)	入力波形	加振時間 (秒)
5 ・ 6	1	200	5Hz	正弦波	4
	2	300			
	3	400			20

各模型地盤の計器配置を図4.7に示す。原地盤と管渠・マンホール模型の加速度、原地盤と埋戻し部の間隙水圧、管渠・マンホール模型の下端に生じる過剰間隙水圧、管渠・マンホール模型の浮上がり量等を計測するために加速度計，間隙水圧計，変位計を用いている。使用したセンサーの仕様を表4.4に示す。

加振実験中の計測は64chのデジタルデータレコーダを用いて、加振直前から過剰間隙水圧が消散するまで行った。収録されたデータは、実験後に大型計算機を用いて図化処理を行っている。また、各加振後に地盤表面高さの測定と、側面のアクリル板を通して変形状況を記録した。

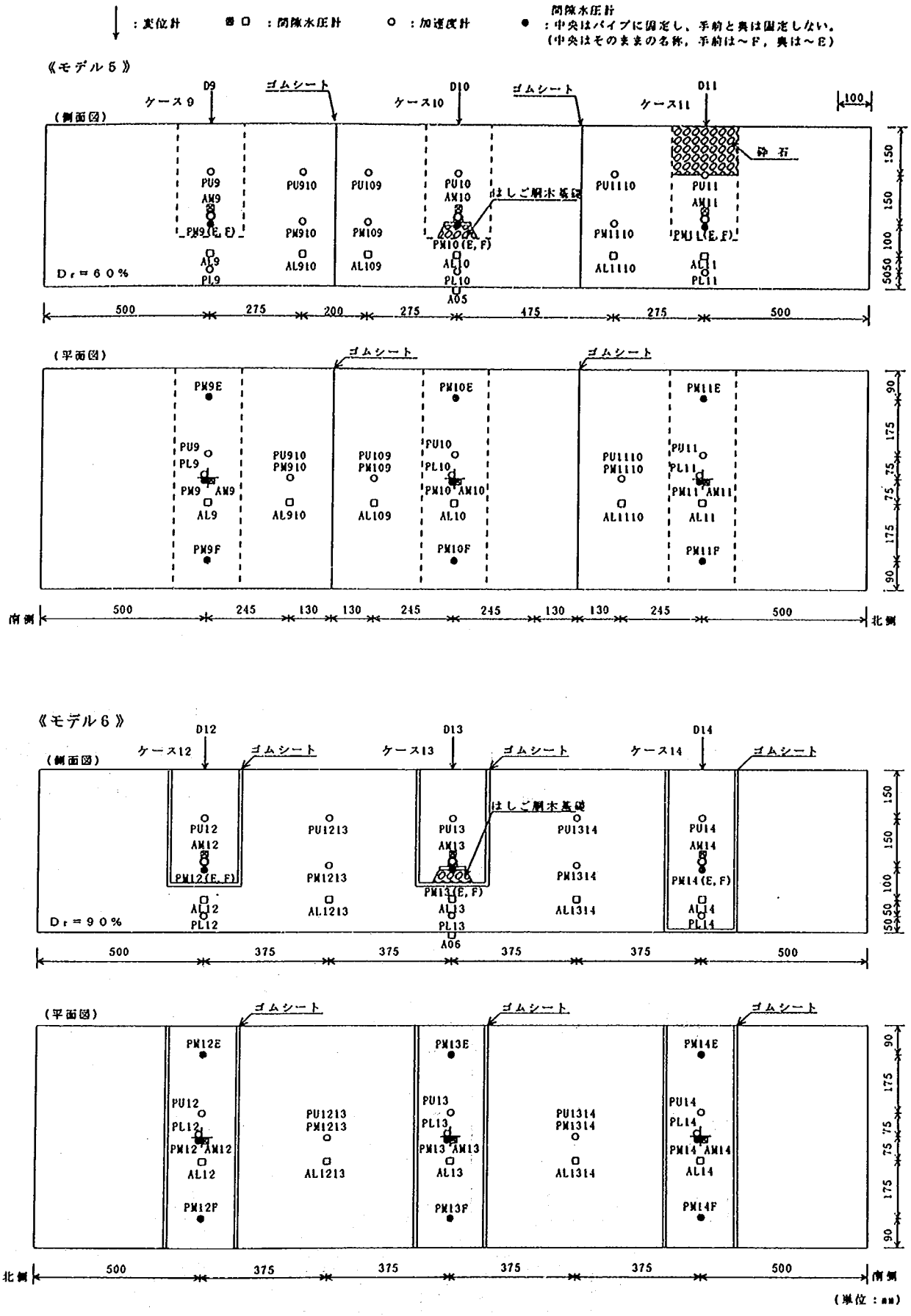


図４．７　各模型の計器配置

表4．4　センサーの仕様

計器名	記号	設置位置	時刻歴の符号	仕様
加速度計	AT-＊	振動台	図4.7の北向き＋	共和電業　AS-2GA 容量：2G
	AM-＊	管渠模型		
	AL-＊	原地盤部（埋戻し部直下400mm）		
間隙水圧計	PU-＊	埋戻し部上部（150mm）	増加＋	・管渠模型直下のみ SSK 容量：0.1～0.5kgf/cm²
	PM-＊	管渠模型直下		
	PM-＊P,B	埋戻し部（管渠模型直下）		
	PL-＊	原地盤部（埋戻し直下450mm）		
	PU-＊＊	原地盤部（150mm）		・その他 共和電業 容量：0.5～1kgf/cm²
	PM-＊＊	原地盤部（300mm）		
	PL-＊＊	原地盤部（450mm）		
変位計	D-＊	管渠模型	浮上がり－	共和電業　50mm, 30mm

加速度計は全て水平方向に設置した。記号の中の＊には、センサー番号が入る。

実験終了後には地盤内を掘削して、模型の浮上がり状況やそれに伴う周辺地盤の挙動を把握するために、目視による測定を行った。

4．4　実験結果および考察

模型地盤の作成結果を表4．5に示す。原地盤部はほぼ目標の相対密度（モデル5：60%，モデル6：100%）の地盤を作成することができた。埋戻し部分についても各モデルの中ではほぼ均一に作成することができたが、モデル5と6を比べると相対密度で約30%の違いが生じた。これは地盤の作成方法の違い（モデル5：落下高さ0cmの空中落下法，モデル6：水中落下高さ20cmの水中落下法）によるものである。水中落下法による地盤の作成方法（落下高さ、ホッパーの開口幅、ホッパーの移動速度等）に課題が残る結果となった。

表4．5　模型地盤作成結果

項目				乾燥密度 (g/cm³)	相対密度 (%)
モデル5	原地盤		（豊浦砂）	1.523	60
	埋戻し地盤	ケース9	（硅砂）	1.276	16
		ケース10	（硅砂）	1.288	20
		ケース11	（上部：砕石）	1.377	15
			（下部：硅砂）	1.275	16
モデル6	原地盤		（豊浦砂）	1.650	98
	埋戻し地盤	ケース12	（硅砂）	1.382	47
		ケース13	（硅砂）	1.372	44
		ケース14	（硅砂）	1.402	52

項目	豊浦砂	7号硅砂	十和田湖砂礫
ρ_{dmax} (g/cm³)	1.657	1.614	1.614
ρ_{dmin} (g/cm³)	1.358	1.226	1.342
ρ_s (g/cm³)	2.640	2.613	2.594

4．4．1　実験データの時刻歴

各模型における加速度・間隙水圧・浮上がり量の測定データ主なものを（200gal、400gal加振時）の時刻歴を図4．8(1)～(4)に示す。なお、各間隙水圧計の設置位置における初期有効上載圧を表4．6に示す。

表4．6　初期有効載圧

モデルNo.	センサーNo.	深度 (cm) GL.－	原地盤	埋戻し	砕石	管路	σv' (gf/cm2)
モデル5	PU-9	15		15			11.815
	PU-10	15		15			11.926
	PU-11	15			15		12.692
	PU-910	15	15				14.192
	PU-109	15	15				14.192
	PU-1110	15		24		6	14.192
	PM-9	30		24		6	16.504
	PM-9E	30		24		6	16.504
	PM-9F	30		24		6	16.504
	PM-10	30		24		6	16.682
	PM-10E	30		24		6	16.682
	PM-10F	30		24		6	16.682
	PM-11	30		9	15	6	17.376
	PM-11E	30		9	15	6	17.376
	PM-11F	30		9	15	6	17.376
	PM-910	30	30				28.383
	PM-109	30	30				28.383
	PM-1110	30	30				28.383
	PL-9	45	10	29		6	29.904
	PL-10	45	10	24	5	6	32.628
	PL-11	45	10	14	15	6	30.772
モデル6	PU-12	15		15			12.797
	PU-13	15		15			12.704
	PU-14	15		15			12.982
	PU-1213	15	15				15.375
	PU-1314	15	15				15.375
	PM-12	30		24		6	18.075
	PM-12E	30		24		6	18.075
	PM-12F	30		24		6	18.075
	PM-13	30		24		6	17.926
	PM-13E	30		24		6	17.926
	PM-13F	30		24		6	17.926
	PM-14	30		24		6	18.371
	PM-14E	30		24		6	18.371
	PM-14F	30		24		6	18.371
	PM-1213	30	30				30.750
	PM-1314	30	30				30.750
	PL-12	45	10	29		6	32.590
	PL-13	45	10	29	5	6	38.404
	PL-14	45		39		6	31.353

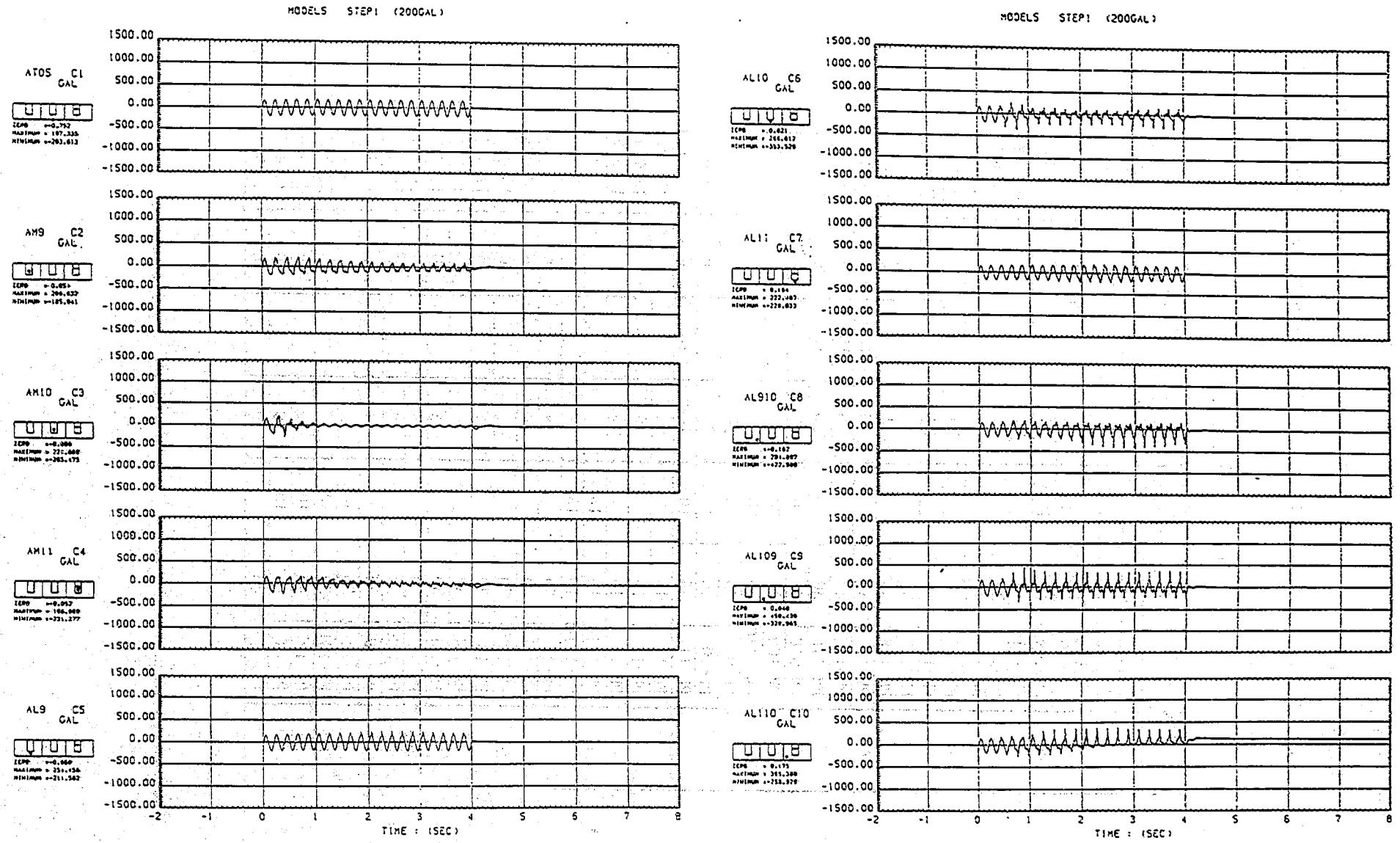


図4.8(1) 測定データの時刻歴（ケース9、10、11：200gal）

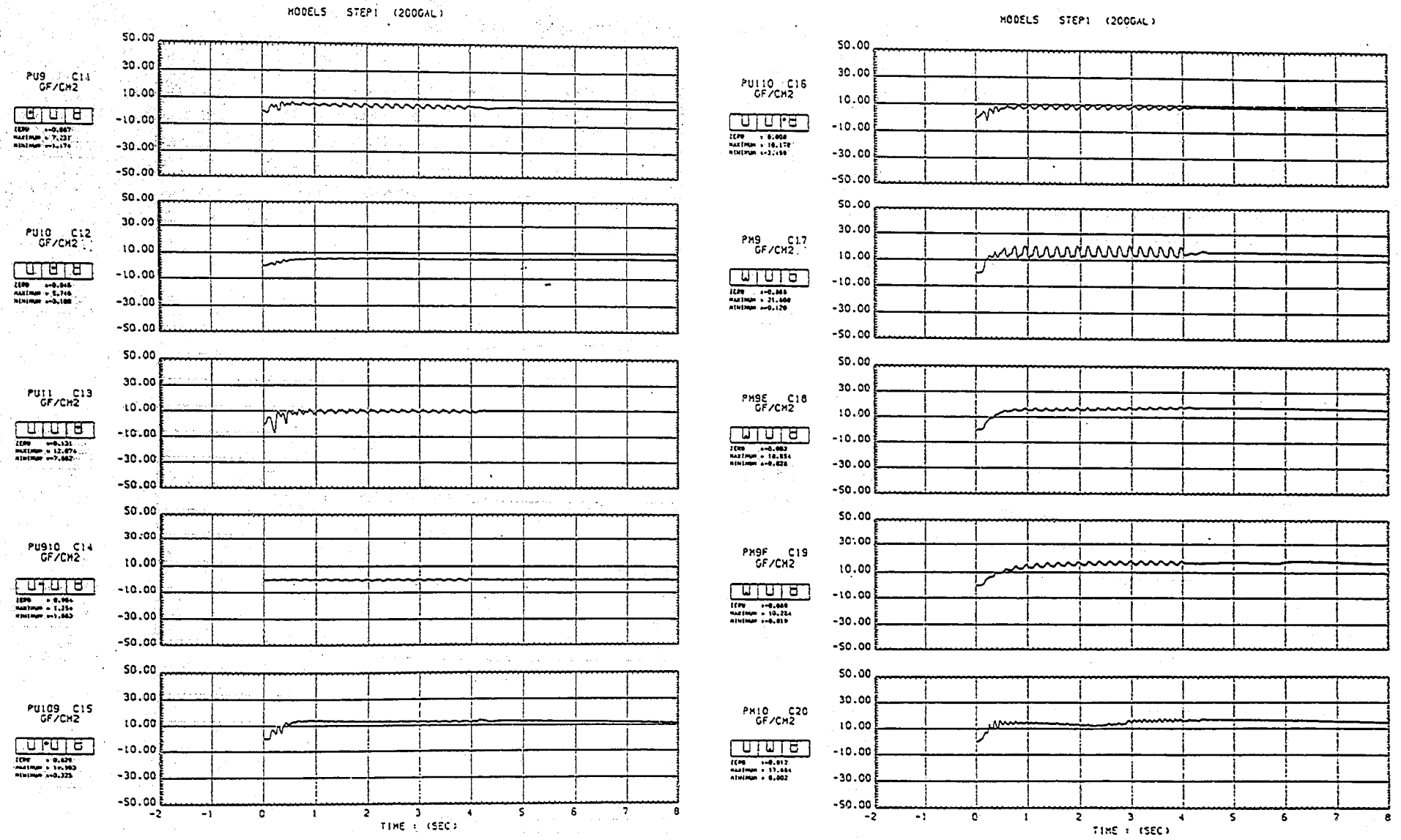


図４．８(1)　測定データの時刻歴（ケース９、10、11：200gal）

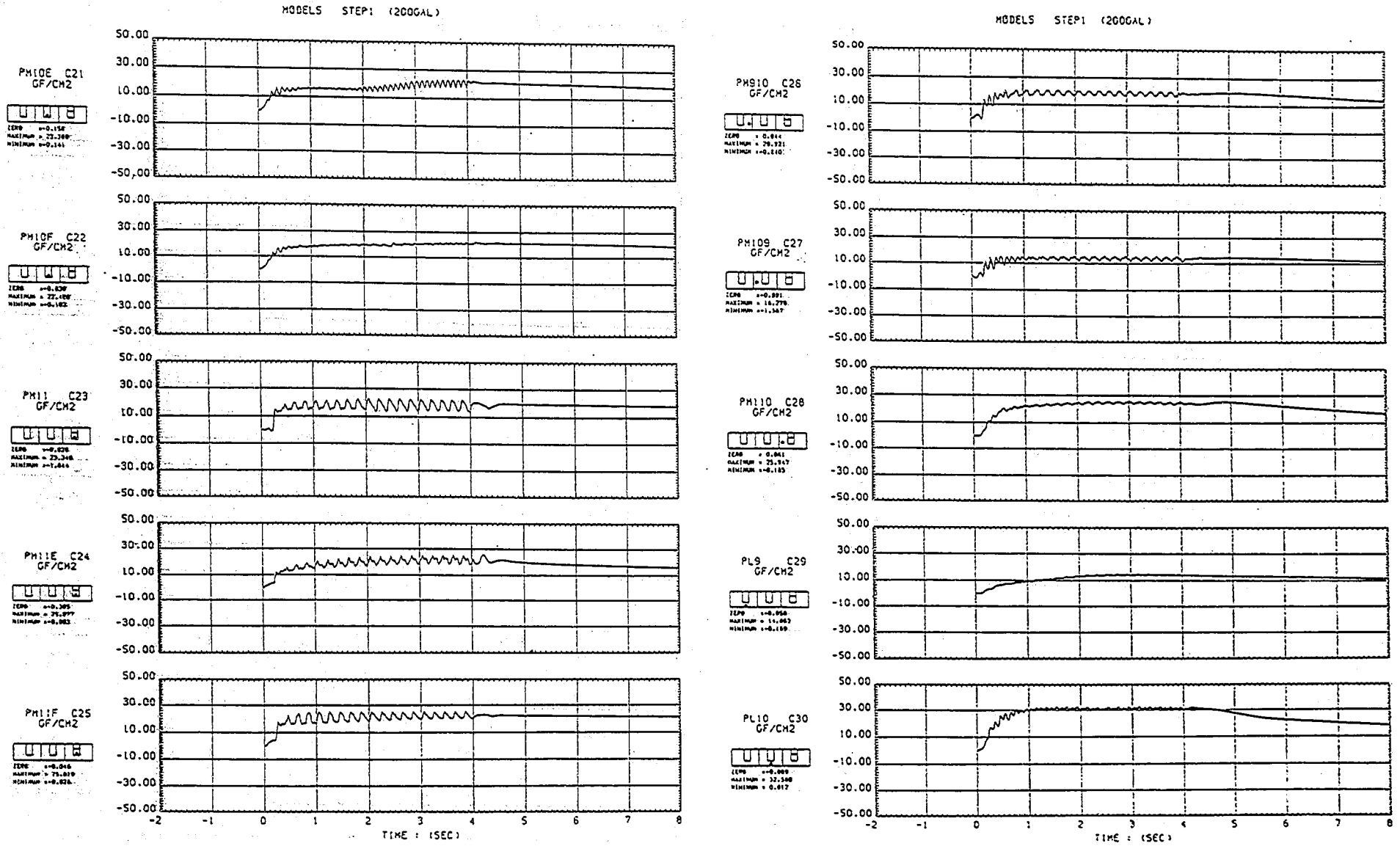


図4.8(1) 測定データの時刻歴（ケース9、10、11：200gal）

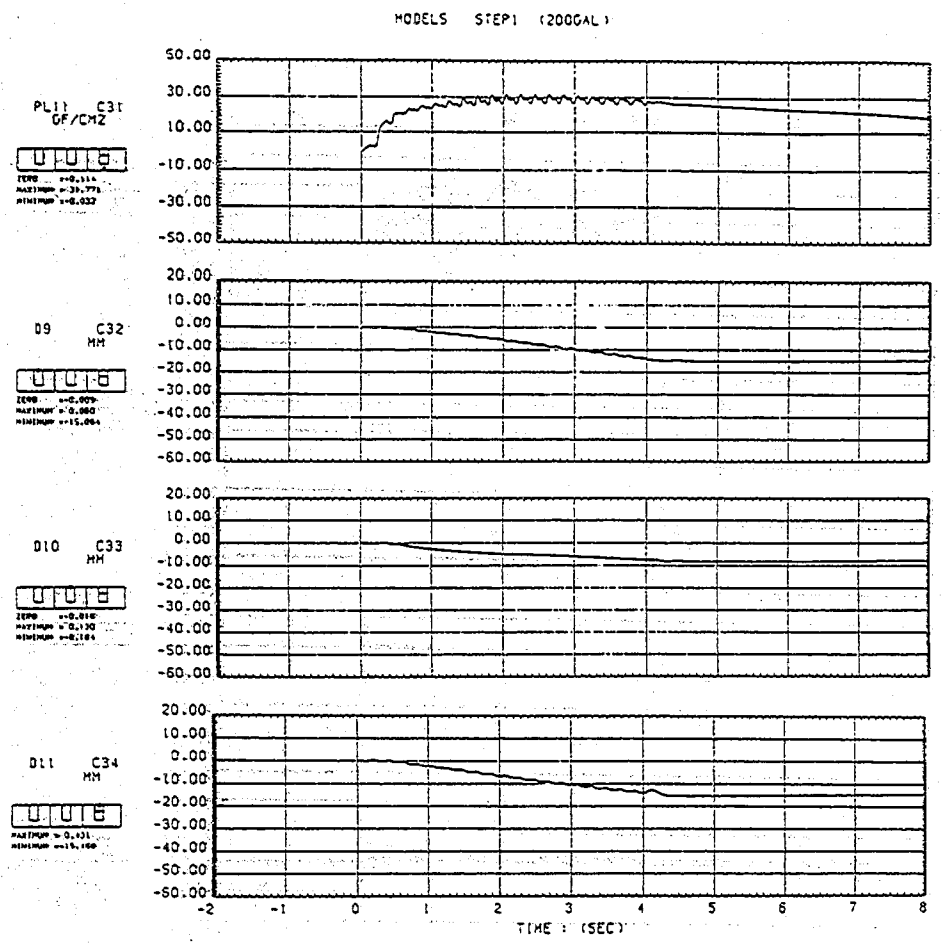


図4．8(1) 測定データの時刻歴（ケース9、10、11：200gal）

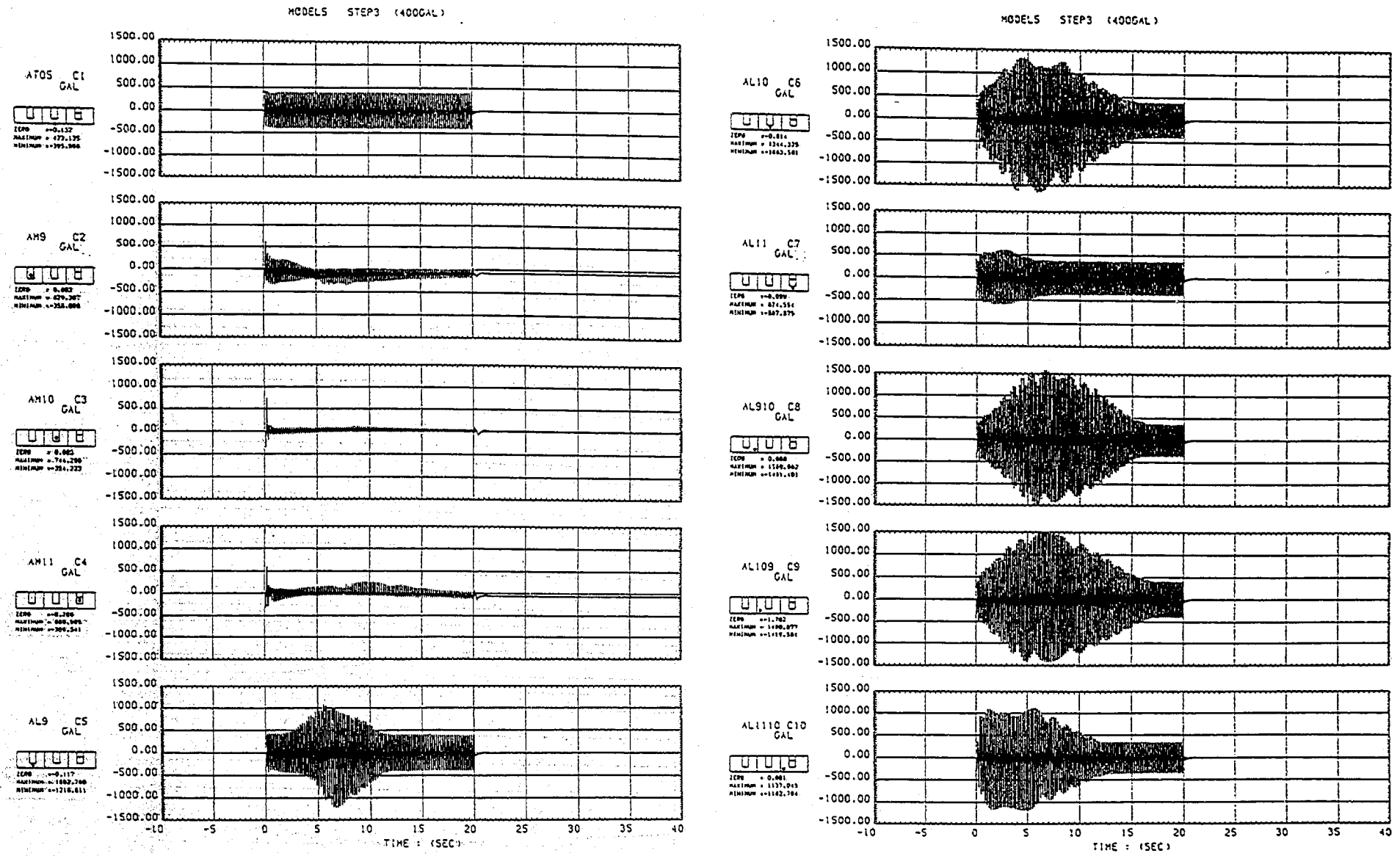


図4．8(2) 測定データの時刻歴（ケース9、10、11：400gal）

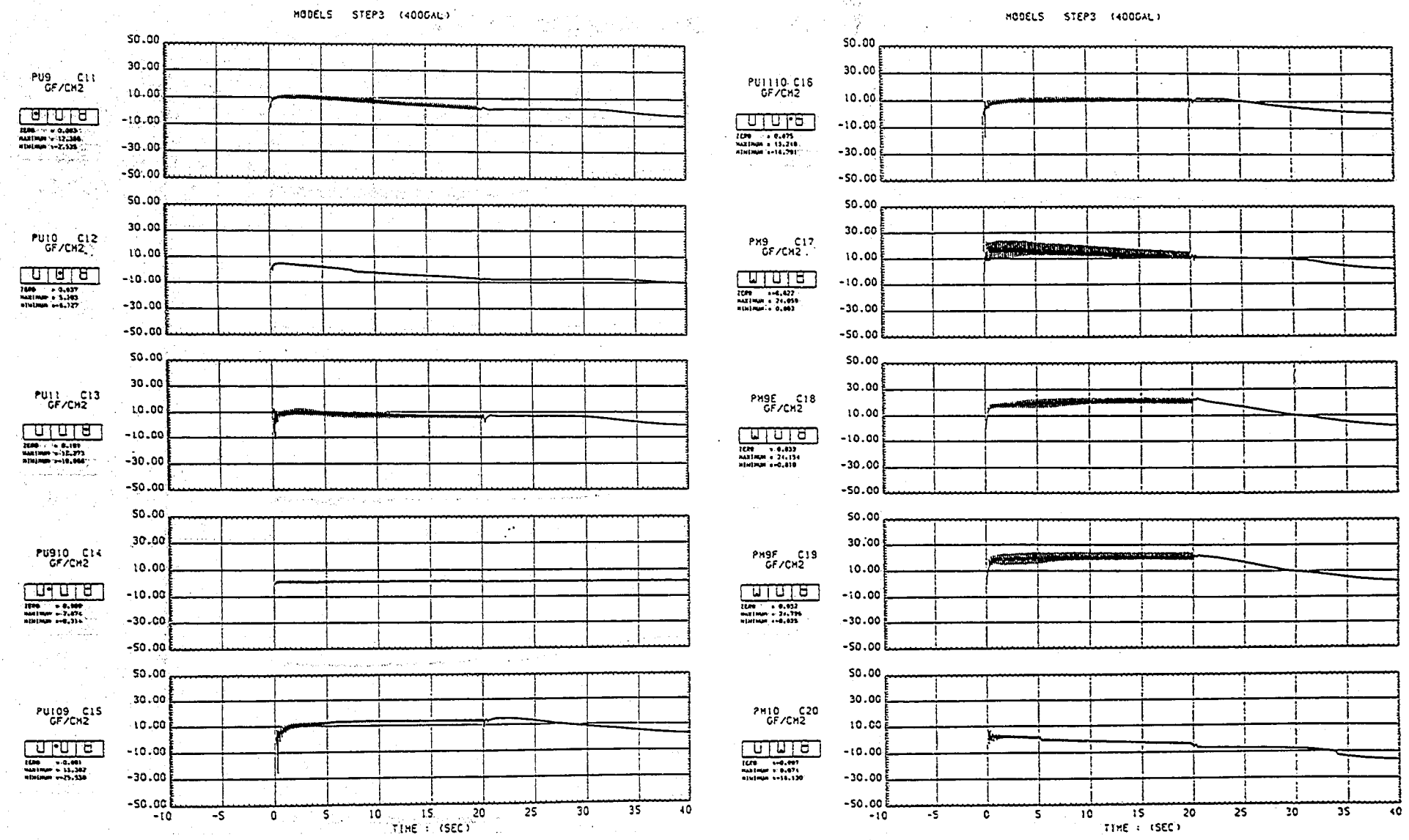


図４．８(2)　測定データの時刻歴（ケース９、10、11：400gal）

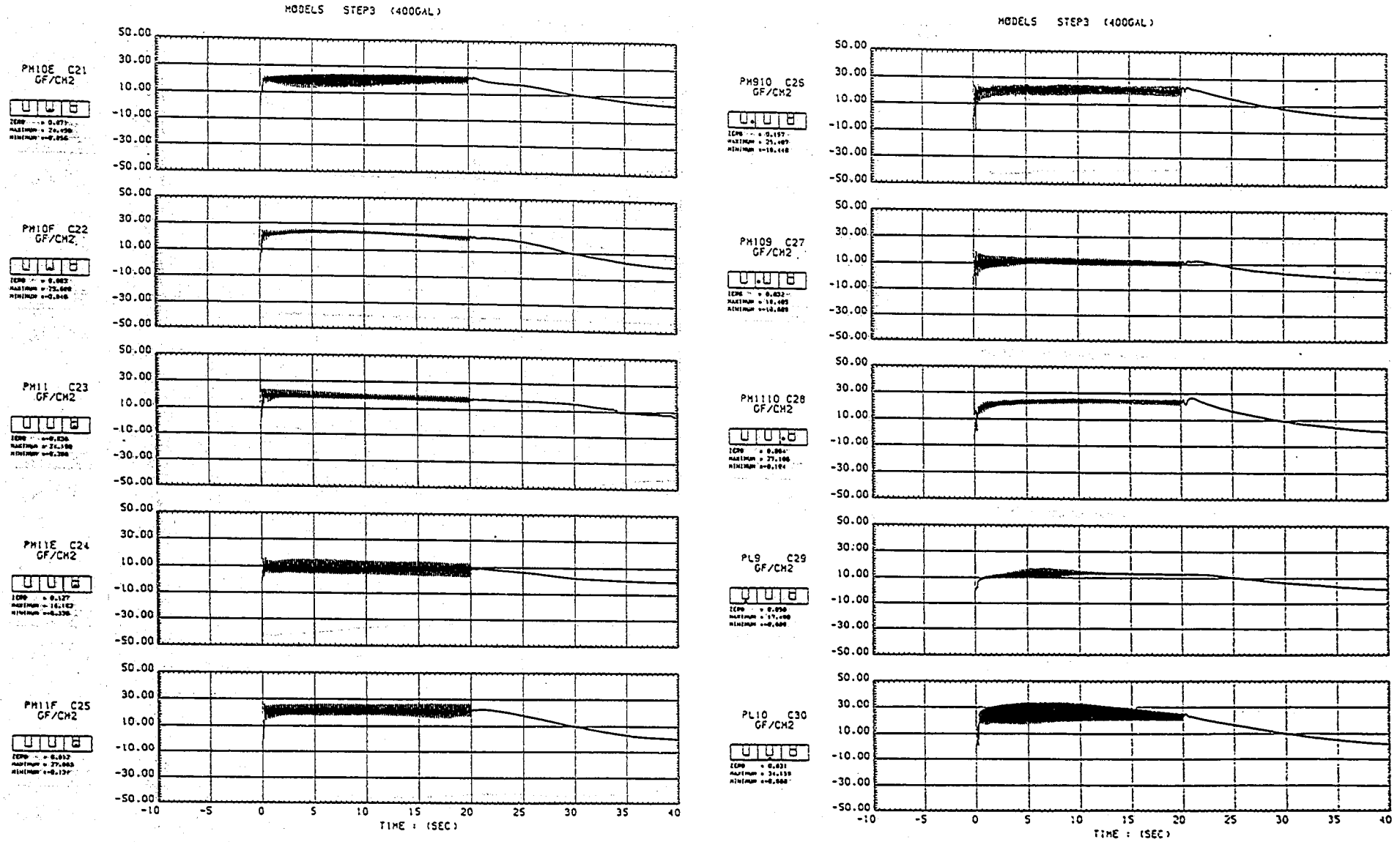


図４．８(2)　測定データの時刻歴（ケース９、10、11：400gal）

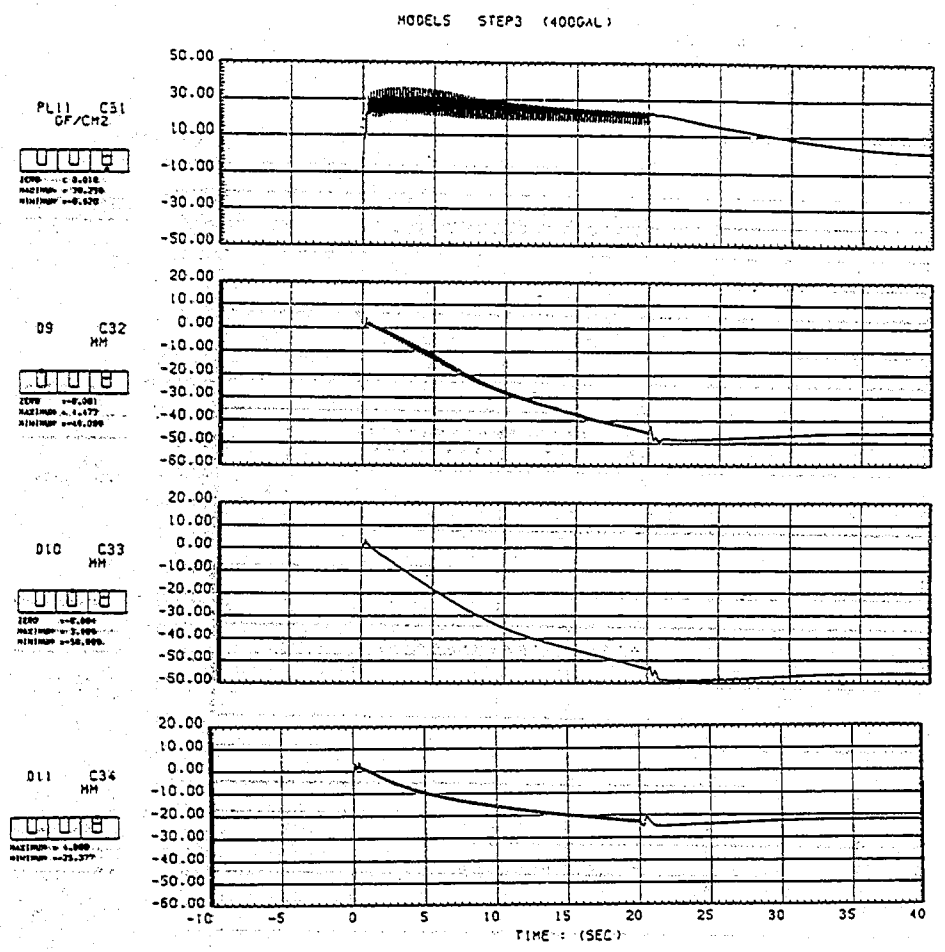


図4.8(2) 測定データの時刻歴（ケース9、10、11：400gal）

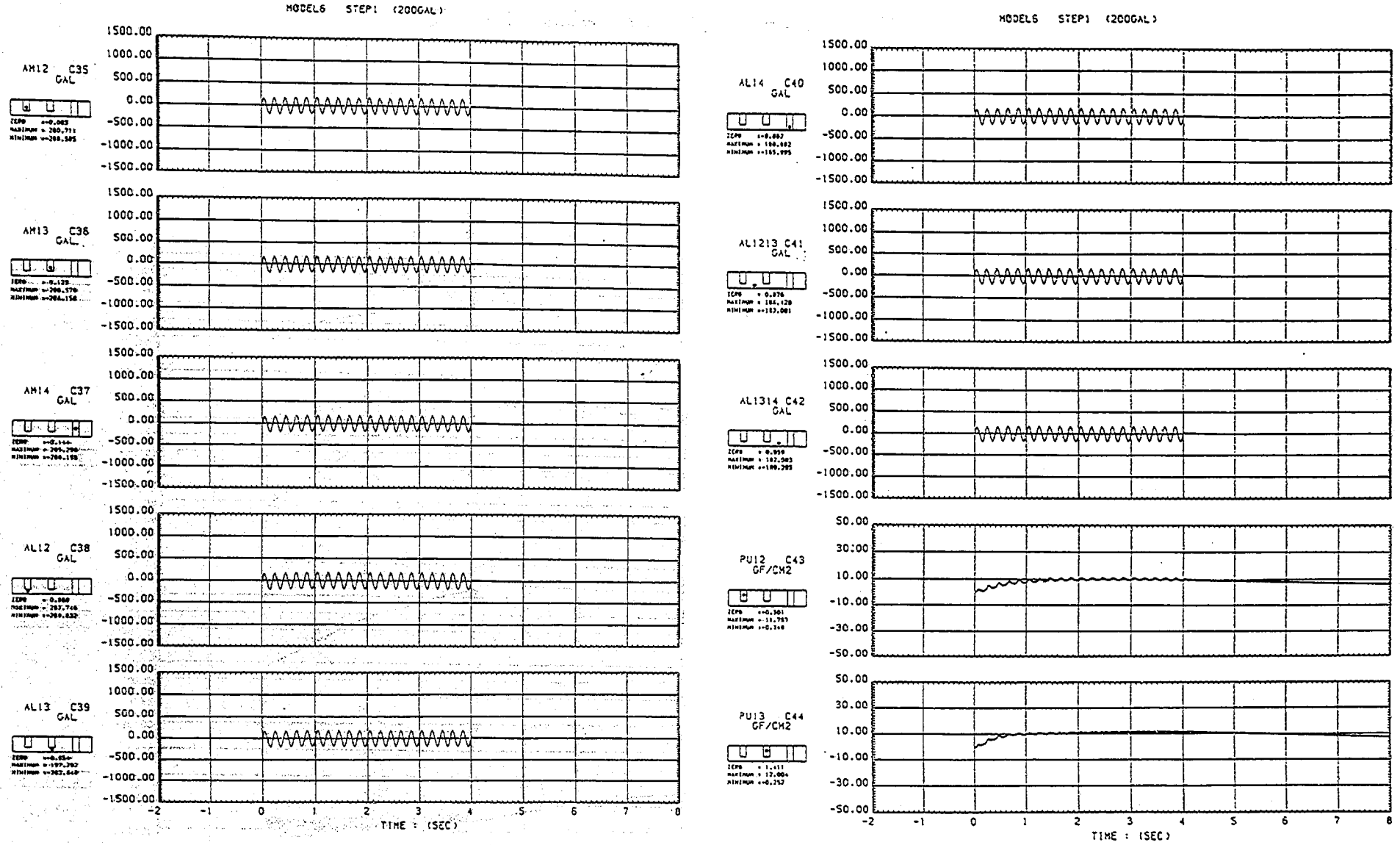


図4．8(3) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：200gal）

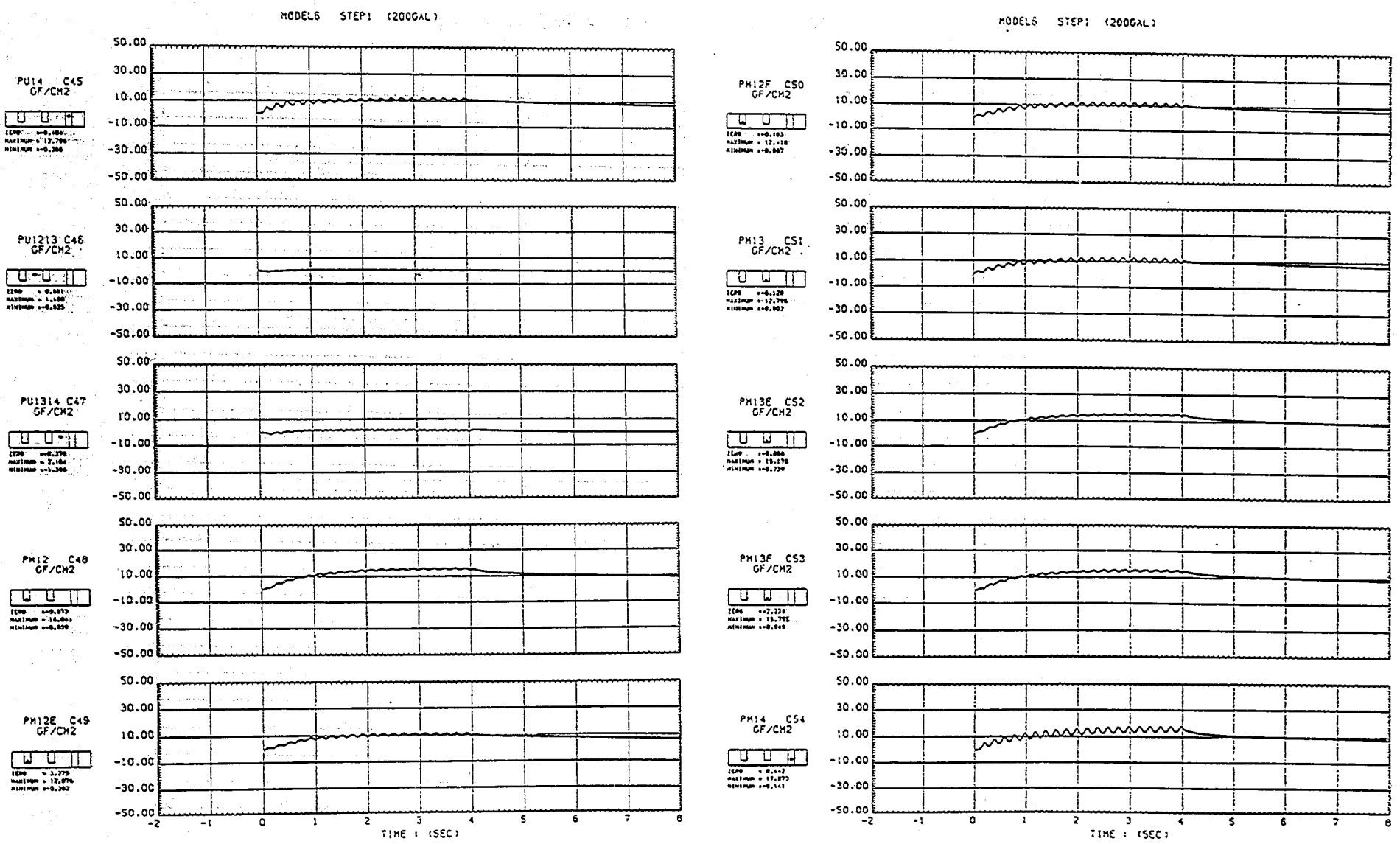


図4.8(3) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：200gal）

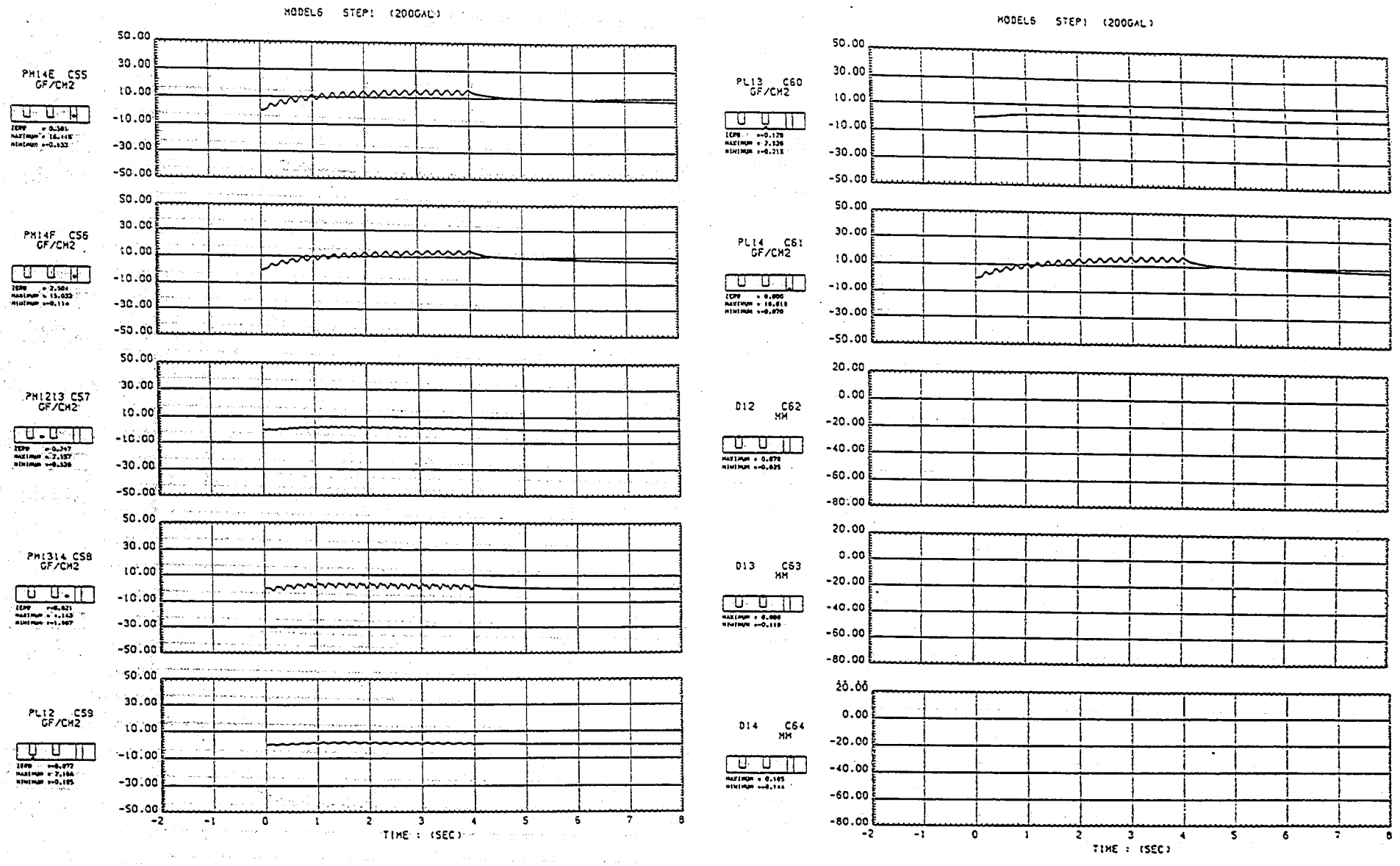


図4.8(3) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：200gal）

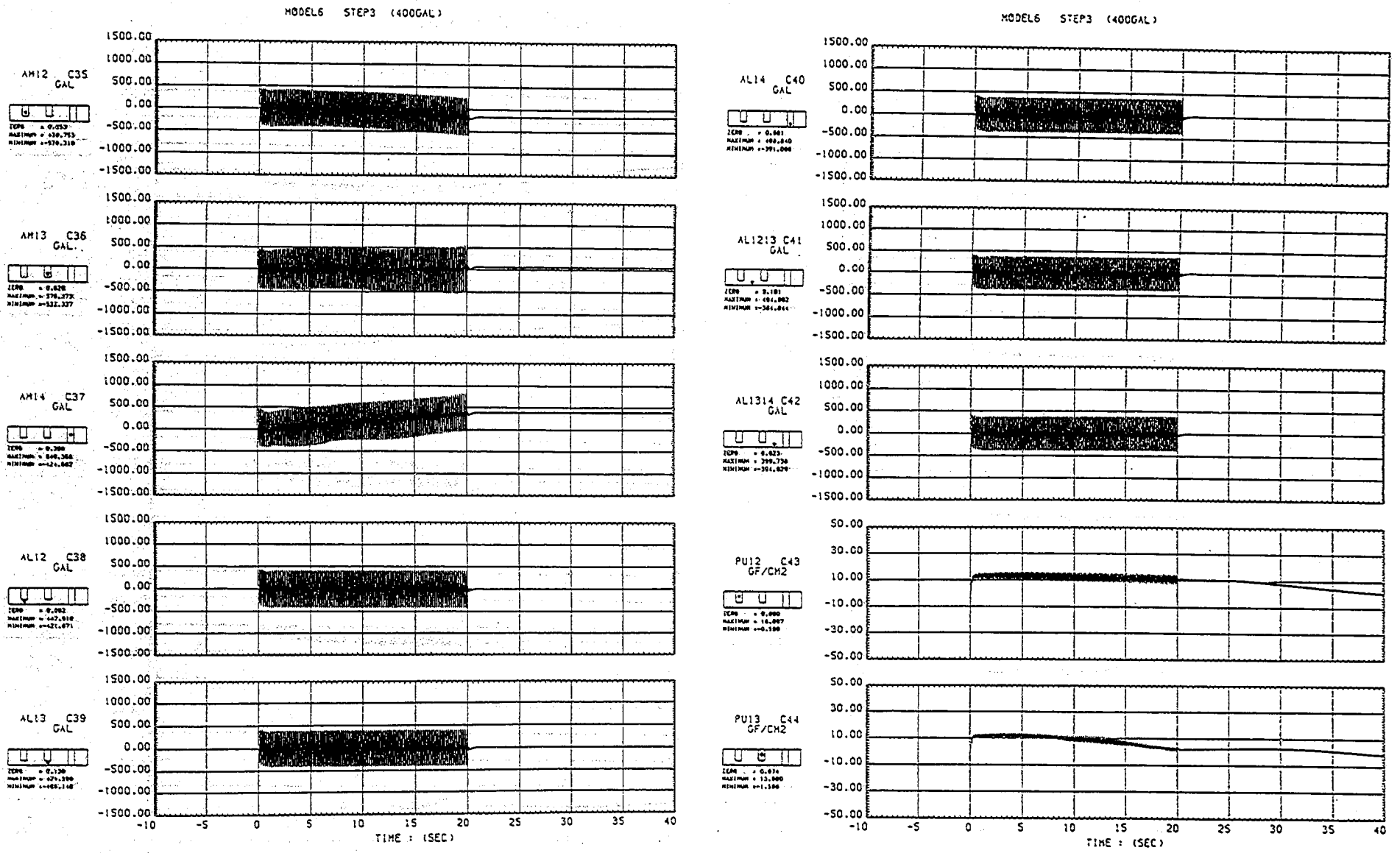


図4.8(4) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：400gal）

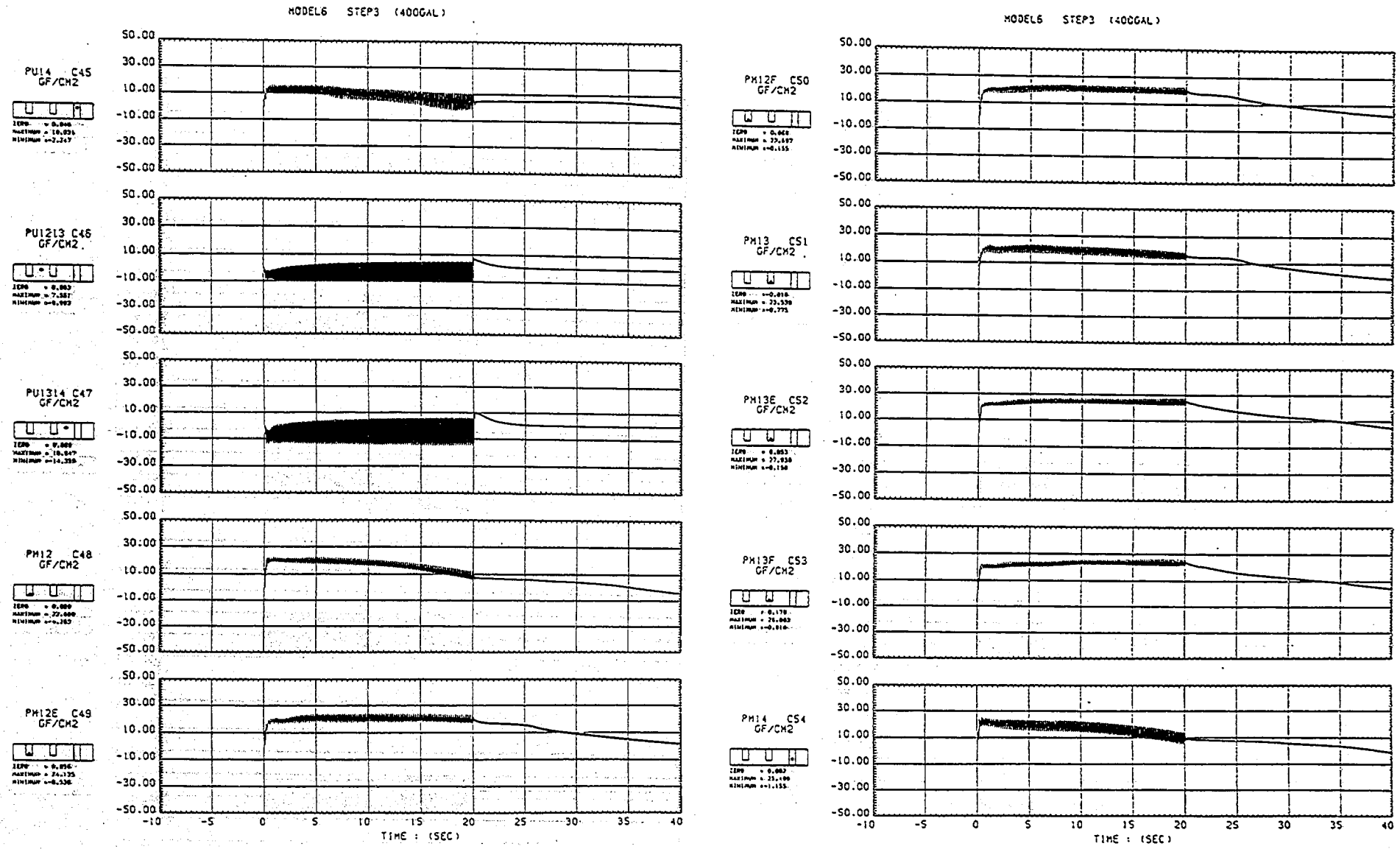


図4.8(4) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：400gal）

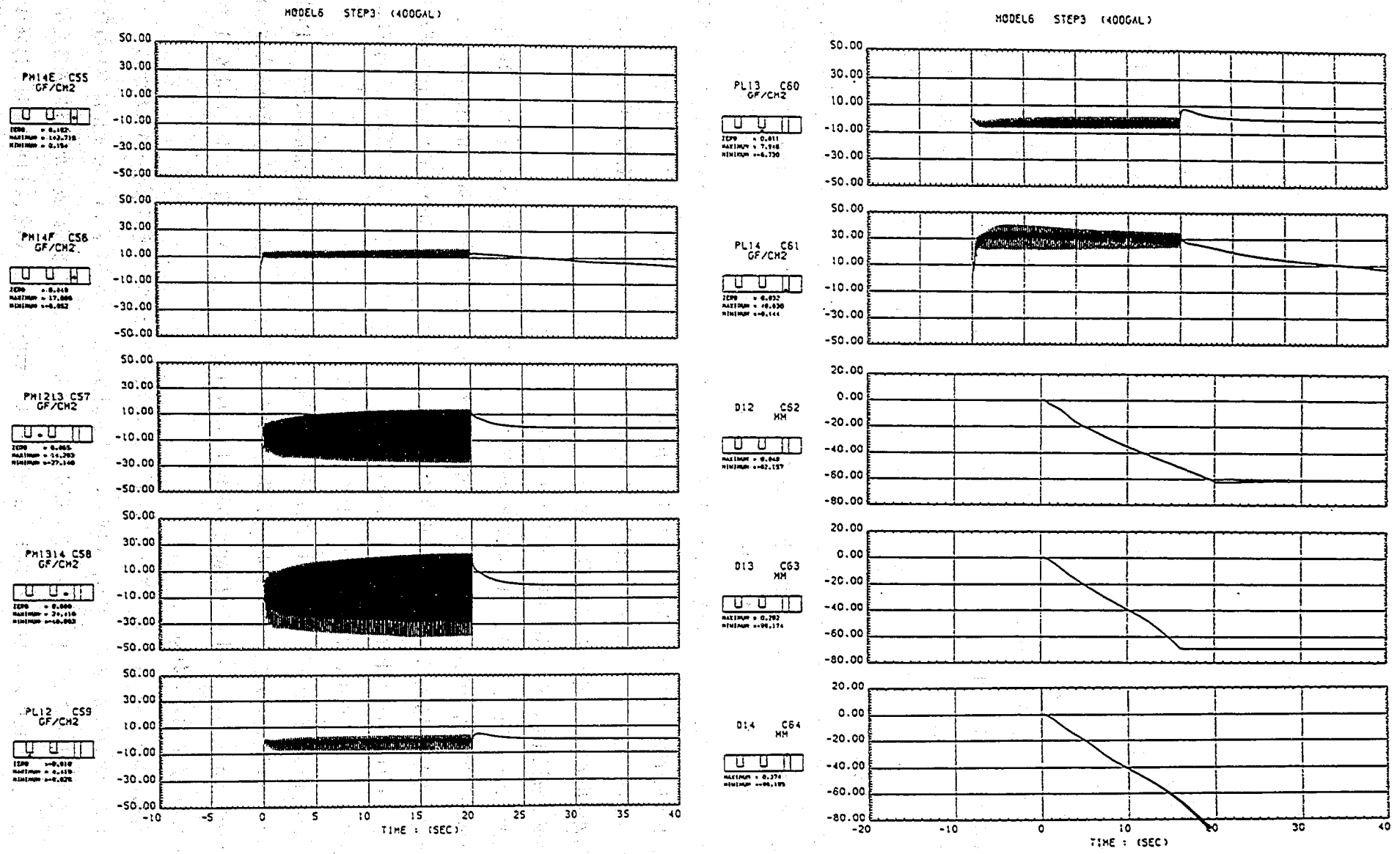


図4.8(4) 測定データの時刻歴（ケース12、13、14：400gal）

(1) 原地盤が液状化しやすい場合（モデル5：ケース9，10，11）

1回目加振（200gal、図4．8(1)）でどのケースも管渠部分の過剰間隙水圧は有効上載圧に達していて、この部分が液状化していることがわかる。また、無対策のケース9（PM9，PM9F，PM9E）では加振開始から過剰間隙水圧が一気に有効上載圧に達し加振終了までほぼ変化がないのに対し、基礎のあるケース10（PM10，PM10F，PM10E）では加振開始とともに過剰間隙水圧が上昇し、しばらくの間一定値を保ち、加振後半にさらに増加していることがわかる。しかし、このときの周囲の間隙水圧計（PU109，PM109，PL10）や浮上がり量（D10）に変化は認められない。また埋戻し部上部を十和田湖砂礫で埋め戻しているケース11では、加振開始とともに過剰間隙水圧（PM11，PM11F，PM11E）は急激に上昇し、加振終了までじわじわと上昇している。管渠直上に設置されている加速度計を見比べると、基礎のあるケース10（AM10)、上部を十和田湖砂礫で埋め戻したケース11（AM11)、無対策のケース9（AM9)の順に加速度応答が小さくなっている。しかし、このときの浮上がり量は、ケース11（D11)＞ケース9（D9)＞ケース10（D10）となっていることから、浮上がりには加速度応答や過剰間隙水圧の挙動にはあまり関係がないことがわかる。また、この時点では上部を十和田湖砂礫で埋め戻したことによる効果は確認できない。

最終加振時（400gal、図4．8(2)）では、ケース11の埋戻し部直下の加速度（AL11）以外の加速度は大きく増幅あるいは減衰している。間隙水圧はPM9Eを除き、ケース9と11はほぼ同じような挙動を示している。ただし、管渠の水圧PM9とPM11では、動的振幅はPM9のほうが大きい傾向にあった。浮上がり量は、ケース10＞9＞11の順となっていて、200gal加振の時とは逆になっている。また、埋戻し部分の直下の加速度計（AL9，AL10，AL11）を比べてみると加速度の増幅が大きい順に浮上がり量も大きくなっていることがわかる。ケース11が一番浮上がり量が小さいのは、上部に砕石を埋め戻したことによる効果が出ているのではないかと考えられる。

(2) 原地盤が液状化しにくい場合（モデル6：ケース12，13，14）

1回目加振の時（図4．8(3)）には、加速度計の応答についてはあまり変化はみられない。管渠直下の過剰間隙水圧（PM12，PM13，PM14）の上昇量は、どれも初期有効上載圧の80～90％程度であり、モデル5と比べると上昇量は若干ではあるが小さくなっている。また、時刻歴中の水圧の状況はモデル5とは異なり、じわりじわりと上昇していることがわかる。これは、3章の（その1）実験の時と同様に、周囲が液状化しにくいと埋戻し部分も液状化しにくいということを示している。

埋戻し部直下の間隙水圧計（PL12，PL13）とそれと同じ位置にあるケース14の間隙水圧計（PL14）を比べると、埋戻し深さが深いケース14だけが極端に大きな値となっている。しかし、その大きさも有効上載圧の50％程度であり、浮上がりに起因する揚力とはなり得なかったために結果として浮上がりはほとんど生じなかったと考えられる。

基礎の有無（無：ケース12、有：ケース13）による加速度・間隙水圧の違いははっきりわからない。

最終加振時の時（図4．8(4)）でも、1回目加振時と同様に加速度の応答にあまり変化はみられない。原地盤部の過剰間隙水圧は、サイクリックモビリティーにより加振中では振動成分が極端に大きくなっている。しかし、PM1314以外は有効上載圧に達していない。埋戻し部については1回目加振とは異なり、

過剰間隙水圧は加振とともに一気に有効上載圧まで上昇していることがわかる。

基礎のないケース12と基礎のあるケース13とでは1回目加振と同様に時刻歴上では加速度・間隙水圧の違いはあまりみられない。管渠の過剰間隙水圧も加振開始とともに上昇し、加振中頃から水圧が減少する傾向がみられる。これは管渠自身が大きく浮き上がったことを示しており、事実すべての管渠に大きな浮上がりが生じている（D12, D13, D14)。

埋戻し部分が一番深いケース14が一番浮き上がった原因として、管渠より下側の間隙水圧計（PL14）が同じ位置にある他のケースの間隙水圧計（PL12, PL13）よりも極端に大きな値を示したことにより大きな揚力を得ることができたためである。このことから、埋戻し部分を必要以上に掘削することは適切ではないことがわかる。

4．4．2　管渠模型の浮上がり量

加振ステップごとの浮上がり量を表4．7に、模型の浮上がり量（加振ごと、累積値）と加振加速度との関係を図4．9(1)〜(2)に示す。また図中の点線は3回目加振において1・2回目の加振と同じように4秒間加振した時点における浮上がり量を示したものである。原地盤が液状化しやすいケース9〜11では1回目加振（200gal）から浮上がりが生じ、400gal（100波）で大きく浮き上がった。原地盤部が液状化しにくいケース12〜14では300gal加振まではほとんど浮き上がらず、400gal加振で突然大きく浮き上がった。埋戻し部の上部を砕石としたケース11でも、下部の硅砂が液状化することにより浮上がりが生じたが、上部の砕石により上方への砂の移動が阻止されるために、最終的な累積浮上がり量は管のみのケース9の6割程度であった。また、基礎のあるケース（ケース10, 13）の方が基礎のないケース（ケース9，12）より300galまでは浮上がり量は小さかったが、400galでは基礎のないケースと同等かそれ以上の浮上がりが生じた。

表4．7　模型の浮上がり量

項　目	STEP No.	台加速度 (gal)	ケース9 D9 (mm)	ケース10 D10 (mm)	ケース11 D11 (mm)	ケース12 D12 (mm)	ケース13 D13 (mm)	ケース14 D14 (mm)
最　大 浮上がり量	1	200.5	15.06	8.16	15.46	0.04	0.12	0.15
	2	306.0	17.17	14.93	13.61	2.95	3.81	8.68
	3	409.6	49.10	58.81	25.37	(53)	(103)	94.64
最大累積 浮上がり量	1	200.5	15.06	8.16	15.46	0.04	0.12	0.15
	2	306.0	32.23	23.09	29.07	2.99	3.93	8.82
	3	409.6	81.33	81.90	54.44	(55.99)	(106.93)	103.46
最　終 浮上がり量	1	200.5	13.00	5.84	12.60	0.04	0.01	0.08
	2	306.0	14.79	12.39	9.94	2.91	2.80	7.89
	3	409.6	45.49	55.72	22.14	(53)	(103)	92.52
最終累積 浮上がり量	1	200.5	13.00	5.84	12.60	0.04	0.01	0.08
	2	306.0	27.79	18.23	22.54	2.95	2.81	7.97
	3	409.6	73.29	73.95	44.68	(55.95)	(105.81)	100.49

＋：浮上がり，－：沈下
（　）内数値は、スケール計測による最終値

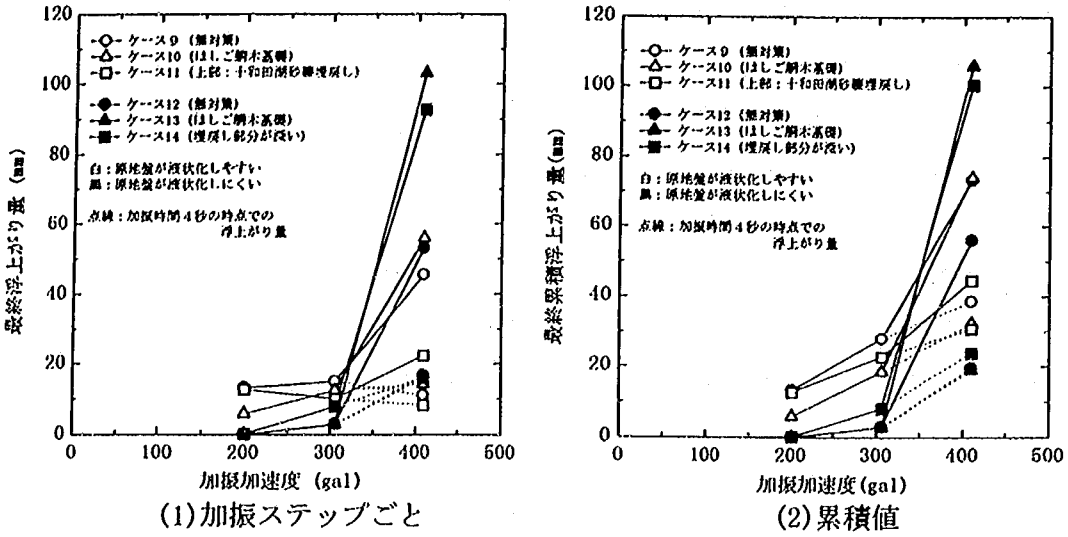


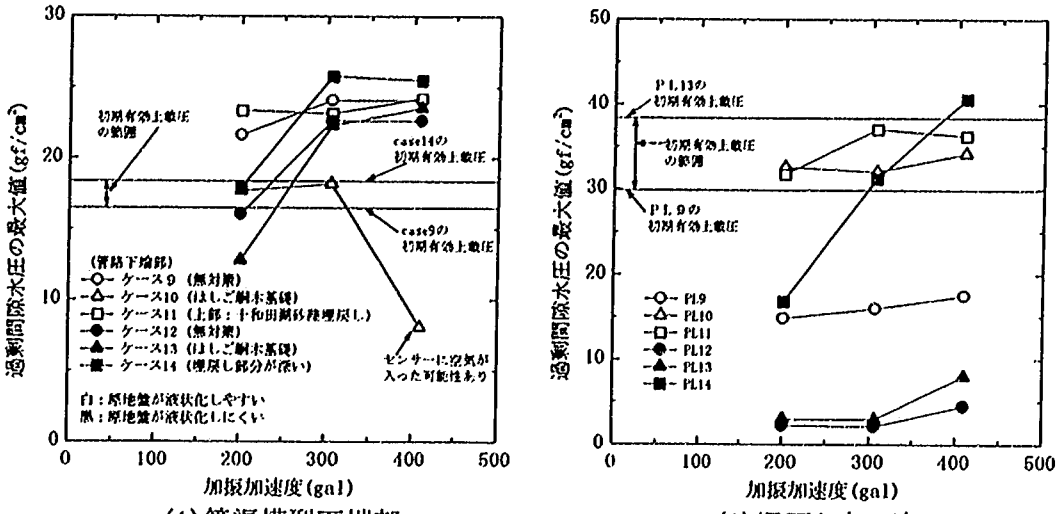
図4．9　浮上がり量と加振加速度との関係

原地盤が液状がしやすい場合としにくい場合で比較（ケース9と12、10と13をそれぞれ比較する）しても同じように、300galまでは原地盤が液状化しやすい方が浮上がり量が大きく、400galになると原地盤が液状化しにくい方は液状化しやすい方と同等かそれ以上の浮上がりが生じている。ただし、基礎のあるケースは土槽の中央に、基礎のないケースは土槽の側壁側に埋設されていたために、土槽側壁によるせん断変形の拘束による影響が現れていた可能性があると考えられる。管渠下の埋戻し部分が深いケース（ケース14）と浅いケース（ケース12）を比較すると、埋戻し部分の深いケースの方が浮上がり量が大きい結果となった。

また、3回目加振時の浮上がり量について4秒間加振を行った時点の値でで比較したところ、原地盤が液状化しにくいケースの方が液状化しやすいケースに比べて浮上がり量は大きいが、その差はほとんどない。このことから、3回目加振においては加振中盤から後半にかけて大きく浮き上がったことが想像できる。

4．4．3　地盤の過剰間隙水圧

管渠模型下端部と埋戻し部下部（ケース14はそれと同じ位置）の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係を図4．10(1)(2)に示す。各ケースの初期上載圧は表4．6のとおりである。管渠模型下端部では、各ケースとも1回目加振から過剰間隙水圧がほぼ初期有効上載圧に達していることがわかる。ただし、ケース10の400gal加振時の過剰間隙水圧があまり上がっていないのは、時刻歴（図4．8参照）から見てもわかるように他のセンサー（PM9，PM11）と比べると反応が鈍いことから途中で空気が入ったのではないかと思われる。ケース11は管渠下端部・埋戻し部下部共に過剰間隙水圧の上昇量は大きいが、浮上がり量はそれほど大きくないのは上部に砕石を用いたことによる効果が現れているためである。また、原地盤が液状化しにくいケース12～14は、管渠下端部の過剰間隙水圧の大きさはほぼ同じではあるが、埋戻し部下部の値がケース14だけ大きく異なる。これは、ケース14の下部はDr≒52%であったのに対し他はDr＝98%と密であったことによりケース14の管渠に働く揚力が他と比べて増加したためである。



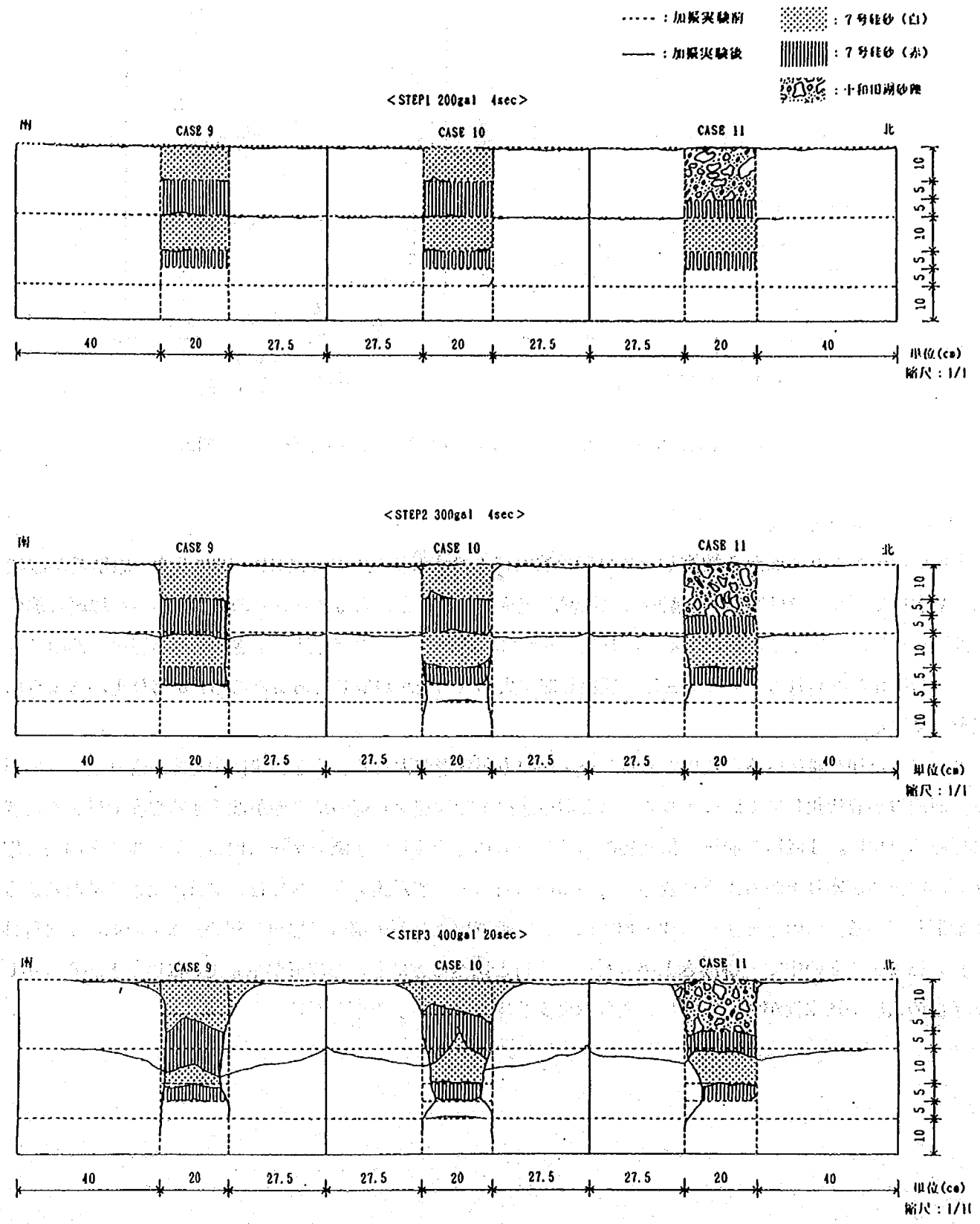
(1)管渠模型下端部　　(2)埋戻し部下部

図4.10　管渠模型下端の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度との関係

4.4.4　模型の変形状況

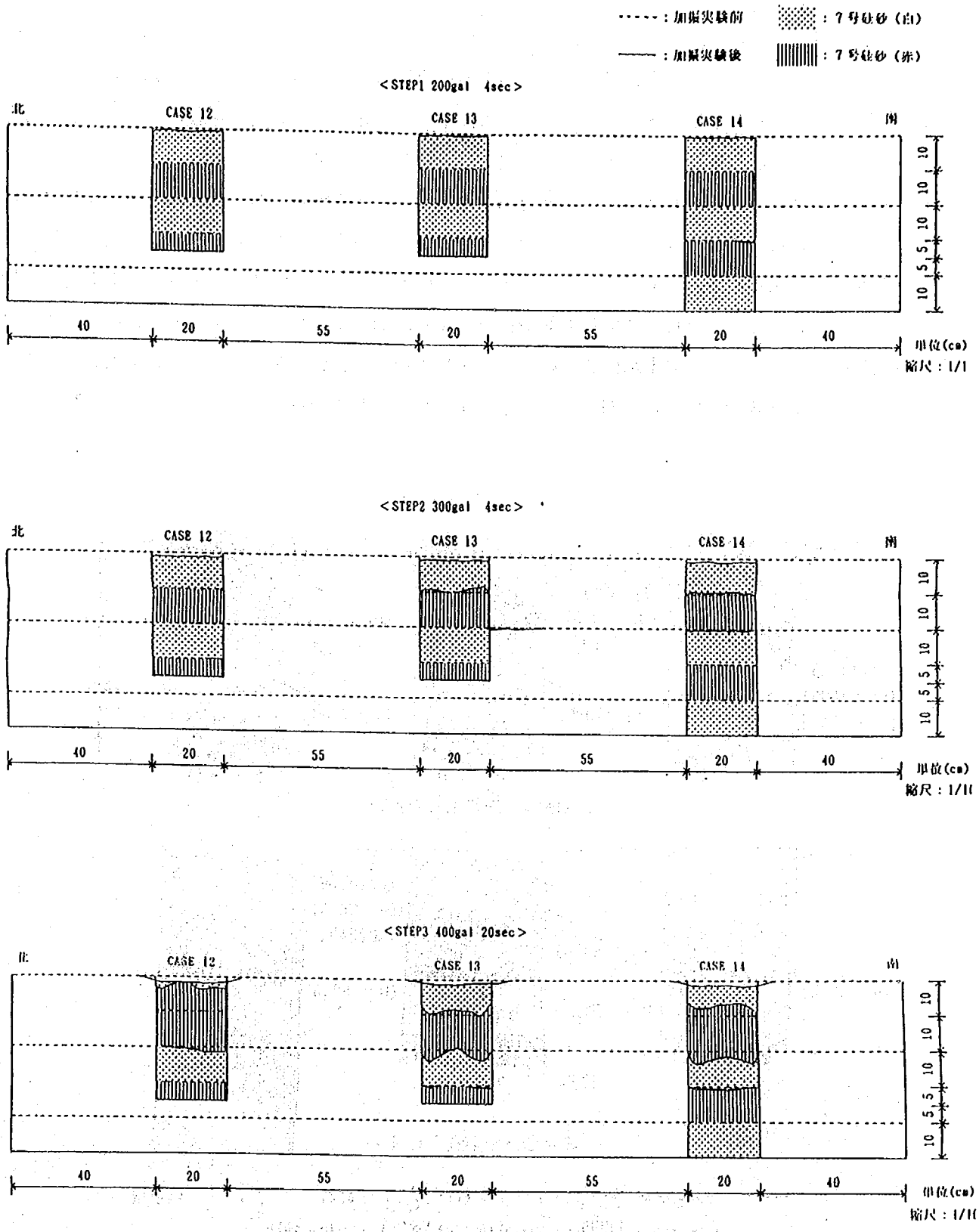
土槽前面のアクリル面から観察した各模型の加振ごとの変形状況を図4.11(1)～(2)に示す。原地盤が液状化しやすいモデル5では2回目加振時に原地盤が液状化したことによるメッシュの乱れがみられ埋戻し部分を押し込み始めていることがわかる。3回目加振時には、埋戻し部への押し込みがさらに進み埋戻し部のメッシュにも変化がみられる。メッシュは、埋戻し部中央部（管渠が設置してあるところ）が盛り上がるように変形している。

ケース9と10を見比べると基礎のあるケース10の方が変形が大きく、くさび状に中心部が盛り上がっている。原地盤が液状化しにくいモデル6では2回目加振までは埋戻し部の地表面が沈下する程度でほとんど変形はみられない。3回目の加振時に基礎のあるケース13と埋戻し部が深いケース14は、モデル5と同様に埋戻し部中央部が盛り上がるように変形しているのに対して、無対策のケース12は、硅砂が大きく乱れるように変形している。このときケース12・13では、管渠設置部より下の部分（埋戻し部の一番下の赤い7号硅砂部分）はモデル6の中で一番浮き上がったケース14と比べるとほとんど変形が生じていないことから埋戻し部下部の密度や透水性が浮上がりに大きな影響を及ぼしていることがわかる。



(1) モデル5

図4.11 各加振ごとの模型の変形状況



(2) モデル6

図4.11 各加振ごとの模型の変形状況

また実験終了後に地盤を掘削し、埋戻し部の変形状況と管の浮上がりの状況を確認したときの土槽の中央部（土槽前面から34cmの位置）における状況を図4.12と写真4.1(1)～(6)に示す。原地盤が液状化しやすいモデル5（ケース9～11）では、原地盤が埋戻し部の下部を押し込み、上部では埋戻し部が原地盤部に流れるように広がっている。管渠上部の埋戻し地盤は管渠の浮上がりに伴いドーム状に変形し、下部の地盤も上部と同様の変形をしている。特に、ケース10では管渠より上方の土が管渠が浮き上がることにより、くさび状に変形していることがわかる。地表面は、原地盤部よりも盛り上がる傾向にあった。原地盤が液状化しにくいモデル6（ケース12～14）では、原地盤からの埋戻し部の押し込みはあまり見られない。埋戻し部においても、原地盤が液状化しやすいモデル5と比べると、管渠の浮上がりに伴い特に管渠直上の上部地盤を押し上げていることがわかる。しかし、埋戻し下部ではほとんど変形は見られない。地表面は、原地盤部よりも沈下する傾向にあった。はしご胴木基礎を用いたケース10と13では、管渠が基礎から大きく離れて浮き上がっている。また、ケース10でははしご胴木自体にも浮上がりが生じている。

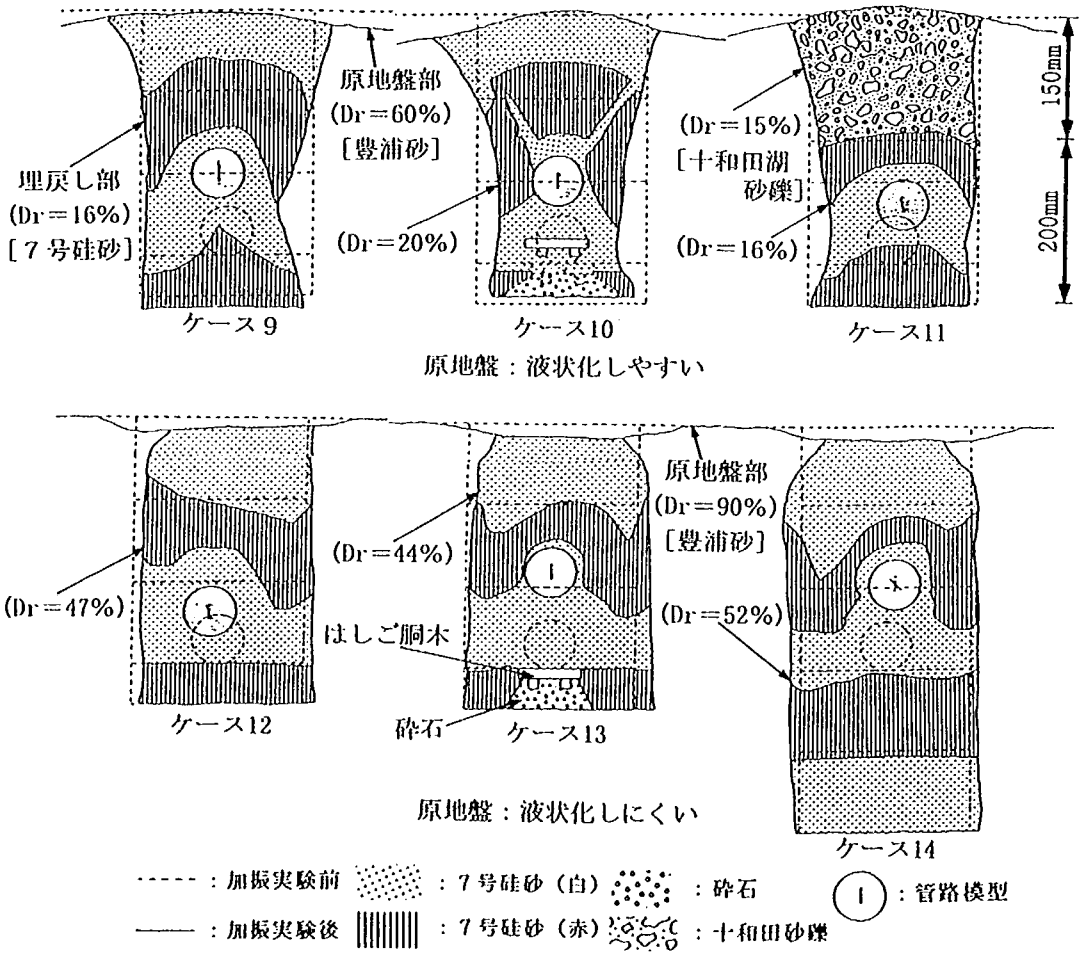


図4.12　土槽の中央部（土槽前面から34cmの位置）における状況図

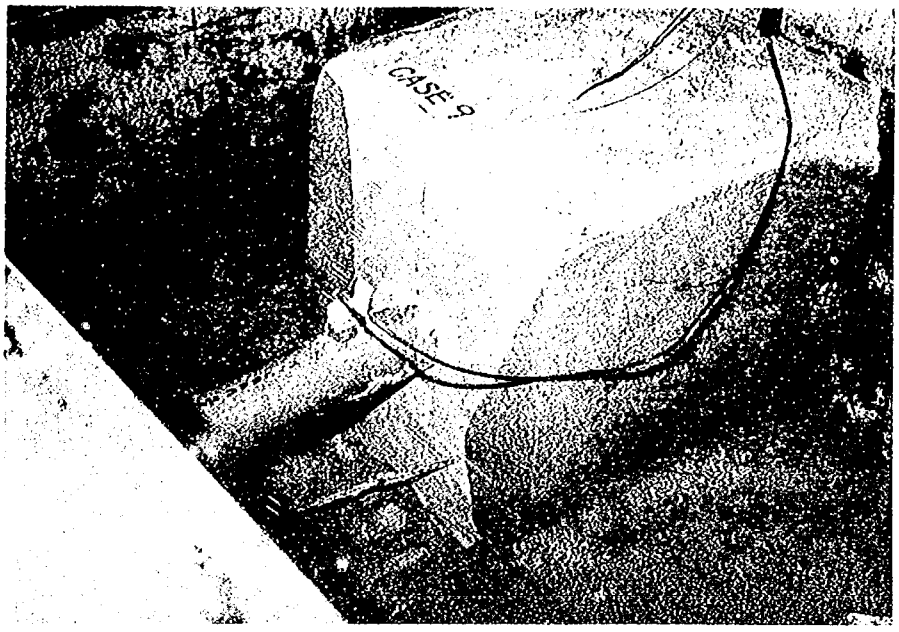


写真 4．1(1)　土槽中央部における変形状況（ケース 9）

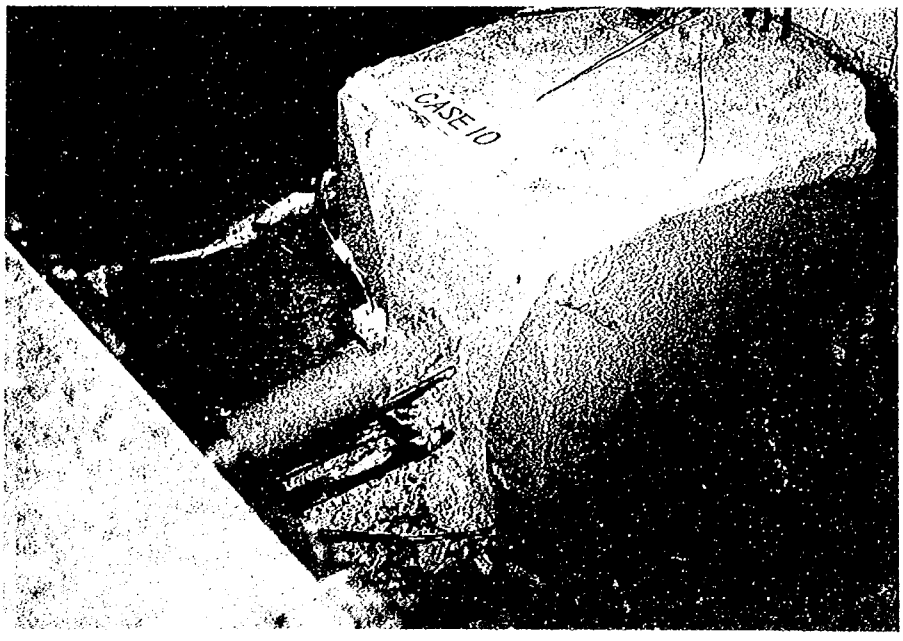


写真 4．1(2)　土槽中央部における変形状況（ケース10）

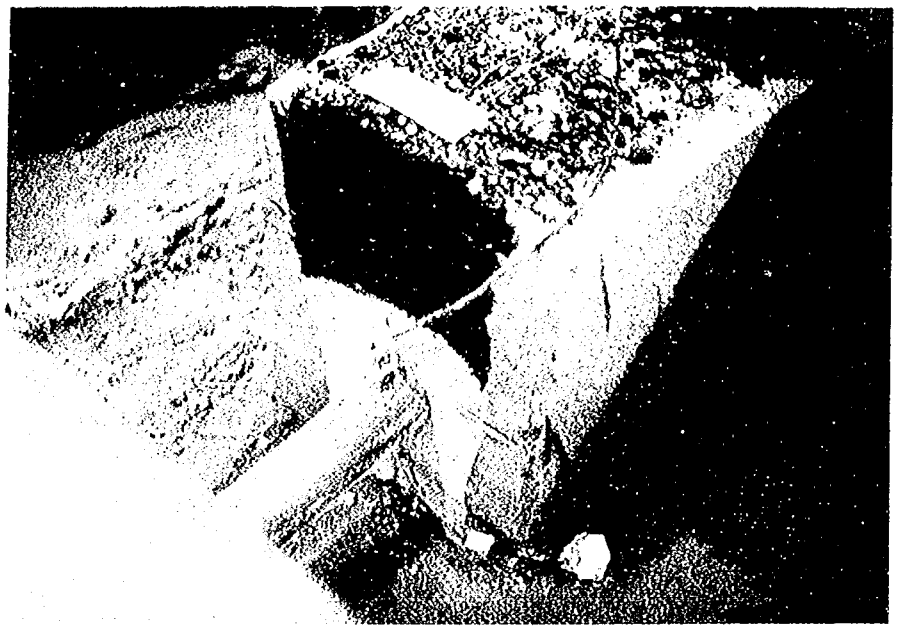


写真 4．1(3)　土槽中央部における変形状況（ケース11）

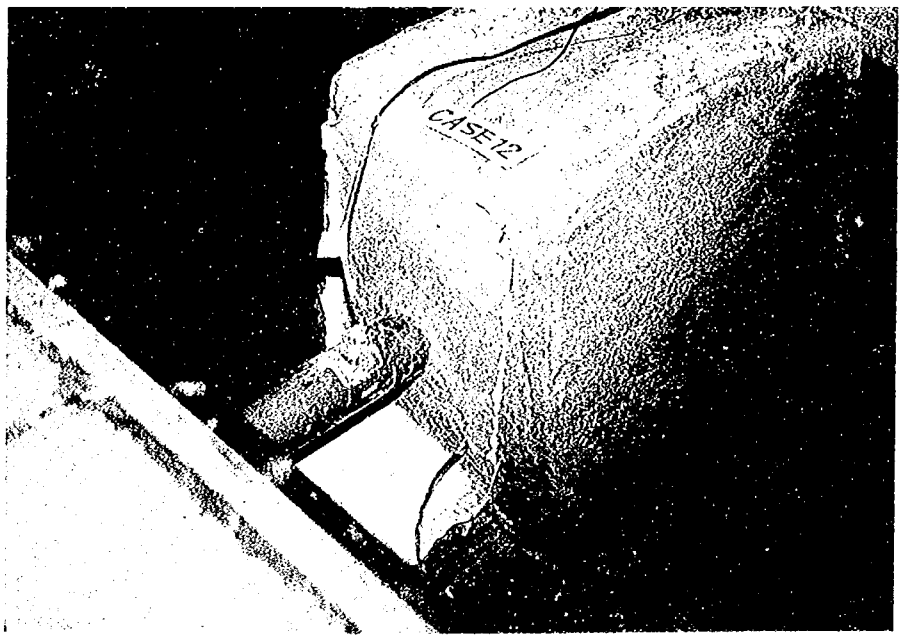


写真 4．1(4)　土槽中央部における変形状況（ケース12）

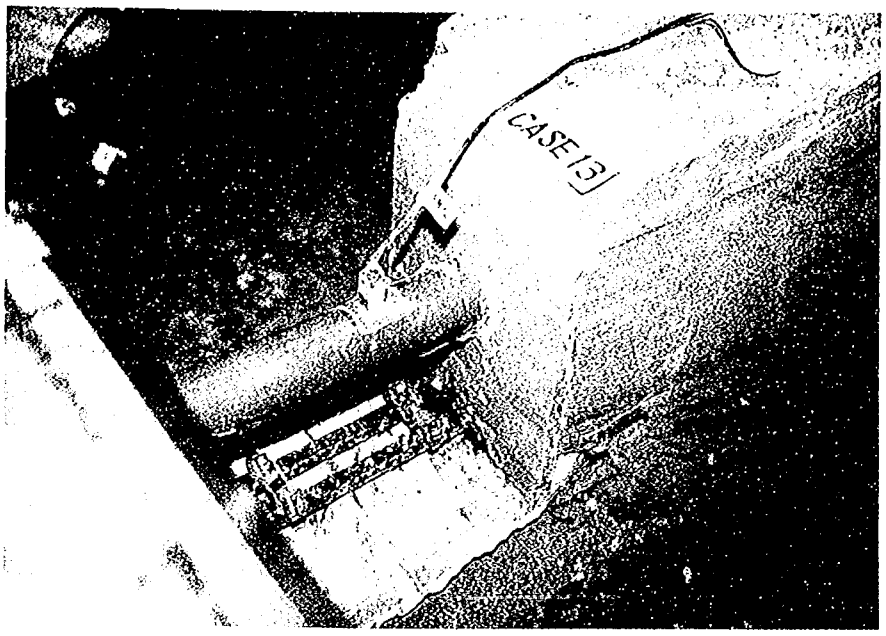


写真 4．1(5)　土槽中央部における変形状況（ケース13）

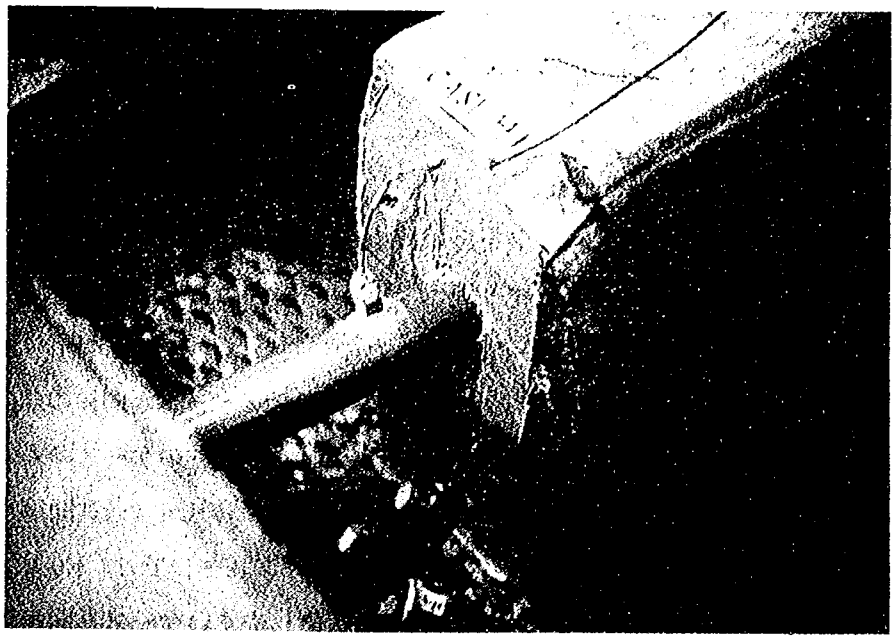


写真 4．1(6)　土槽中央部における変形状況（ケース14）

4．4．5　浮上がり安全率

(1)　浮上がり安全率の定義

地震時に円形断面である管路模型に作用する力として図4．13に示す5つの力を考える。ただし、鉛直方向の地震動による管路模型自身の慣性力は、3．4．4と同様の理由により考慮していない。

浮上がり安全率Fuは、管路模型の浮上がりを抑える下向きの力と、浮上がりを生じさせる上向きの力の比として定義し、次式で与えられる。

$$Fu = \frac{Ws + Wm}{Us + Ud + F} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.1)$$

なお、常時（加振前の状態）は、Ud＝0、F＝0であるので常時の安全率は次式のようになる。

$$Fu\ (\text{常時}) = \frac{Ws + Wm}{Us} \qquad \cdots\cdots\cdots\cdots (4.2)$$

なお、各力の計算方法は3．4．4の管渠模型の浮上がり安全率の計算方法（3．3）～（3．10）を参照のこと。

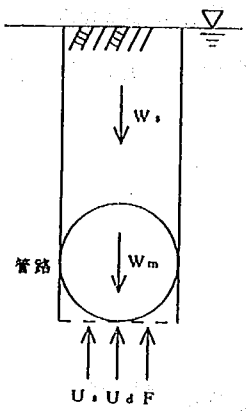


図4．13　地震時に管渠模型に作用する力

(2)　浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化

各ケースにおける浮上がり安全率の計算結果を表4．8(1)～(18)に、それぞれについての浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化の関係を図4．14(1)～(6)に示す。これらの図から、原地盤が液状化しやすいケース9～11では、ケース10を除き加振直後にFu＜1となったのに対し、ケース10はFu＞1を越えた値を示している。しかし、浮上がり量について見てみると、ケース10は他のケースと同様の傾向を示している。この原因としては、ケース10の管渠下端部（PM10）の過剰間隙水圧が他のケースのものと比べると小さな値（空気混入が原因と思われる）を示したことから、安全率算出時のUd（過剰間隙水圧による揚力）を過小評価していると考えられる。原地盤が液状化しにくいケース12～14では、Fu＞1の時には浮上がりは生じていないが、Fu＜1となったときには原地盤が液状化しやすいケースと同様に浮上がりが生じている。また、同じ加振時間（4秒）であるステップ1と2を比べてみると、ケース10を除いた全てのケースにおいて加振加速度が大きくなるにつれて安全率が小さな値を示している時間が長くなってきているのも特徴である。

表4．8(1) 浮上がり安全率計算結果（ケース9、ステップ1）

<初期状態>　　(ｹｰｽ9-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.93 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.788 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.788 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB		過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL9)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (gf)	Us (gf)	PW9F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	Ud (gf)	uds (gf/cm2)	S (gf)	T (gf)	F (gf)	Fu
初期	0.000	15818	10543	0.000	0.000	0	0.000	0	5007	0	1.597
1.0	2.191	15677	10464	21.085	21.304	7503	9.331	-4144	5069	0	0.929
2.0	5.774	15446	10335	21.165	21.742	7656	13.540	-2781	5170	0	0.915
3.0	9.896	15181	10187	21.608	22.598	7954	14.863	-2603	5287	0	0.893
4.0	14.017	14915	10038	20.942	22.344	7862	14.562	-2620	5404	0	0.890
5.0	15.064	14848	10001	16.659	18.165	6391	13.660	-1474	5434	0	0.968
10.0	13.922	14922	10042	13.641	15.033	5290	10.233	-1606	5402	0	1.040
20.0	13.130	14973	10070	1.772	3.085	1086	4.100	390	5379	0	1.433
30.0	13.034	14979	10074	-0.281	1.022	360	2.957	705	5376	0	1.533
40.0	13.003	14981	10075	-1.206	0.094	33	2.777	967	5376	0	1.583
50.0	13.003	14981	10075	-1.608	-0.308	-108	2.717	1086	5376	0	1.605
60.0	13.003	14981	10075	-1.810	-0.510	-179	2.657	1136	5376	0	1.617

表4．8(2) 浮上がり安全率計算結果（ケース9、ステップ2）

<初期状態>　　(ｹｰｽ9-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 22.63 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.788 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.788 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 6.30 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB		過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL9)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (gf)	Us (gf)	PW9F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	Ud (gf)	uds (gf/cm2)	S (gf)	T (gf)	F (gf)	Fu
初期	0.000	14981	10075	0.000	0.000	0	0.000	0	5375	0	1.588
1.0	2.435	14824	9987	23.656	23.900	8409	11.496	-4270	5444	0	0.861
2.0	6.933	14535	9825	23.214	23.907	8408	14.011	-3364	5572	0	0.853
3.0	11.115	14265	9675	22.410	23.522	8270	15.329	-2751	5691	0	0.852
4.0	15.138	14006	9530	21.806	23.320	8196	15.987	-2440	5805	0	0.848
5.0	17.134	13878	9458	16.497	18.210	6399	14.610	-1139	5861	0	0.939
10.0	16.247	13935	9490	14.727	16.352	5746	11.616	-1565	5836	0	0.981
20.0	14.916	14021	9538	4.671	6.163	2166	5.867	-54	5799	0	1.285
30.0	14.821	14027	9541	2.268	3.740	1315	3.891	86	5796	0	1.386
40.0	14.821	14027	9541	1.615	3.097	1089	3.531	183	5796	0	1.415
50.0	14.790	14029	9543	1.293	2.772	974	3.471	275	5795	0	1.431
60.0	14.790	14029	9543	1.051	2.530	889	3.412	339	5795	0	1.442

表4．8(3) 浮上がり安全率計算結果（ケース9、ステップ3）

<初期状態>　　(ケース9-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 21.15 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.788 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.788 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 7.78 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB		過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL9)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (gf)	Us (gf)	PM9F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	Ud (gf)	uds (gf/cm2)	S (gf)	T (gf)	F (gf)	Fu
初期	0.000	14028	9542	0.000	0.000	0	0.000	0	5795	0	1.577
1.0	0.875	13972	9511	16.456	16.544	5814	10.651	-1980	5820	0	0.978
2.0	4.134	13762	9393	17.583	17.996	6323	12.031	-1992	5913	0	0.940
3.0	7.488	13546	9273	16.818	17.567	6170	12.811	-1558	6008	0	0.943
4.0	10.906	13326	9150	16.416	17.507	6147	13.711	-1211	6105	0	0.938
5.0	14.133	13119	9033	16.778	18.191	6385	14.071	-1319	6196	0	0.917
10.0	28.689	12182	8509	15.088	17.957	6293	14.131	-1206	6609	0	0.892
20.0	45.840	11078	7892	11.347	15.931	5572	13.051	-873	7096	0	0.898
30.0	46.568	11031	7866	8.732	13.389	4682	6.451	-2360	7116	0	0.960
40.0	45.587	11094	7901	1.250	5.809	2032	1.294	-1566	7088	0	1.219
50.0	45.524	11098	7903	0.285	4.837	1692	0.451	-1529	7087	0	1.263
60.0	45.492	11100	7905	0.124	4.673	1634	0.331	-1515	7086	0	1.270

表4．8(4) 浮上がり安全率計算結果（ケース10、ステップ1）

<初期状態>　　(ケース10-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.95 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.795 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.795 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 1.297 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB		過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL10)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (gf)	Us (gf)	PM10F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	Ud (gf)	uds (gf/cm2)	S (gf)	T (gf)	F (gf)	Fu
初期	0.000	15893	10550	0.000	0.000	0	0.000	0	6041	0	1.603
1.0	2.594	15725	10457	14.990	15.249	5371	31.283	5891	6115	0	1.058
2.0	4.859	15579	10375	14.013	14.499	5106	32.426	6568	6180	388	1.046
3.0	6.021	15503	10333	16.518	17.120	6028	32.224	5573	6213	0	1.010
4.0	7.399	15414	10284	17.495	18.235	6420	32.022	5108	6253	0	0.984
5.0	8.133	15367	10257	16.773	17.586	6191	28.324	4005	6274	0	0.996
10.0	7.215	15426	10290	12.909	13.631	4799	15.614	822	6247	0	1.090
20.0	6.144	15495	10329	9.895	10.509	3700	3.979	-2268	6217	0	1.177
30.0	5.899	15511	10338	5.776	6.366	2241	1.155	-1826	6210	0	1.314
40.0	5.868	15513	10339	6.838	7.425	2614	0.482	-2441	6209	0	1.276
50.0	5.838	15515	10340	7.432	8.016	2822	0.281	-2721	6208	0	1.256
60.0	5.838	15515	10340	7.942	8.526	3002	0.213	-2925	6208	0	1.239

表4．8(5) 浮上がり安全率計算結果（ケース10、ステップ2）

＜初期状態＞ (ｹｰｽ10-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.37 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.795 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.795 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.58 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 1.297 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM10F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL10) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	15518	10341	0.000	0.000	0	0.000	0	6312	0	1.599
1.0	2.481	15357	10252	14.423	14.671	5165	31.353	6122	6383	0	1.062
2.0	6.213	15116	10118	13.958	14.579	5131	31.959	6374	6489	0	1.058
3.0	9.180	14925	10011	13.916	14.834	5219	31.892	6262	6574	0	1.047
4.0	11.963	14745	9911	13.831	15.027	5286	31.959	6219	6654	0	1.037
5.0	14.899	14555	9805	13.071	14.561	5121	25.767	4155	6738	0	1.043
10.0	14.716	14567	9812	11.634	13.106	4609	15.537	984	6733	0	1.081
20.0	13.003	14677	9873	12.564	13.864	4877	5.778	-2797	6684	0	1.064
30.0	12.575	14705	9889	14.338	15.596	5486	1.538	-4932	6672	0	1.023
40.0	12.452	14713	9893	14.465	15.710	5526	0.596	-5312	6668	0	1.020
50.0	12.391	14717	9895	13.536	14.775	5197	0.394	-5055	6666	0	1.043
60.0	12.391	14717	9895	13.282	14.521	5108	0.327	-4990	6666	0	1.049

表4．8(6) 浮上がり安全率計算結果（ケース10、ステップ3）

＜初期状態＞ (ｹｰｽ10-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 22.13 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.795 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.795 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 6.82 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 1.297 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM10F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL10) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	14716	9895	0.000	0.000	0	0.000	0	6891	0	1.590
1.0	1.536	14617	9840	3.166	3.320	1168	29.317	9387	6935	2452	1.162
2.0	5.874	14337	9684	3.208	3.795	1334	31.200	9898	7059	2839	1.108
3.0	10.028	14068	9534	3.039	4.042	1421	32.074	10126	7178	2949	1.085
4.0	14.034	13810	9390	2.869	4.272	1501	33.083	10409	7292	3117	1.059
5.0	18.367	13530	9234	2.700	4.537	1593	33.823	10583	7416	3167	1.040
10.0	35.503	12422	8617	-0.346	3.204	1123	33.352	10883	7907	2977	1.057
20.0	53.830	11238	7957	-3.266	2.117	741	25.417	8410	8431	0	1.409
30.0	66.976	11035	7844	-7.709	-2.011	-703	10.019	4310	8521	0	1.688
40.0	55.876	11106	7883	-15.907	-10.319	-3609	1.950	4311	8490	0	2.836
50.0	55.754	11114	7888	-17.907	-12.332	-4313	0.403	4458	8486	0	3.393
60.0	55.724	11116	7889	-17.907	-12.335	-4314	0.201	4386	8485	0	3.394

表4．8(7) 浮上がり安全率計算結果（ケース11、ステップ1）

＜初期状態＞ (ケース11-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.91 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat砕 = 1.787 gf/cm3
γsat砕 = 1.846 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ'砕砂 = 0.787 gf/cm3
γ'砕石 = 0.846 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM11F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL11) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16115	10536	0.000	0.000	0	0.000	0	5007	0	1.626
1.0	2.325	15965	10452	16.600	16.833	5928	24.493	2889	5073	0	1.037
2.0	6.597	15690	10298	19.065	19.725	6945	29.080	3524	5194	0	0.969
3.0	10.619	15431	10154	20.059	21.121	7434	29.325	3123	5307	0	0.935
4.0	14.074	15209	10029	19.800	21.207	7462	28.224	2698	5405	0	0.928
5.0	15.426	15122	9980	19.757	21.300	7494	25.227	1588	5444	0	0.924
10.0	14.043	15211	10030	15.648	17.052	6000	15.136	-551	5405	0	1.012
20.0	12.818	15290	10074	4.967	6.249	2199	3.576	-912	5370	0	1.329
30.0	12.692	15298	10079	2.632	3.901	1373	0.946	-1032	5366	0	1.425
40.0	12.661	15300	10080	2.243	3.509	1235	0.579	-1026	5365	0	1.442
50.0	12.598	15304	10082	2.113	3.373	1187	0.396	-1044	5364	0	1.448
60.0	12.598	15304	10082	2.113	3.373	1187	0.396	-1044	5364	0	1.448

表4．8(8) 浮上がり安全率計算結果（ケース11、ステップ2）

＜初期状態＞ (ケース11-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 22.65 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat砕 = 1.787 gf/cm3
γsat砕 = 1.846 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ'砕砂 = 0.787 gf/cm3
γ'砕石 = 0.846 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 6.26 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM11F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL11) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16304	10082	0.000	0.000	0	0.000	0	5364	0	1.619
1.0	2.160	15165	10004	16.601	16.817	5917	27.591	4016	5425	0	1.016
2.0	6.020	14917	9866	17.769	18.371	6462	30.097	4373	5535	0	0.976
3.0	8.969	14727	9759	18.028	18.925	6655	31.442	4664	5618	0	0.959
4.0	11.261	14580	9677	17.985	19.111	6719	32.115	4842	5683	0	0.951
5.0	13.143	14458	9609	17.293	18.607	6541	27.163	3238	5736	0	0.958
10.0	11.919	14537	9653	16.038	17.230	6057	17.016	68	5702	0	0.990
20.0	10.162	14650	9716	3.188	4.204	1478	4.607	180	5652	0	1.400
30.0	9.973	14662	9723	-0.879	0.118	42	0.878	274	5647	0	1.606
40.0	9.910	14666	9725	-1.917	-0.926	-326	0.267	422	5645	0	1.669
50.0	9.943	14664	9724	-2.047	-1.053	-370	0.206	444	5646	0	1.676
60.0	9.943	14664	9724	-1.810	-0.816	-287	0.084	317	5646	0	1.662

表4．8(9) 浮上がり安全率計算結果（ケース11、ステップ3）

＜初期状態＞ (ケース11-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 22.02 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat硅 = 1.787 gf/cm3
γsat砕 = 1.846 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ'硅砂 = 0.787 gf/cm3
γ'砕石 = 0.846 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 6.89 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM11F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL11) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	14899	9855	0.000	0.000	0	0.000	0	5543	0	1.615
1.0	0.239	14883	9847	23.809	23.833	8383	34.731	4121	5550	0	0.872
2.0	3.314	14685	9736	23.377	23.708	8337	36.014	4628	5637	0	0.869
3.0	6.106	14506	9636	23.161	23.772	8357	36.197	4674	5716	0	0.863
4.0	8.270	14367	9558	22.815	23.642	8310	35.831	4590	5777	0	0.861
5.0	10.122	14248	9491	22.556	23.568	8282	35.220	4397	5830	0	0.859
10.0	16.146	13860	9274	21.129	22.744	7988	28.624	2317	6000	0	0.862
20.0	23.394	13394	9013	19.962	22.301	7827	22.639	323	6206	0	0.856
30.0	22.766	13434	9036	15.640	17.917	6289	8.775	-3130	6188	0	0.943
40.0	22.202	13470	9056	6.520	8.740	3068	1.263	-2613	6172	0	1.195
50.0	22.139	13474	9058	6.131	8.345	2929	0.224	-2849	6170	0	1.209
60.0	22.139	13474	9058	6.088	8.302	2914	0.102	-2877	6170	0	1.210

表4．8(10) 浮上がり安全率計算結果（ケース12、ステップ1）

＜初期状態＞ (ケース12-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.93 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.853 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.853 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.853 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM12F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL12) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16393	10543	0.000	0.000	0	0.000	0	5423	0	1.651
1.0	0.038	16390	10542	11.273	11.277	3972	1.821	-3317	5424	0	1.199
2.0	0.038	16390	10542	14.957	14.961	5270	1.936	-4573	5424	0	1.101
3.0	0.038	16390	10542	15.998	16.002	5637	1.648	-5043	5424	0	1.076
4.0	0.038	16390	10542	15.998	16.002	5637	1.360	-5147	5424	0	1.076
5.0	0.038	16390	10542	11.794	11.798	4156	0.669	-3915	5424	0	1.184
10.0	0.038	16390	10542	7.199	7.203	2537	0.093	-2504	5424	0	1.331
20.0	0.000	16393	10543	1.998	1.998	704	0.093	-670	5423	0	1.548
30.0	0.000	16393	10543	0.265	0.265	93	0.151	-39	5423	0	1.637
40.0	0.038	16390	10542	0.178	0.182	64	0.151	-10	5424	0	1.641
50.0	0.038	16390	10542	0.135	0.139	49	0.093	-15	5424	0	1.644
60.0	0.038	16390	10542	0.135	0.139	49	0.151	5	5424	0	1.644

表4．8(11) 浮上がり安全率計算結果（ケース12、ステップ2）

＜初期状態＞ (ｹｰｽ12-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.93 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.853 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.853 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.853 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM12F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL12) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16393	10543	0.000	0.000	0	0.000	0	5423	0	1.651
1.0	0.075	16388	10540	19.854	19.862	6996	1.659	-6399	5426	0	0.993
2.0	0.664	16348	10519	21.805	21.871	7704	1.659	-7107	5443	0	0.953
3.0	1.634	16284	10484	21.631	21.794	7676	1.544	-7120	5473	0	0.953
4.0	2.603	16219	10449	22.585	22.845	8046	1.313	-7573	5503	0	0.932
5.0	2.845	16203	10441	20.981	21.266	7489	1.428	-6975	5510	0	0.960
10.0	2.915	16198	10438	17.600	17.892	6301	0.218	-6223	5513	0	1.028
20.0	2.915	16198	10438	8.540	8.832	3110	0.103	-3073	5513	0	1.271
30.0	2.915	16198	10438	3.295	3.587	1263	0.103	-1226	5513	0	1.471
40.0	2.915	16198	10438	1.344	1.636	576	0.103	-539	5513	0	1.563
50.0	2.915	16198	10438	1.127	1.419	500	0.161	-442	5513	0	1.574
60.0	2.915	16198	10438	1.041	1.333	469	0.103	-432	5513	0	1.578

表4．8(12) 浮上がり安全率計算結果（ケース12、ステップ3）

＜初期状態＞ (ｹｰｽ12-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.63 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.853 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.853 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.30 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.853 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM12F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL12) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16193	10435	0.000	0.000	0	0.000	0	5515	0	1.649
1.0	3.128	15984	10322	22.609	22.922	8071	0.962	-7724	5611	0	0.924
2.0	6.231	15777	10211	21.959	22.582	7949	1.538	-7395	5707	0	0.925
3.0	11.301	15439	10028	22.003	23.133	8140	2.057	-7399	5862	0	0.906
4.0	16.474	15094	9842	22.306	23.953	8425	2.345	-7581	6021	0	0.882
5.0	20.028	14857	9714	22.566	24.569	8639	2.460	-7753	6130	0	0.865
10.0	34.892	13865	9179	20.962	24.451	8586	2.979	-7513	6587	0	0.838
20.0	61.725	12075	8213	12.251	18.424	6450	3.555	-6171	7411	0	0.893
30.0	61.208	12110	8232	4.146	10.267	3595	0.213	-3518	7395	0	1.110
40.0	61.105	12116	8235	-4.090	2.021	707	0.098	-672	7392	0	1.469
50.0	61.070	12119	8237	-7.557	-1.450	-508	0.098	543	7391	0	1.700
60.0	61.070	12119	8237	-7.990	-1.883	-659	0.098	695	7391	0	1.734

表4．8(13) 浮上がり安全率計算結果（ケース13、ステップ1）

<初期状態>　　(ケース13-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 24.07 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.847 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.847 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 1.198 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM13F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL13) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16433	10593	0.000	0.000	0	0.000	0	6124	0	1.647
1.0	0.045	16430	10592	9.199	9.204	3242	2.754	-2251	6125	0	1.261
2.0	0.045	16430	10592	11.625	11.630	4097	2.936	-3040	6125	0	1.188
3.0	0.045	16430	10592	12.127	12.132	4274	2.633	-3326	6125	0	1.174
4.0	0.045	16430	10592	11.876	11.881	4185	2.209	-3390	6125	0	1.181
5.0	0.045	16430	10592	8.990	8.995	3169	1.542	-2614	6125	0	1.268
10.0	0.045	16430	10592	5.560	5.565	1960	0.754	-1689	6125	0	1.390
20.0	0.045	16430	10592	1.043	1.048	369	0.633	-141	6125	0	1.592
30.0	0.045	16430	10592	0.164	0.169	59	0.633	169	6125	0	1.638
40.0	0.045	16430	10592	0.122	0.127	45	0.694	205	6125	0	1.640
50.0	0.007	16432	10593	0.122	0.123	43	0.694	207	6124	0	1.641
60.0	0.007	16432	10593	0.122	0.123	43	0.694	207	6124	0	1.641

表4．8(14) 浮上がり安全率計算結果（ケース13、ステップ2）

<初期状態>　　(ケース13-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 24.07 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.847 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.847 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 1.198 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM13F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL13) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16433	10593	0.000	0.000	0	0.000	0	6124	0	1.647
1.0	0.173	16421	10587	17.194	17.211	6063	1.688	-5456	6129	0	1.047
2.0	0.623	16391	10571	20.375	20.437	7200	1.567	-6635	6143	0	0.980
3.0	1.764	16315	10530	21.504	21.680	7637	1.506	-7095	6178	0	0.954
4.0	3.425	16205	10470	22.258	22.601	7960	1.385	-7461	6228	0	0.934
5.0	3.737	16184	10459	16.985	17.359	6114	2.416	-5244	6238	0	1.038
10.0	3.287	16214	10475	11.043	11.372	4005	0.354	-3878	6224	0	1.190
20.0	2.941	16237	10488	4.891	5.185	1826	0.112	-1786	6214	0	1.401
30.0	2.872	16242	10490	0.832	1.119	394	0.112	-354	6212	0	1.586
40.0	2.837	16244	10491	0.288	0.572	201	0.172	-139	6211	0	1.614
50.0	2.837	16244	10491	0.288	0.572	201	0.172	-139	6211	0	1.614
60.0	2.802	16246	10493	0.205	0.485	171	0.233	-87	6209	0	1.619

表4．8(15) 浮上がり安全率計算結果（ケース13、ステップ3）

＜初期状態＞ (ケース13-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.79 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.847 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.847 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.28 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 1.198 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 1.025 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM13F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL13) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16247	10493	0.000	0.000	0	0.000	0	6245	0	1.645
1.0	1.749	16130	10430	22.116	22.291	7850	-3.273	-9029	6298	0	0.938
2.0	6.124	15839	10272	21.906	22.518	7928	-2.363	-8778	6432	0	0.926
3.0	11.260	15498	10087	22.827	23.953	8429	-2.000	-9149	6588	0	0.892
4.0	15.980	15184	9917	23.287	24.885	8754	-1.636	-9343	6732	0	0.868
5.0	20.289	14897	9762	23.245	25.274	8888	-1.393	-9389	6863	0	0.853
10.0	39.312	13633	9077	21.864	25.795	9055	-0.726	-9316	7444	0	0.808
20.0	69.189	11646	8002	18.517	25.436	8899	-0.423	-9051	8355	0	0.749
30.0	69.189	11646	8002	6.632	13.551	4741	0.548	-4544	8355	0	0.994
40.0	69.189	11646	8002	-0.733	6.186	2164	0.426	-2011	8355	0	1.246
50.0	69.189	11646	8002	-2.700	4.219	1476	0.426	-1323	8355	0	1.336
60.0	69.189	11646	8002	-2.867	4.052	1418	0.487	-1242	8355	0	1.344

＊20秒付近で変位計がオーバースケールになった。

表4．8(16) 浮上がり安全率計算結果（ケース14、ステップ1）

＜初期状態＞ (ケース14-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離 H = 23.36 cm
2)管の外径 D = 6.0 cm
3)管の奥行き L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量 γsat = 1.865 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量 γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量 γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重 Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量 γ' = 0.865 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離 Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離 Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量 γ1' = 0.865 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量 γ2' = 0.865 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM14F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL14) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16116	10338	0.000	0.000	0	0.000	0	4871	0	1.657
1.0	0.083	16111	10335	12.340	12.348	4348	10.672	-506	4874	0	1.167
2.0	0.083	16111	10335	16.029	16.037	5647	14.670	-366	4874	0	1.072
3.0	0.022	16115	10337	17.530	17.532	6173	16.282	-312	4872	0	1.038
4.0	0.083	16111	10335	17.873	17.881	6296	16.819	-241	4874	0	1.030
5.0	0.083	16111	10335	10.882	10.890	3835	10.314	-121	4874	0	1.209
10.0	0.083	16111	10335	6.850	6.858	2415	6.375	-120	4874	0	1.343
20.0	0.022	16115	10337	1.746	1.748	616	1.661	-18	4872	0	1.564
30.0	0.022	16115	10337	0.374	0.376	132	0.348	-7	4872	0	1.636
40.0	0.022	16115	10337	0.288	0.290	102	0.169	-41	4872	0	1.641
50.0	0.083	16111	10335	0.245	0.253	89	0.229	-7	4874	0	1.643
60.0	0.083	16111	10335	0.202	0.210	74	0.169	-13	4874	0	1.646

表4．8(17)　浮上がり安全率計算結果（ケース14、ステップ2）

＜初期状態＞　　(ケース14-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.36 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.865 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.865 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.865 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.865 gf/cm3

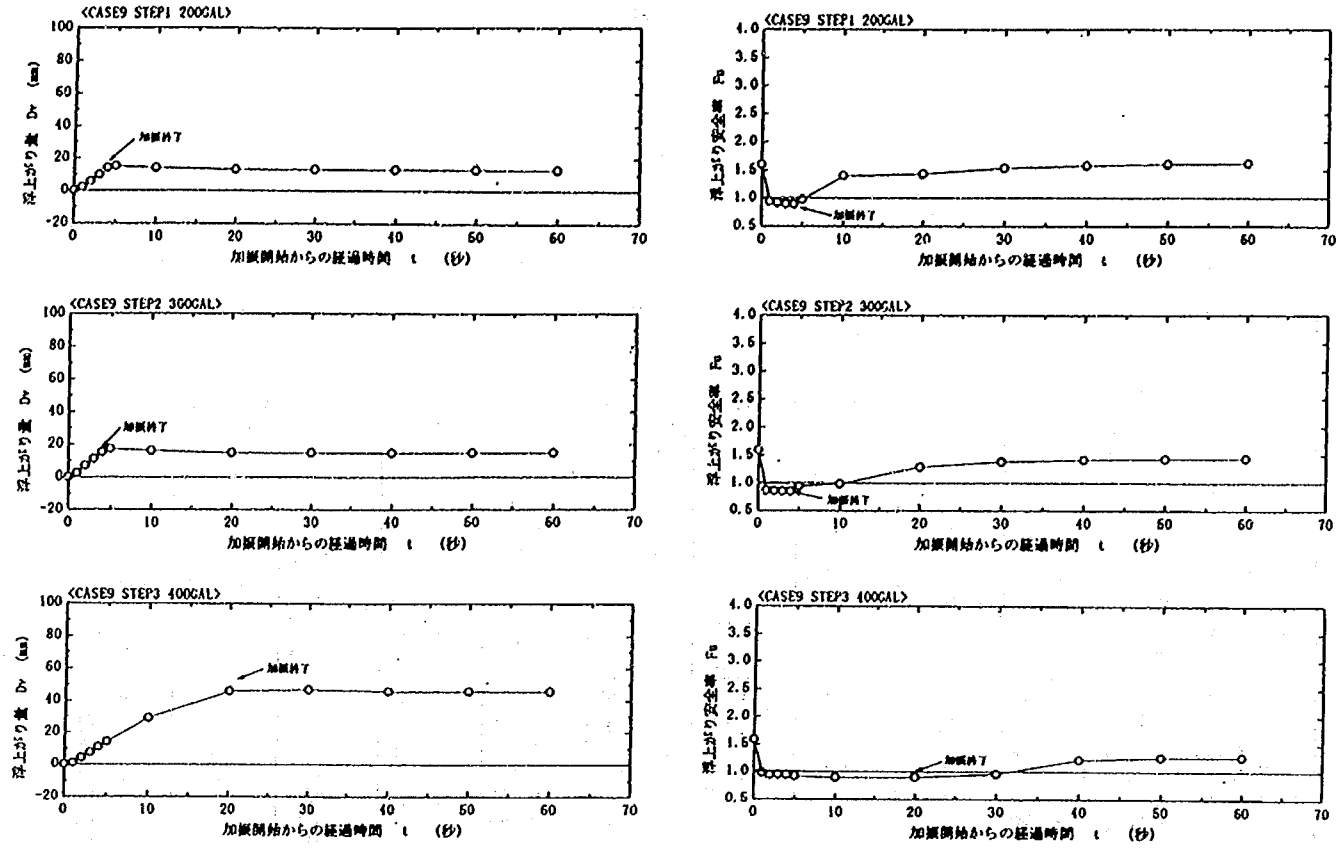
加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM14F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL14) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16116	10338	0.000	0.000	0	0.000	0	4871	0	1.657
1.0	0.181	16104	10331	22.814	22.832	8039	23.547	438	4877	0	0.932
2.0	2.123	15974	10261	25.430	25.642	9027	29.875	1728	4938	0	0.881
3.0	5.219	15766	10150	25.558	26.080	9179	31.189	2049	5034	0	0.868
4.0	8.315	15558	10038	25.387	26.219	9226	31.189	2002	5130	0	0.860
5.0	8.618	15538	10028	22.428	23.290	8195	22.651	-41	5140	0	0.909
10.0	8.436	15550	10034	18.998	19.842	6982	17.816	-568	5134	0	0.974
20.0	8.072	15574	10047	7.978	8.785	3091	7.905	-246	5123	0	1.263
30.0	7.951	15582	10052	2.489	3.284	1156	2.711	-180	5119	0	1.481
40.0	7.890	15586	10054	0.302	1.091	384	0.741	-117	5117	0	1.591
50.0	7.890	15586	10054	0.088	0.877	309	0.443	-149	5117	0	1.602
60.0	7.890	15586	10054	0.002	0.791	278	0.323	-162	5117	0	1.607

表4．8(18)　浮上がり安全率計算結果（ケース14、ステップ3）

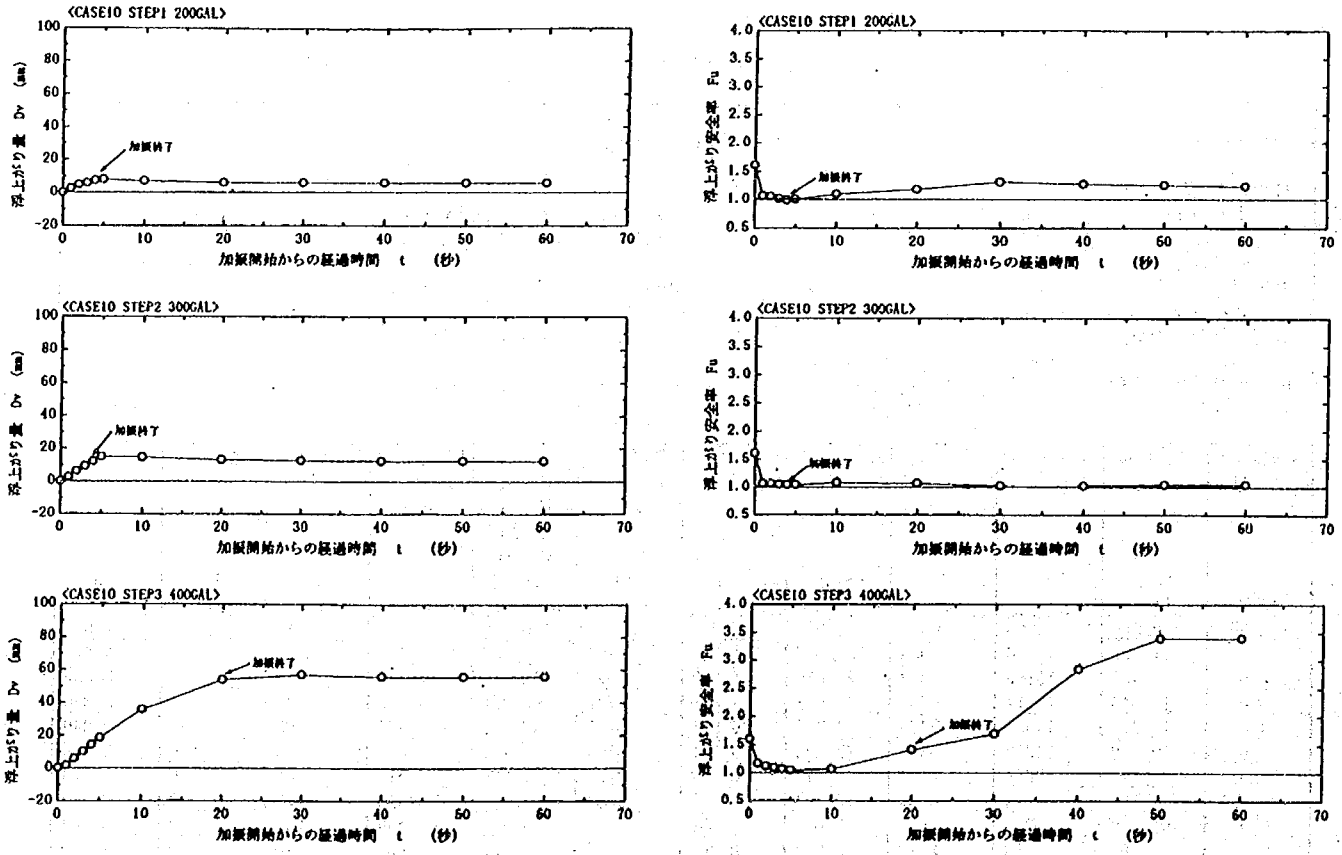
＜初期状態＞　　(ケース14-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 22.57 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat = 1.865 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ' = 0.865 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.79 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.00 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.865 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.865 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (gf)	静水圧による浮力 Us (gf)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM14F (gf/cm2)	浮上による補正 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (gf)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL14) uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (gf)	土塊の有効重量 T (gf)	浸透水力に起因する力 F (gf)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	15586	10053	0.000	0.000	0	0.000	0	5117	0	1.652
1.0	1.928	15456	9984	24.683	24.876	8752	33.227	3210	5178	0	0.879
2.0	6.403	15156	9823	23.610	24.250	8529	38.540	5346	5317	29	0.880
3.0	11.543	14811	9638	23.653	24.807	8721	40.391	5820	5477	343	0.846
4.0	15.777	14526	9485	23.353	24.931	8761	40.630	5866	5609	257	0.840
5.0	19.768	14259	9342	23.224	25.201	8853	40.271	5645	5733	0	0.840
10.0	40.692	12854	8589	22.279	26.348	9236	37.645	4316	6385	0	0.778
20.0	93.184	9329	6699	12.794	22.112	7694	33.346	4310	8019	0	0.719
30.0	94.152	9264	6664	5.626	15.041	5233	14.243	-105	8049	0	0.864
40.0	92.882	9350	6710	-0.983	8.305	2890	6.900	-406	8010	0	1.080
50.0	92.580	9370	6721	-6.520	2.738	953	1.707	-338	8000	0	1.354
60.0	92.519	9374	6723	-7.550	1.702	592	0.751	-322	7999	0	1.421

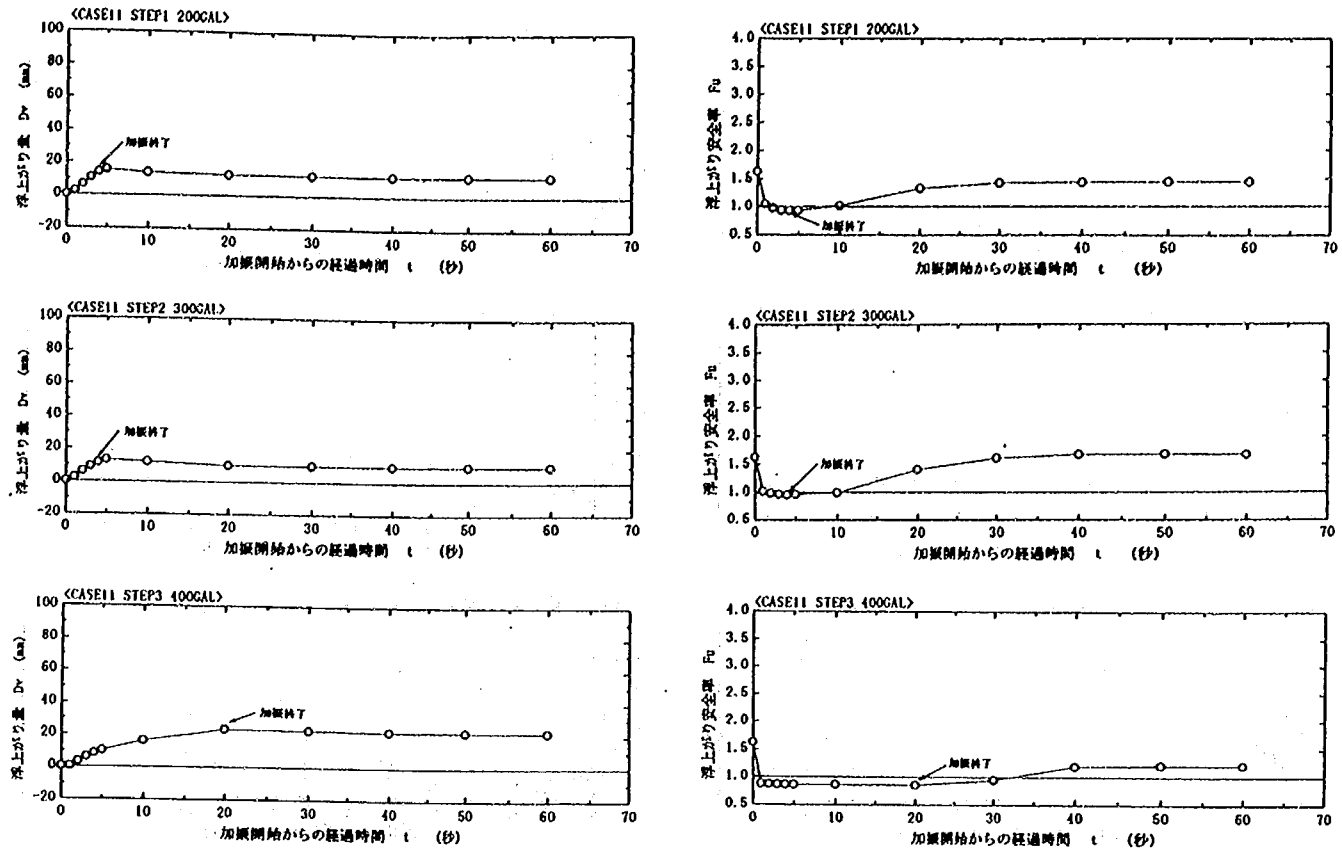


(1) ケース9

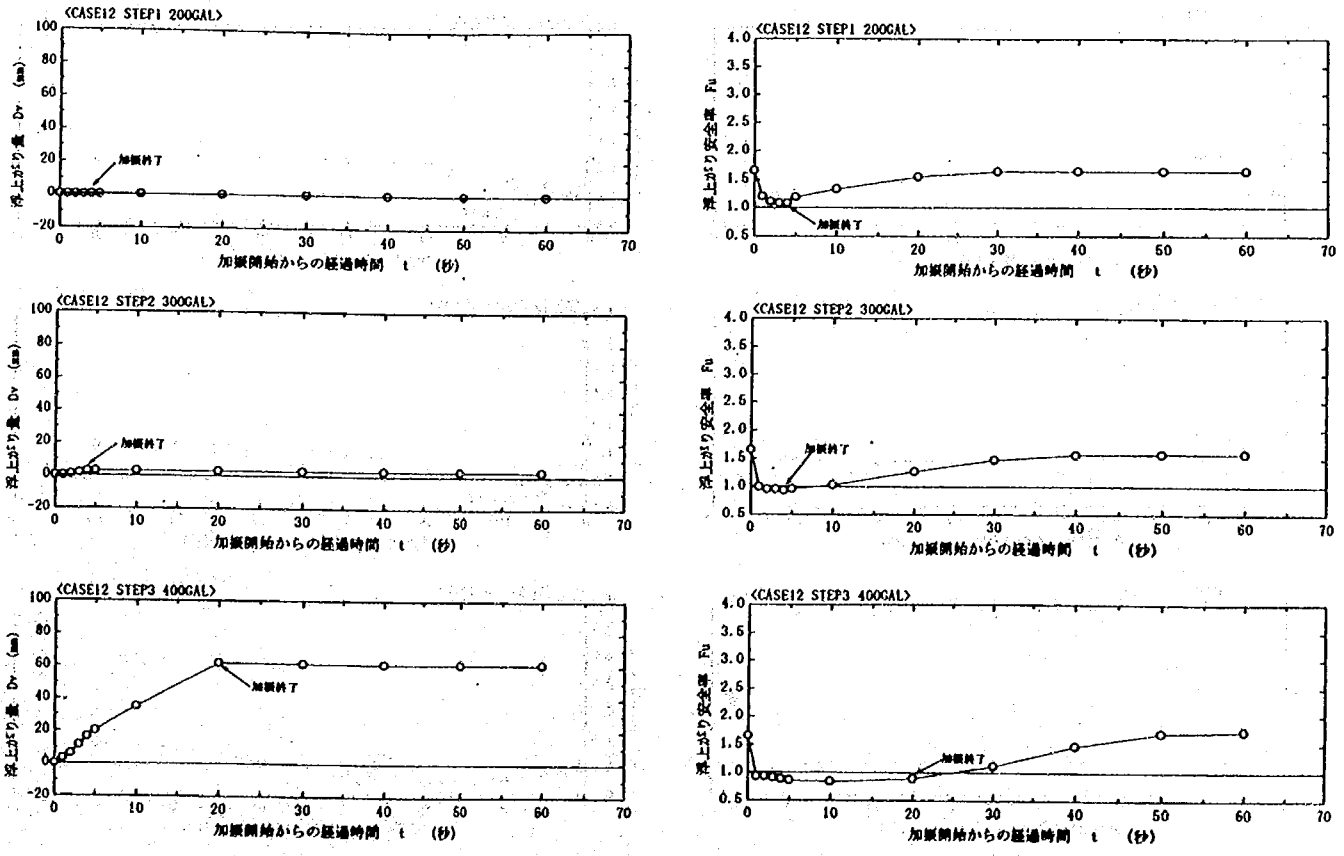


(2) ケース10

図4.14 浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化

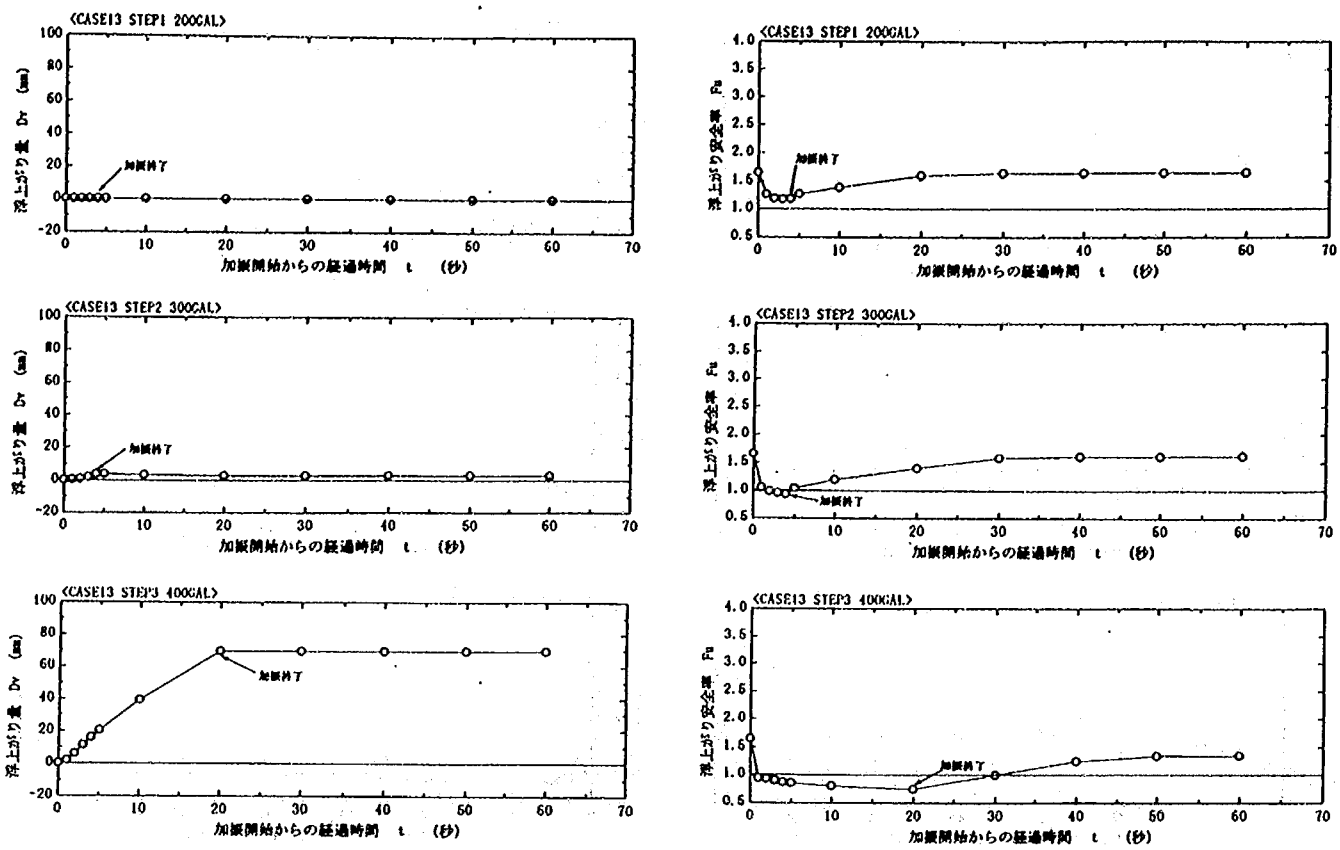


(3) ケース11

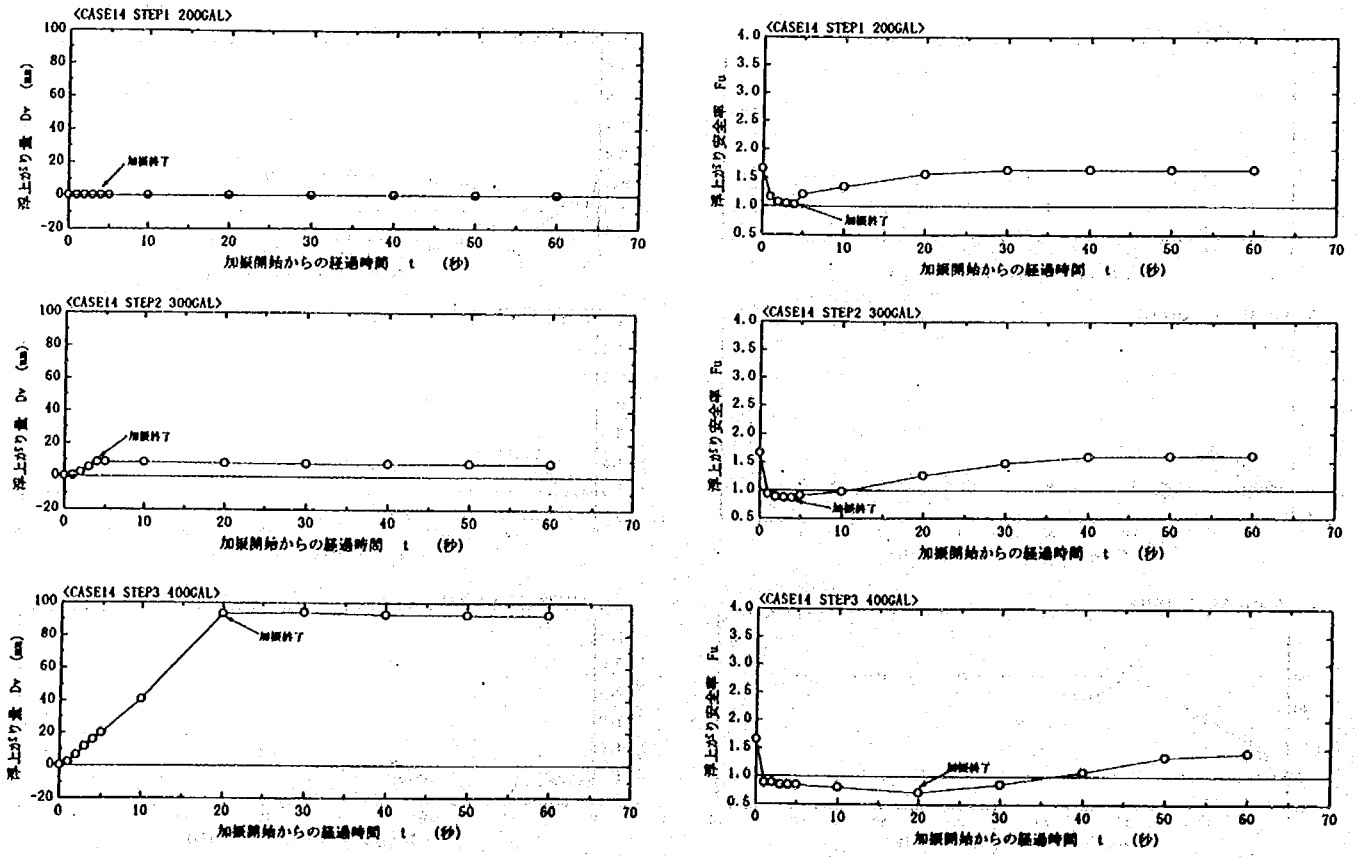


(4) ケース12

図4.14 浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化



(5) ケース13

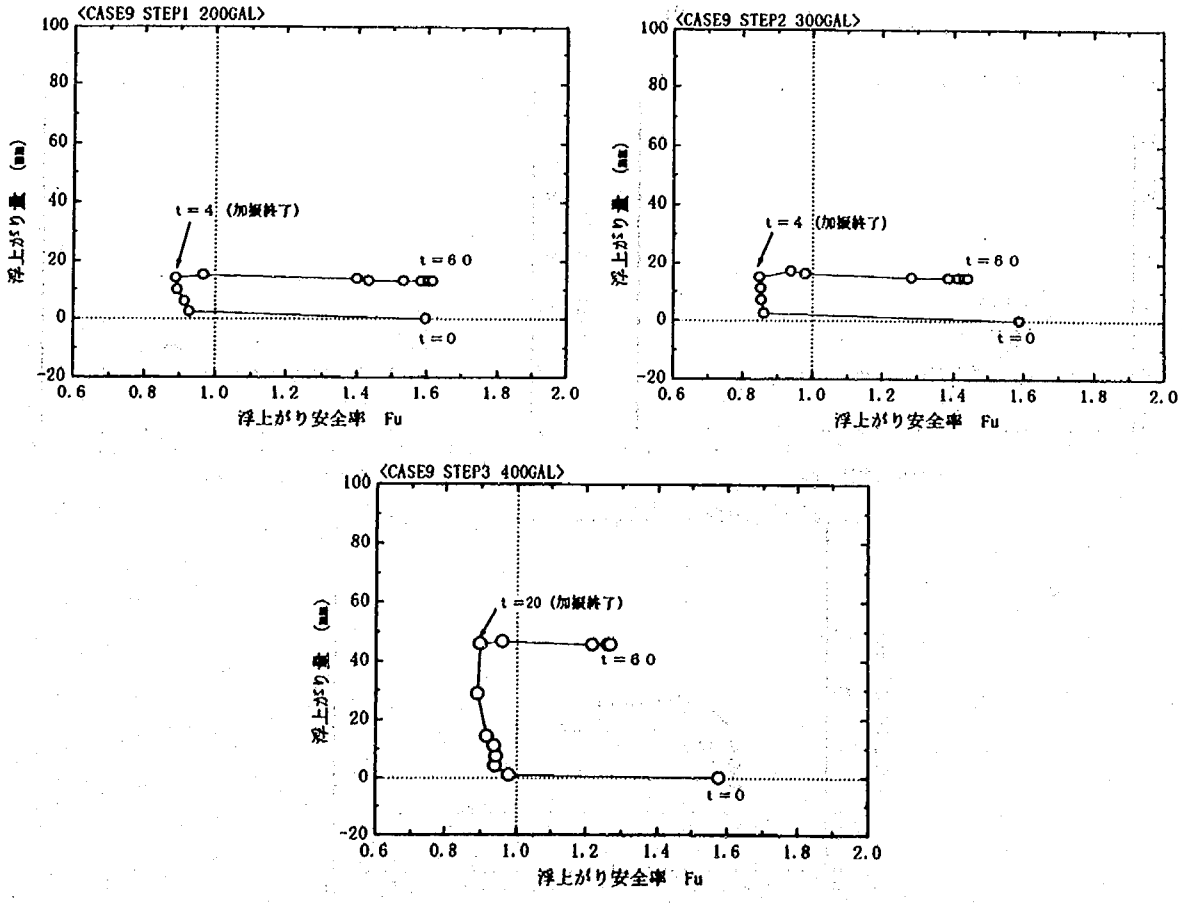


(6) ケース14

図4.14 浮上がり安全率と浮上がり量の時間変化

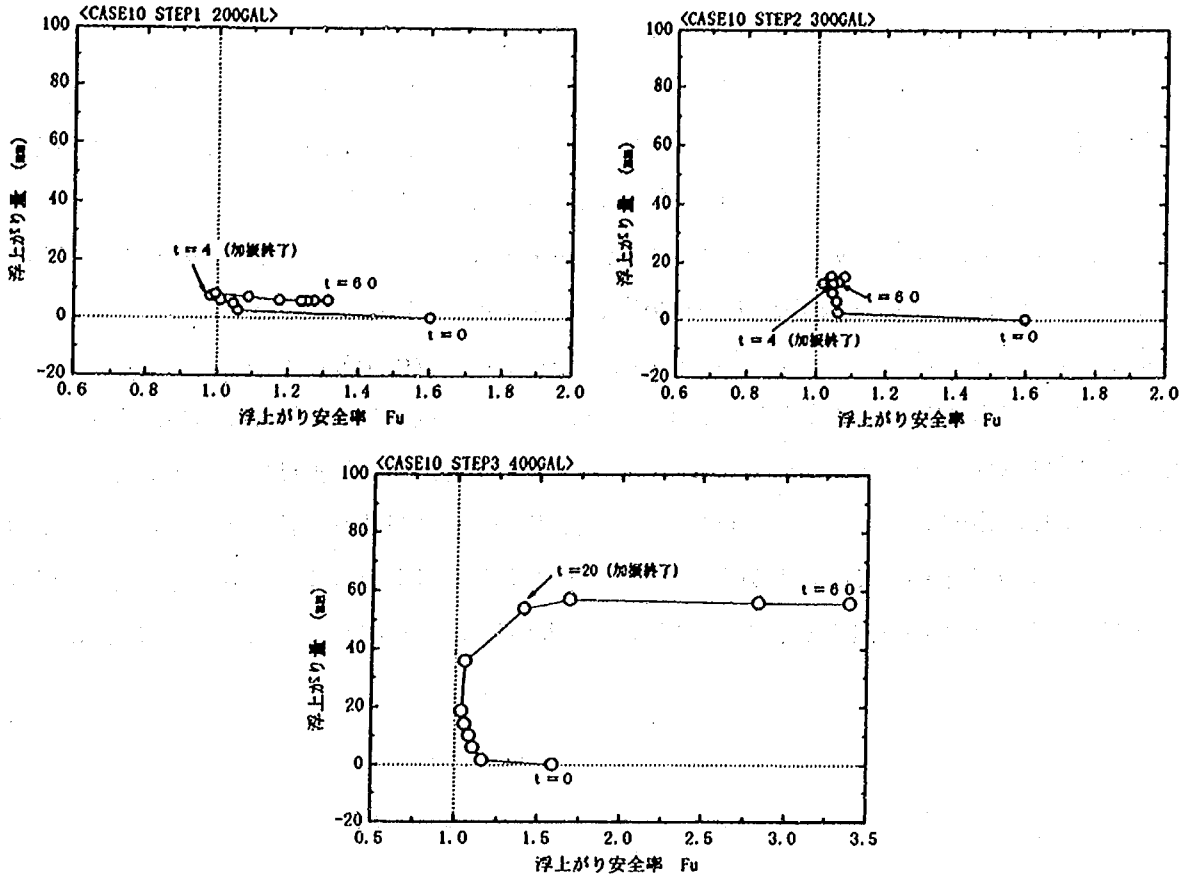
(3) 浮上がり安全率と浮上がり量の関係

各ケースにおける浮上がり安全率と浮上がり量との関係を図4.15(1)～(6)に示す。図中の数字は加振開始からの経過時間を示す。この図からも(2)の時間変化の時と同様に過剰間隙水圧の測定値が不良と思われるケース10を除きFu＜1となった時点から浮上がりが生じ、Fu＞1となった時点で浮上がりがとまる傾向にある。原地盤が液状化しやすいケース9，11原地盤が液状化しにくく埋戻し部が深いケース14では、加振終了後もFu＜1の状態で若干の浮上がりが生じているが、これは3章で述べたことと同様に過剰間隙水圧が消散し始めているものの、まだ模型を浮き上がらせるだけの十分な力が残っているためである。また、全てのケースにおいて浮上がりはFu＝0.9程度に達した時点で急激に増加する傾向を示している。原地盤が液状化しやすいケースについて無対策のケース9と上部が十和田湖砂礫で埋戻しされているケース11とでは3回目加振時においてケース11の方が浮上がり安全率では小さい値を示しているが、浮上がり量はケース9の方が大きい。このことから、今回の実験を基に計算した浮上がり安全率では浮上がりの有無は判定できるが、浮上がり量の大小についてはFuの大小だけでは判定できないことがわかる。

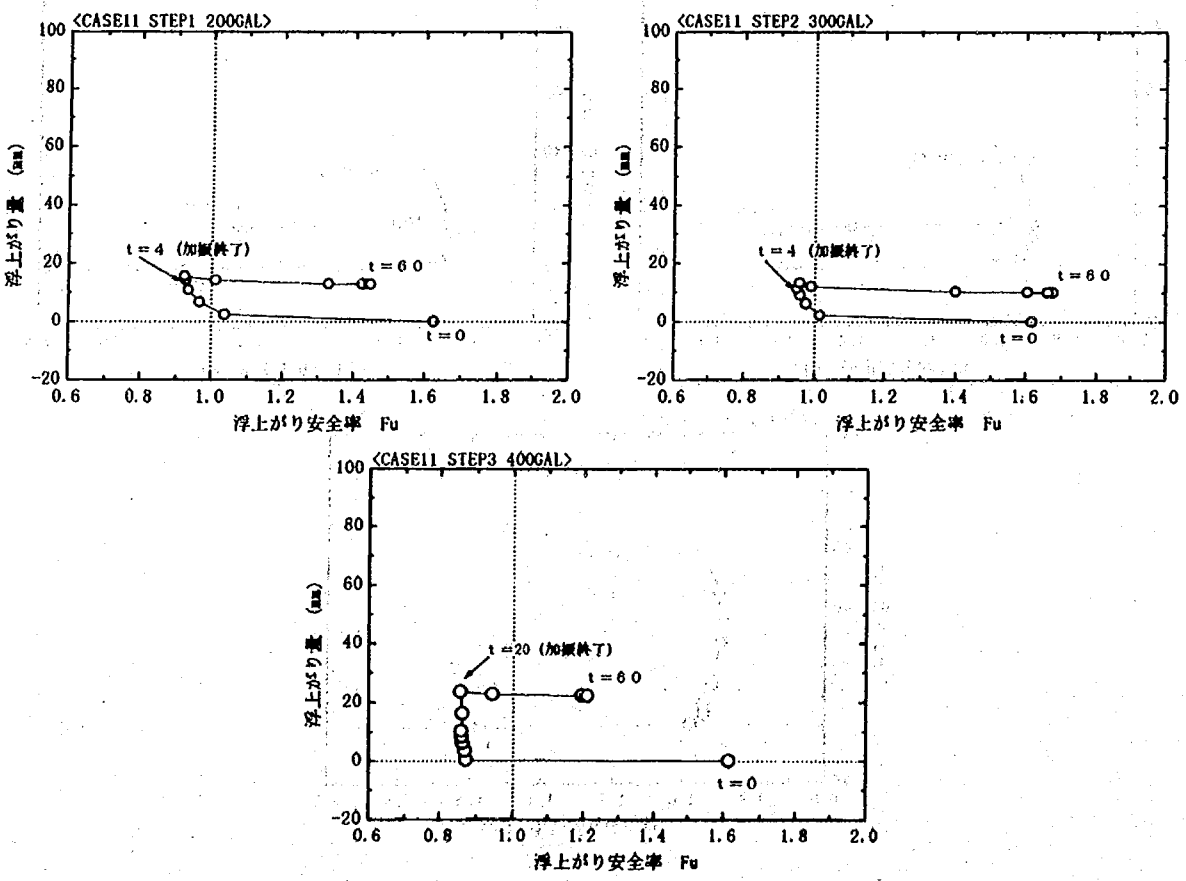


(1) ケース9

図4.15 浮上がり安全率と浮上がり量との関係

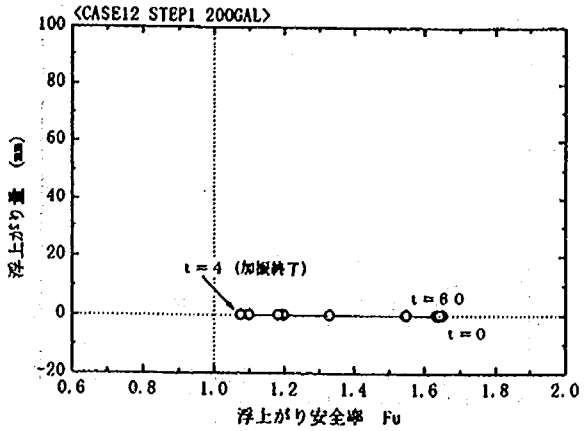


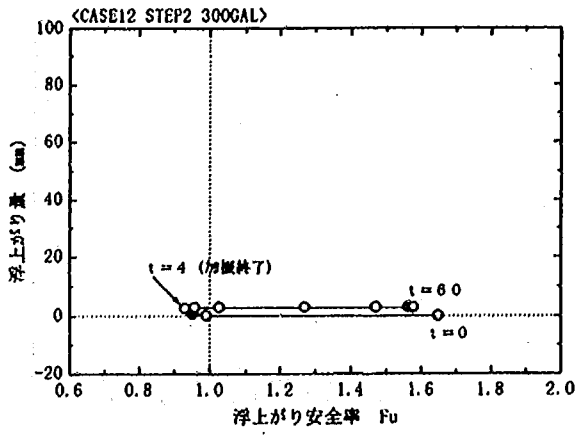
(2) ケース10

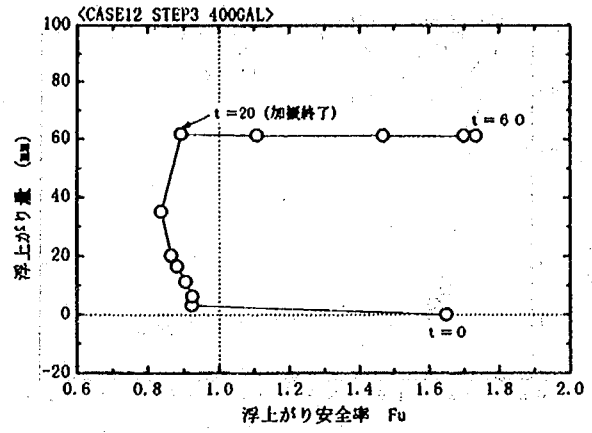


(3) ケース11

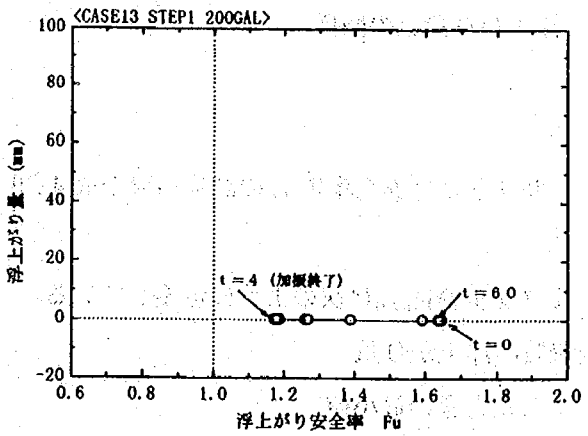
図4.15 浮上がり安全率と浮上がり量との関係

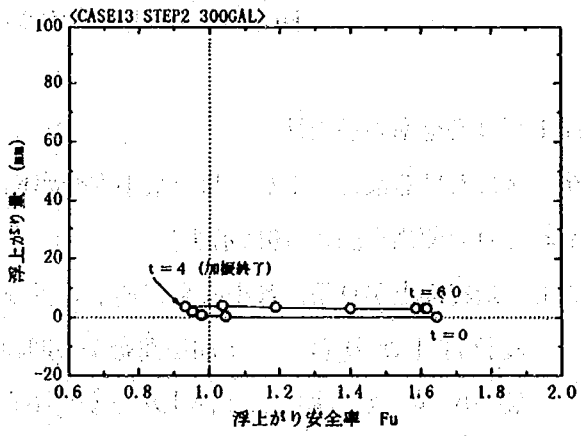


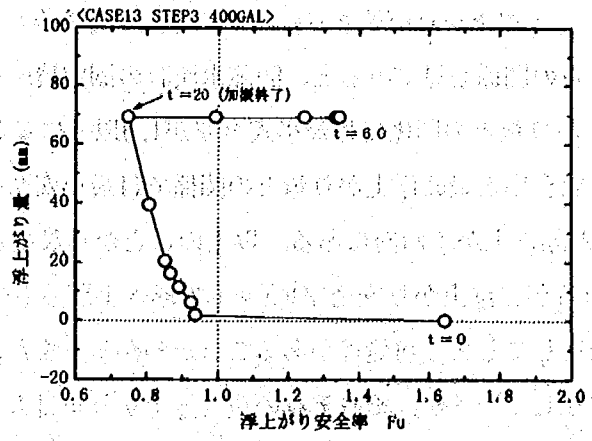




(4) ケース12

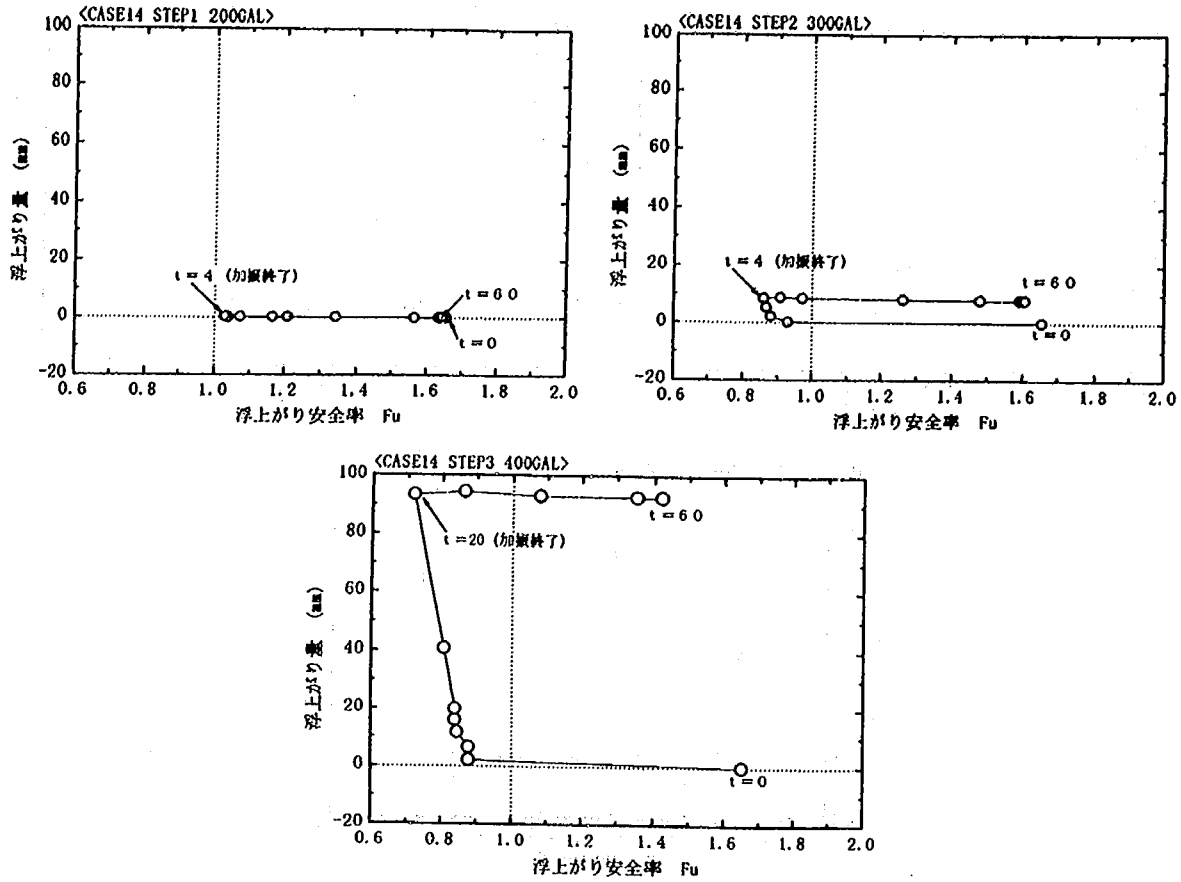






(5) ケース13

図4.15 浮上がり安全率と浮上がり量との関係



(6) ケース14

図4.15 浮上がり安全率と浮上がり量との関係

(4) 浮上がり安全率の妥当性

各ケースにおける最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLO}の計算結果を表4.9に示し、それぞれの関係を図4.16に示す。

ここで、最終浮上がり量，最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLO}は次のように定義している。

最終浮上がり量　　：加振開始から60秒経過時の浮上がり量

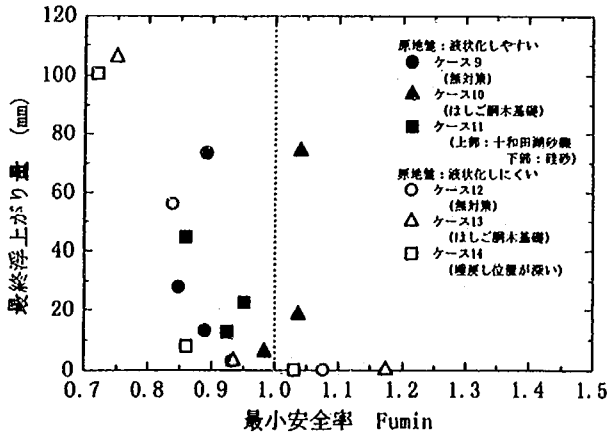
最小安全率F_{min}：浮上がり安全率を計算したときの最小値

リフトオフ安全率F_{uLO}：浮上がりが始まった時点の浮上がり安全率

最小安全率と最終浮上がり量の関係を見てみると、間隙水圧計の測定精度が疑わしいケース10の一部を除けば最小安全率と最終浮上がり量との関係では最小安全率が1.0以下になると浮上がりが生じ始めていることがわかる。リフトオフ安全率と最終浮上がり量との関係では最小安全率の場合とは異なり、リフトオフ安全率が1.1以下になると浮き上がる傾向にある。以上のことから最小安全率とリフトオフ安全率ではほぼ同様の傾向を示しているが、浮上がり安全率Fu＝1で浮き上がるものと定義すると、リフトオフ安全率の方では危険側の評価をしてしまう可能性があることがわかる。また、ケース9，11，12，14では最小安全率0.85付近に値が存在しているが、それぞれの最終浮上がり量は大きく異なる。このことから、3章で行った実験と同様に安全率の値から浮上がり量を推測することは困難ではあるが、浮上がりの有無の判定には浮上がり安全率は有効であると思われる。

表4.9　最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLo}の計算結果

CASE No.	STEP No.	最終浮上がり量 D_{uv} (mm)	浮上がり安全率 Fu 最小安全率 F_{umin}	リフトオフ安全率 F_{uLo}
9	1	13.00	0.890	0.929
	2	27.79	0.848	0.861
	3	73.29	0.892	0.978
10	1	5.84	0.984	1.058
	2	18.23	1.037	1.062
	3	73.95	1.040	1.162
11	1	12.60	0.924	1.037
	2	22.54	0.951	1.016
	3	44.68	0.859	0.872
12	1	0.04	1.076	1.199
	2	2.95	0.932	0.993
	3	55.95	0.838	0.924
13	1	0.01	1.174	1.261
	2	2.81	0.934	1.047
	3	105.81	0.749	0.938
14	1	0.08	1.030	1.167
	2	7.97	0.860	0.932
	3	100.49	0.719	0.879



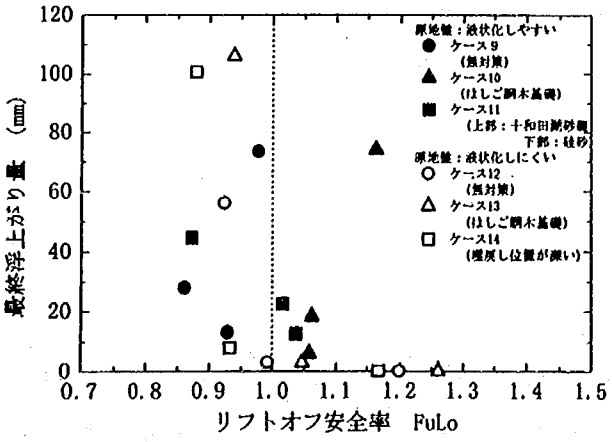


図4.16　最終浮上がり量と最小安全率F_{min}、リフトオフ安全率F_{uLo}との関係

4.5 まとめ

(1) 管渠下部の基礎の有無による浮上がり量の違いは、基礎のないものの方が小さな加速度で大きな浮上がりを生じた。埋戻し部上部を砕石で埋め戻した場合にも浮上がりは生じたが、硅砂だけを埋戻したものと比べるとその浮上がり量は6割程度であった。また、埋戻し部が深いケースの方が浮上がり量が大きかった。

(2) 原地盤が液状化しやすい場合、下部では原地盤が埋戻し部を押し込み、上部では埋戻し部が原地盤部に流れ込むように広がるような変形をした。埋戻し部は管渠の浮上がりに伴いドーム状に変形し、地表面は原地盤と比べると盛り上がる傾向にあった。原地盤が液状化しにくい場合では、原地盤部からの押し込みはあまり見られず、埋戻し部でも管渠の上方のみ上部地盤を押し上げるという変形をした。地表面に関しては沈下傾向であった。

(3) 各ケースごとに浮き上がり安全率Fuを求めたところFu＜1.0となった時点で浮上がりが生じ始め、Fu＝0.9程度に達した時点で急激に浮上がり量が増加する傾向にあった。

5．管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験（その３）

～浮上がり対策としての砕石埋戻しの効果に関する実験～

5．1　実験目的

下水道管渠の地震時液状化による安価な浮上がり防止対策として砕石による埋戻しが考えられる。これは地震時の地盤内に発生する過剰間隙水圧の発生を抑制することにより液状化の発生を低減させる対策である。

しかし、平成６年の三陸はるか沖地震において、十和田市の下水道管渠で埋戻し材として礫混じり砂を用いていたが、最大で30cm程度の浮上がりが生じた。これは、管渠廻りに充填したクッション砂の液状化によると考えられており[6]、砕石で埋め戻した場合でも埋戻し条件によっては対策効果が低いことも考えられる。

ここでは、下水道管渠を対象として、地盤の液状化による管渠の浮上がり対策工としての砕石埋戻しの効果を、原地盤の密度、および砕石埋戻しの位置を変化させた模型振動実験により検討を行った。

5．2　実験内容

実験の概要を表５．１に、実験模型の概要を図５．１に示す。実験は管渠を対象として、実験模型は原地盤の密度が低く液状化しやすいモデル（モデル７）および原地盤の密度が高く液状化しにくいモデル（モデル

表５．１　実験の概要

模型番号		模型形状	模型の比重	原地盤（豊浦砂）	埋戻し部	基礎の種類	加振条件
モデル７	ケース15	φ51mmの管渠模型	0.600	Dr=61%	下部：硅砂（空中落下法による緩詰め）Dr=18% 上部：砕石 Dr=22%	なし	正弦波 5Hz
	ケース16				砕石：Dr=22%		加振加速度
	ケース17				下部：砕石：Dr=22% 上部：硅砂（空中落下法による緩詰め）Dr=17%		215gal 20波
モデル８	ケース18			Dr=97%	下部：硅砂：（水中落下法による緩詰め）Dr=38% 上部：砕石 Dr=37%		311gal 20波 414gal 100波
	ケース19				砕石 Dr=29%		
	ケース20				下部：砕石 Dr=31% 上部：硅砂（水中落下法による緩詰め）Dr=37%		

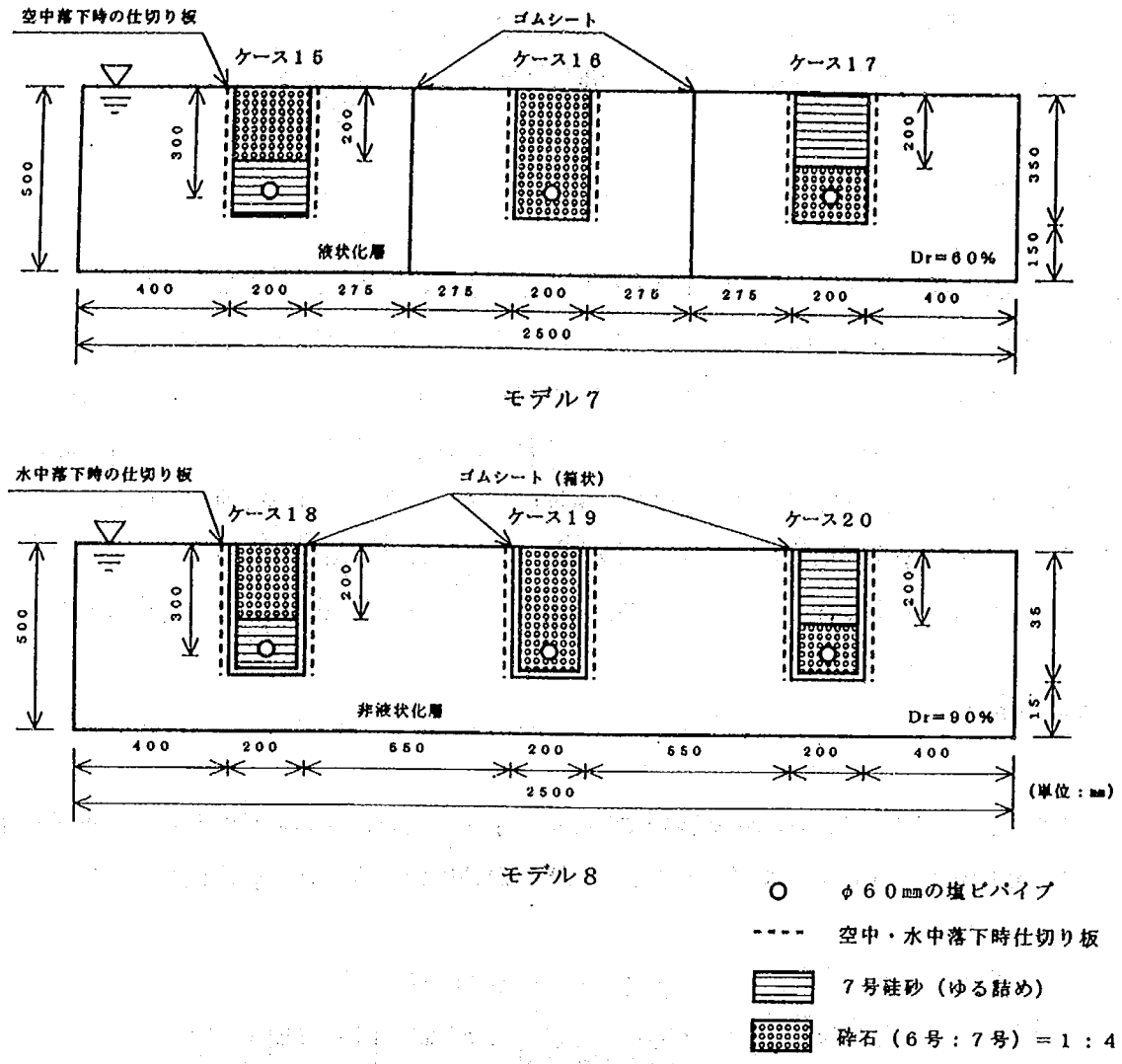


図5.1　実験模型の概要

8）に対し、それぞれ埋戻し部上部を砕石で埋め戻した場合（ケース15, 18)、埋戻し部下部を砕石で埋め戻した場合（ケース17, 20)、および埋戻し部すべてを砕石で埋め戻した場合（ケース16, 19）の6ケースとした。加振条件および測定項目は実験（その2）で行った実験と同様に設定した。

5.3　実験方法

実験（その1)、および実験（その2）と同様、建設省土木研究所内のダム耐震実験施設にある振動台[12]、および土槽を用いて実施した。

5.3.1　模型作成

模型の作成は実験（その2）とほぼ同様の方法で行った。

(1) 管渠模型は、鉛散弾を投入して見かけの単位体積重量γを0.6gf／cm³に重量調整した塩化ビニル製のパイプ（外径φ6.0cm）を用いた。なお、用いた管渠模型は実験（その2）で用いたものと同様である。

(2) 地盤の作成に用いた材料の物性値を表５．２に示す。原地盤は豊浦砂を用いて作成した。原地盤の密度が低いモデル７では空中落下法により相対密度Dr＝60％を目標に作成した。一方、原地盤の密度が高いモデル８においては砂を水中落下させた後、振動台で加振することにより相対密度Dr＝100％を目標に締め固め、さらに水締めを行った。

また、隣接した埋戻し部に過剰間隙水圧の回り込みを防ぐため、ゴムシートを実験（その２）と同様にモデル７では各埋戻し部間の原地盤部に、モデル８では埋戻し部と原地盤部の境界に設置した。

表５．２　地盤材料物性値

試験項目 ＼ 試験名		豊浦砂	7号珪砂	砕石		
				6号	7号	混合※1
粒度試験	粗礫分　(%)	−	−	0.0	0.0	0.0
	中礫分　(%)	−	−	99.38	18.2	34.4
	細礫分　(%)	0.0	−	0.6	78.6	63.0
	粗砂分　(%)	0.3	0.0	0.0	3.2	2.6
	細砂分　(%)	99.6	96.0	−	0.0	0.0
	シルト分　(%)	0.1	4.0	−	−	−
	最大粒径　(mm)	0.85	0.425	19.0	9.5	19.0
	均等係数　Uc	1.80	1.53	1.62	1.73	2.05
	曲率係数　Uc'	1.08	0.85	0.92	0.94	0.97
最大・最小※2 密度試験	最大密度　ρdmax(g/cm³)	1.658	1.623	−	−	1.655
	最小密度　ρdmin(g/cm³)	1.348	1.261	−	−	1.381
土粒子の密度　ρs(g/cm³)		2.640	2.645	−	−	−
粗骨材の比重　DD ※3		−	−	−	−	2.701
備考		※1　混合比(6号・7号)，物理値は、全て計算上（混合比）の値 ※2　豊浦砂，7号珪砂は砂の最大・最小密度試験 ※3　砕石は、粒径材料の最大・最小密度試験 絶対乾燥状態の比重				

(3) 埋戻し部に用いた材料は硅砂および砕石で、硅砂は実験（その２）で用いたものと同様の７号硅砂を用い、砕石は実験（その２）で用いた十和田湖砂礫とは異なり６号砕石と７号砕石を重量比１：４でブレンドしたものを用いた。埋戻し部の作成に用いた砕石の粒径加積曲線を図５．２に示す。ケース16，19は埋戻し部をすべて砕石で埋戻し、ケース15，18は埋戻し部上部を砕石で、下部を硅砂で埋戻し、ケース17，20は埋戻し部下部を砕石で、上部を硅砂で埋め戻した。

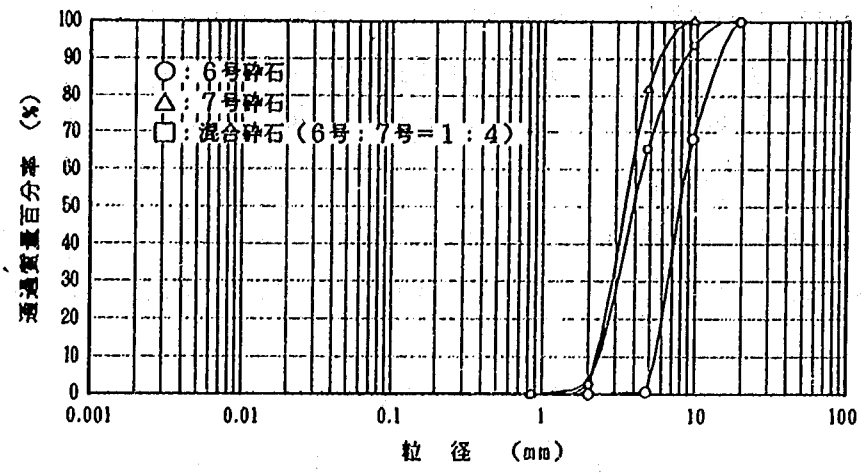


図５．２　砕石の粒径加積曲線

埋戻し部の変形を見るための横メッシュを、硅砂部は朱墨汁で染めたもの、砕石部は白の水性ペンキで着色したものを用いて、５cm毎に作成した。

(4)　実験に用いた計測器は、加速度計、間隙水圧計および変位計である。計器配置を図５．３(1), (2)に、計測器の仕様を表５．３に示す。計測に用いた機器の仕様、浮力調整、配置方法等は実験（その２）と基本的には同様であるが、管渠直下の水圧計に関しては実験（その２）と異なり、中央（記号PM＊：＊にはケース番号が入る）と前面側（PM＊F）の二つを管渠に取り付け、後面側（PM＊E）は埋戻し部に設置した。

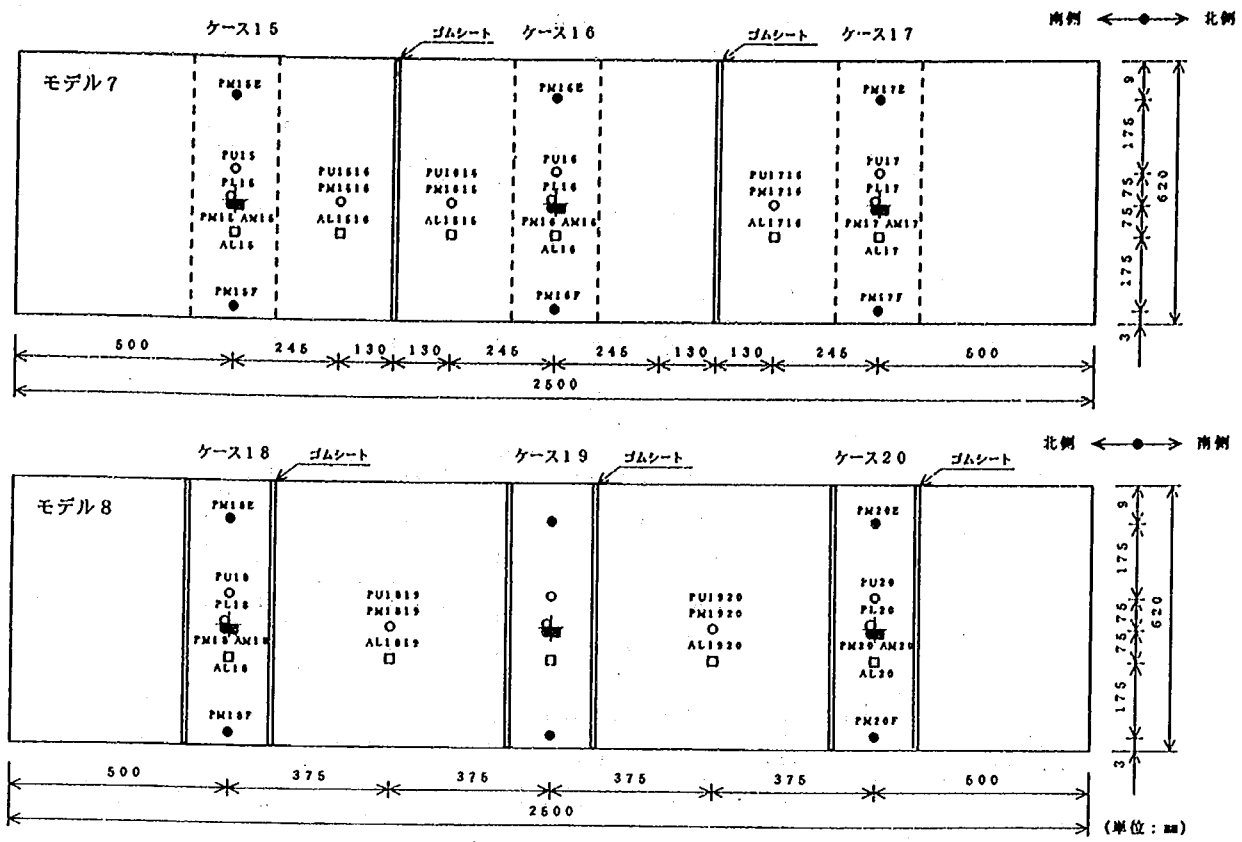
(5)　地盤の飽和は炭酸ガスによる通気後、脱気水による通水により行った。

(6)　砂、砕石の投入量と体積から地盤作成時の密度を算出した。結果を表５．４に示す。

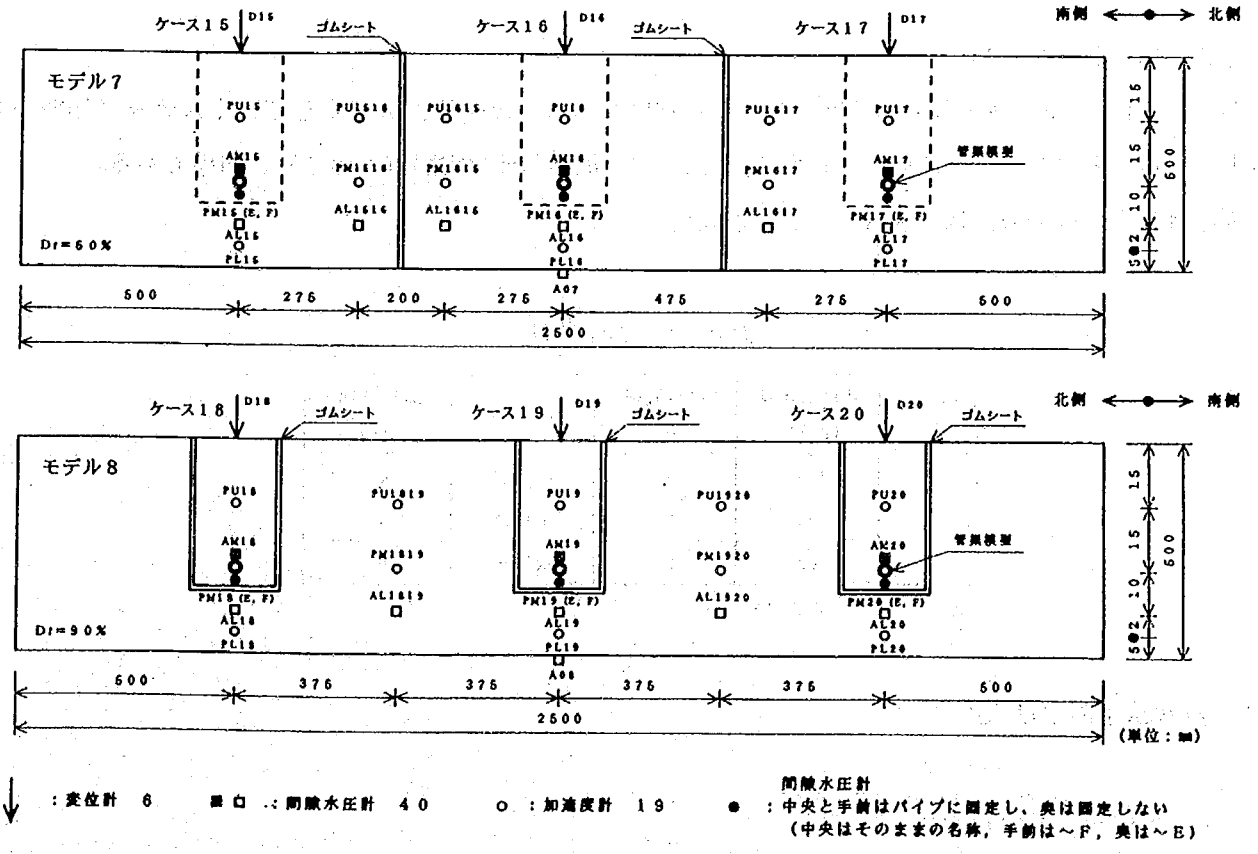
表５．３　計器の仕様

計器名	記号	設置位置	時刻歴の符号	仕様
加速度計	AT-＊	振動台	図5.5の北向き＋	共和電業　AS-2GA 容量：２G
	AM-＊	管渠模型		
	AL-＊	原地盤部（埋戻し部直下400mm）		
間隙水圧計	PU-＊	埋戻し部上部（150mm）	増加＋	・管渠模型直下のみ ＳＳＫ 容量：0.1～0.5kgf/cm²
	PM-＊, ＊F	管渠模型直下		
	PM-＊E	埋戻し部（管渠模型直下）		
	PL-＊	原地盤部（埋戻し直下450mm）		・その他 共和電業 容量：0.5～１kgf/cm²
	PU-＊＊	原地盤部（150mm）		
	PM-＊＊	原地盤部（300mm）		
	PL-＊＊	原地盤部（450mm）		
変位計	D-＊	管渠模型	浮上がり－	共和電業　50mm, 30mm

加速度計は全て水平方向に設置した。記号の中の＊には、センサー番号が入る。



(1) 平面図



(2) 側面図

図5.3 計器の配置

表5．4　模型地盤作成結果一覧

項目				乾燥密度 (g/cm³)	相対密度 (%)
モデル7	原地盤		全体（豊浦砂）	1.520	61
	埋戻し地盤	ケース15	上層部（砕石）	1.433	22
			下層部（硅砂）	1.315	18
		ケース16	全体（砕石）	1.432	22
		ケース17	上層部（硅砂）	1.311	17
			下層部（硅砂）	1.434	22
モデル8	原地盤		全体（豊浦砂）	1.647	97
	埋戻し地盤	ケース18	上層部（砕石）	1.470	37
			下層部（硅砂）	1.379	38
		ケース19	全体（砕石）	1.450	29
		ケース20	上層部（硅砂）	1.374	37
			下層部（砕石）	1.456	31

項目	豊浦砂	7号硅砂	混合砕石
ρ_{dmax} (g/cm³)	1.658	1.624	1.655
ρ_{dmin} (g/cm³)	1.348	1.261	1.381
ρ_s (g/cm³)	2.640	2.645	—
D_0 (g/cm²)	—	—	2.701

5．3．2　加振および計測

加振は、5 Hzの正弦波を入力加速度として、加速度レベルを段階的に大きくしていくステップ加振で3段階実施した。各ステップの加振条件を表5．5に示す。加振条件は実験（その2）と同様である。

計測項目および収録方法は実験（その2）と同様である。

表5．5　加振条件

ステップ No.	目標加速度 (gal)	加振周波数 (Hz)	入力波形	加振時間 (sec)
1	200	5	正弦波	4
2	300	5	正弦波	4
3	400	5	正弦波	20

※ 全モデルに共通である

5．4　実験結果および考察

5．4．1　実験データの時刻歴

各模型の各加振ステップでの加振時および過剰間隙水圧消散時の測定データの時刻歴の主なものを図5．4(1)～(4)に示す。計測器設置位置は図5．3に、時刻歴の符号は表5．3に示した通りである。

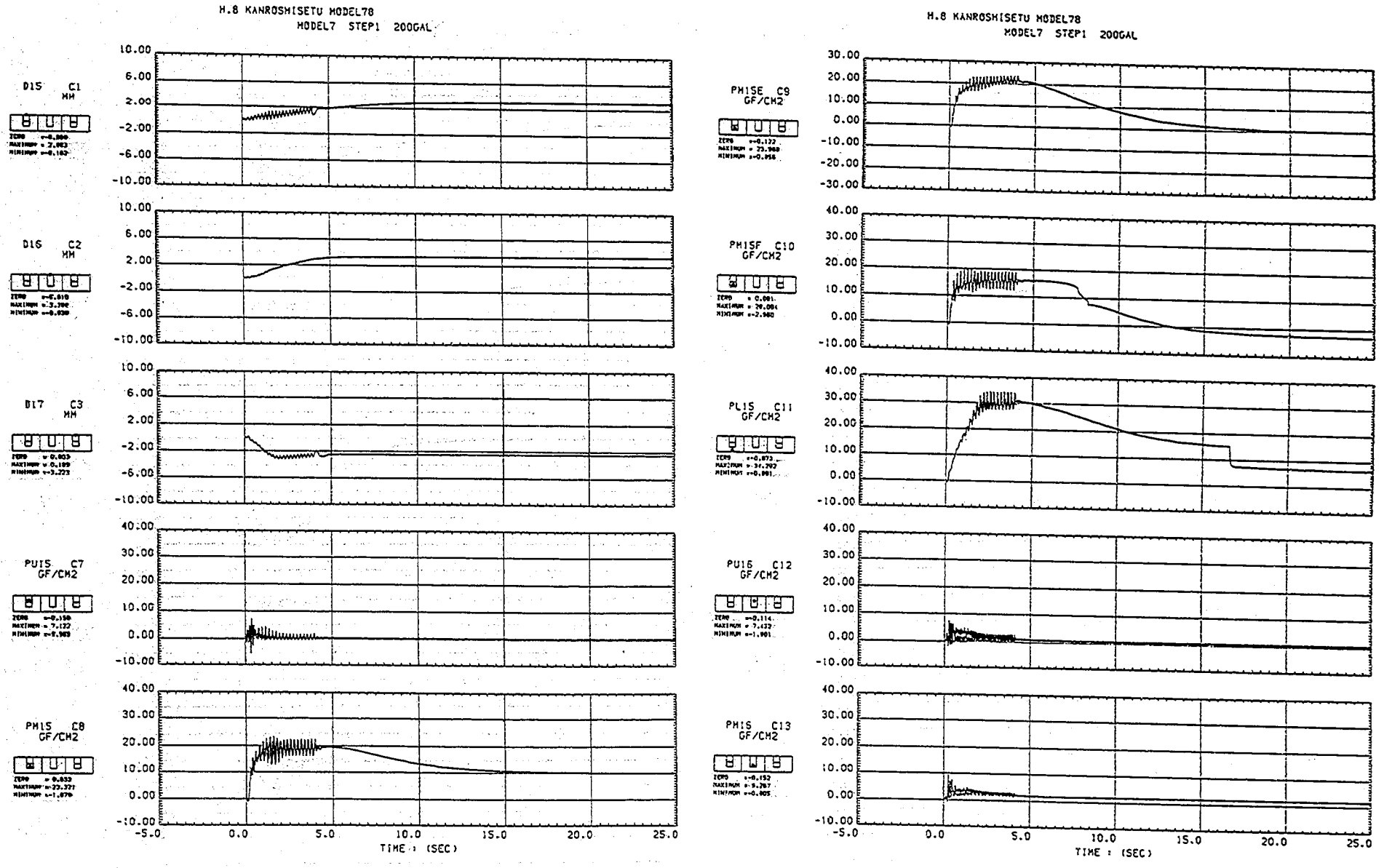


図5.4(1) 測定データの時刻歴（モデル7、ステップ1）

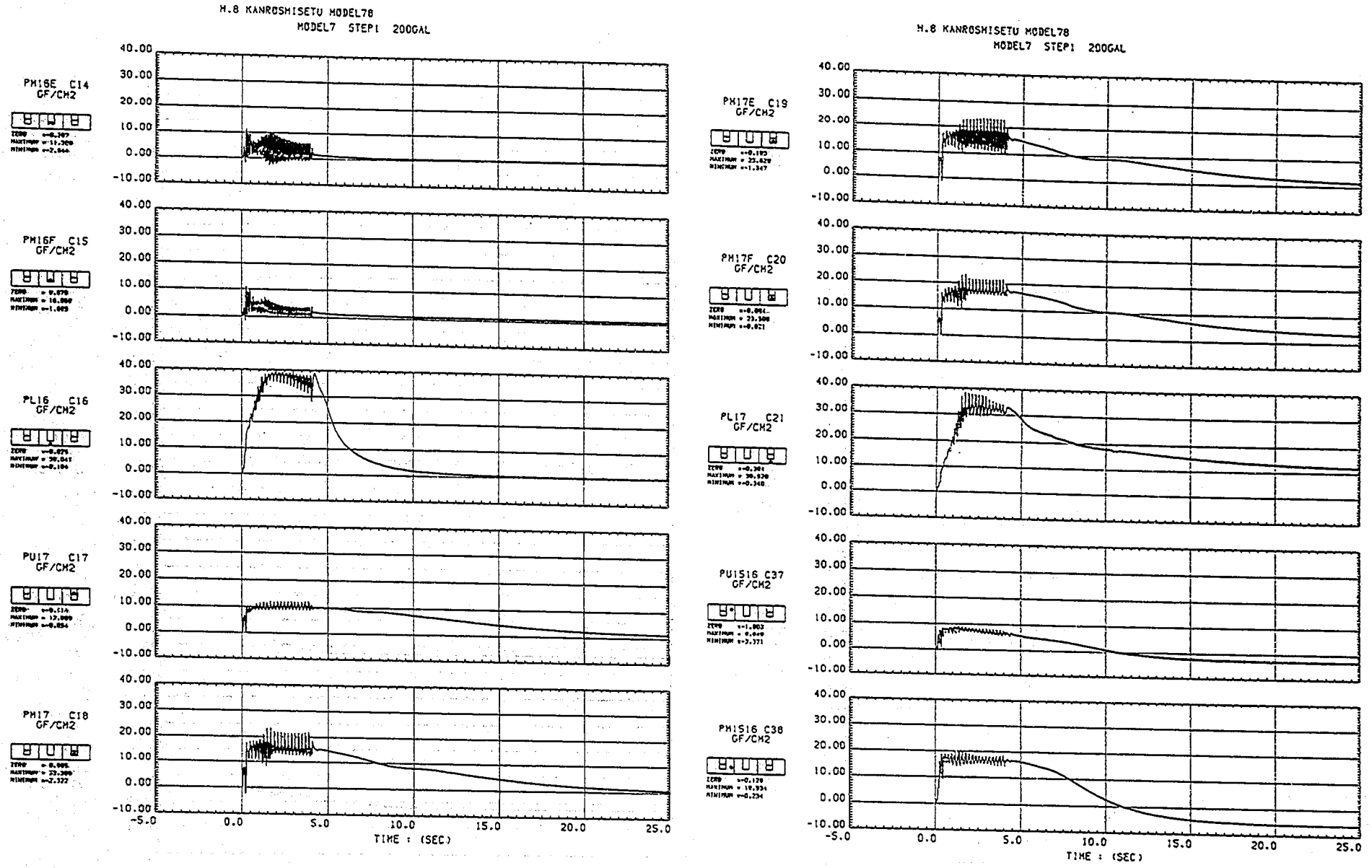


図5．4(1) 測定データの時刻歴（モデル7、ステップ1）

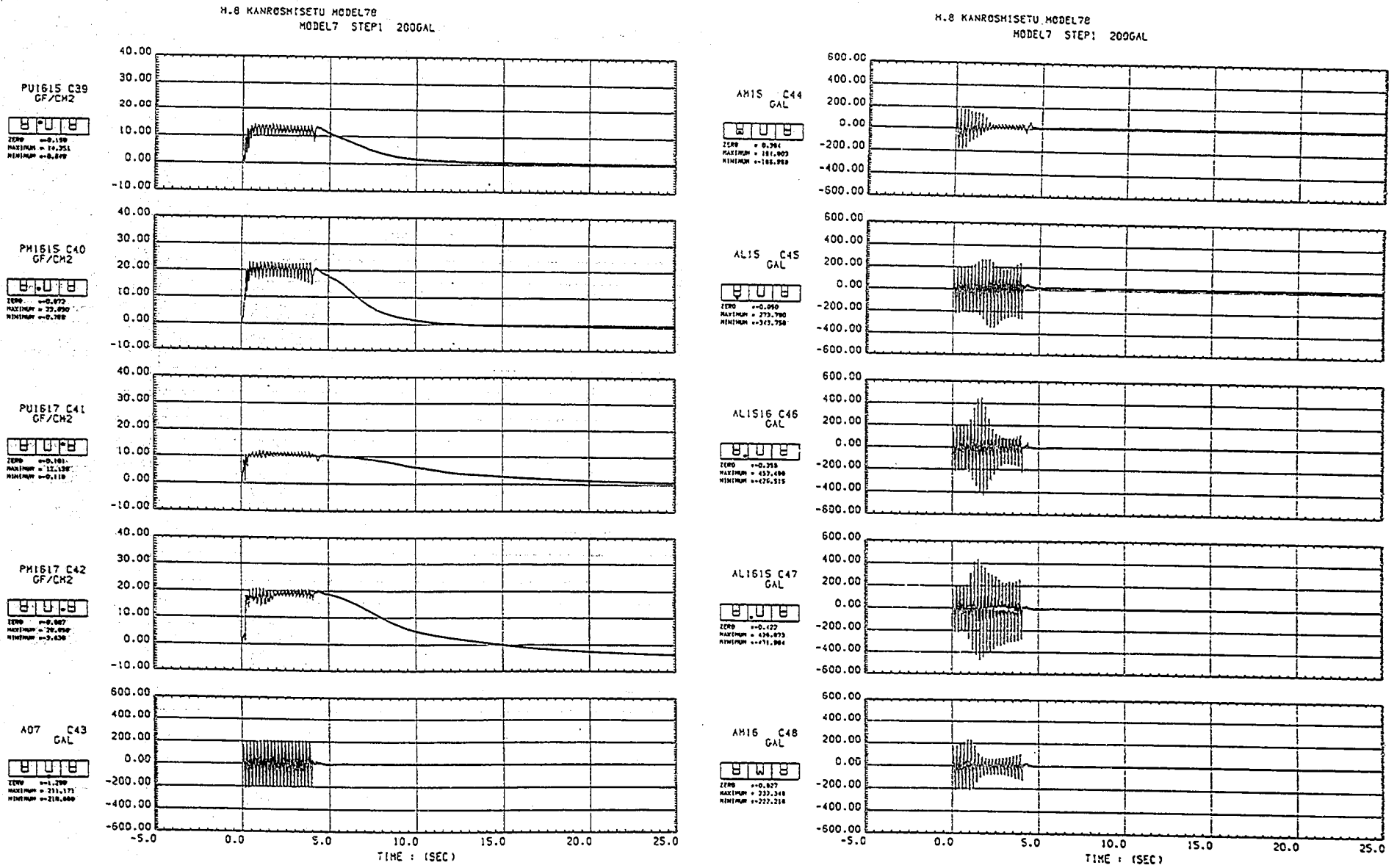


図５．４(1)　測定データの時刻歴（モデル７、ステップ１）

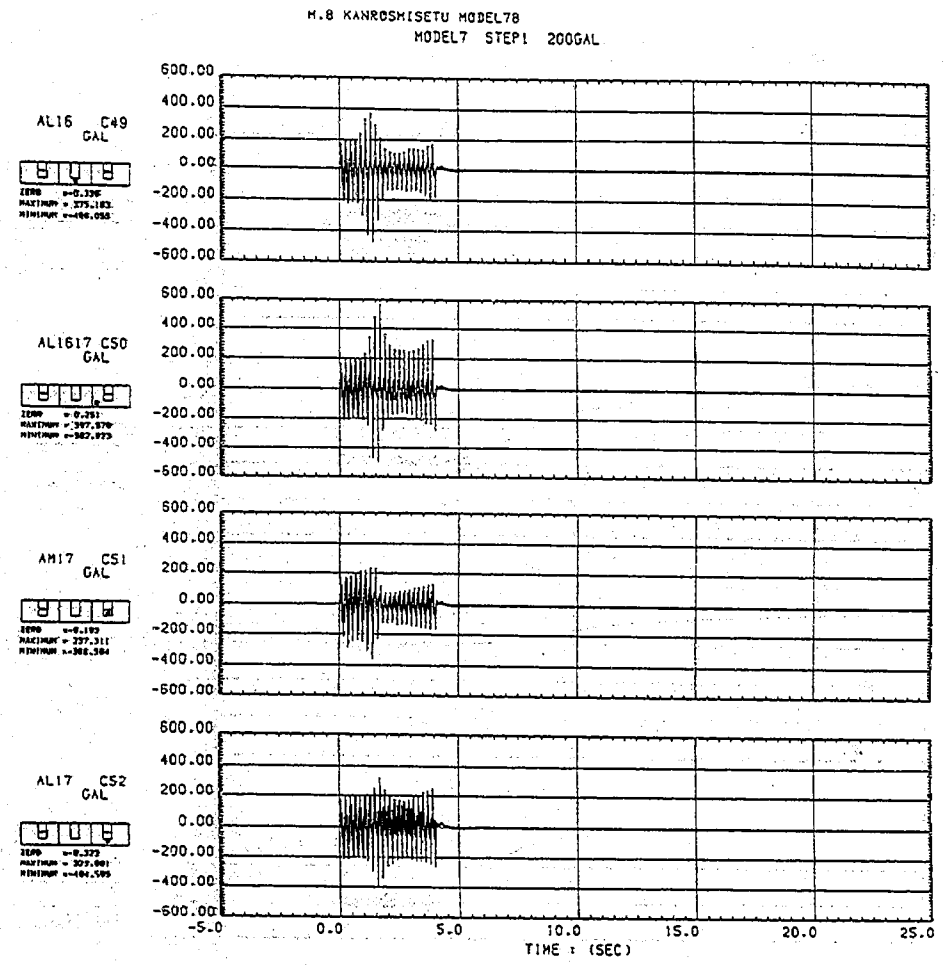


図５．４(1)　測定データの時刻歴（モデル７、ステップ１）

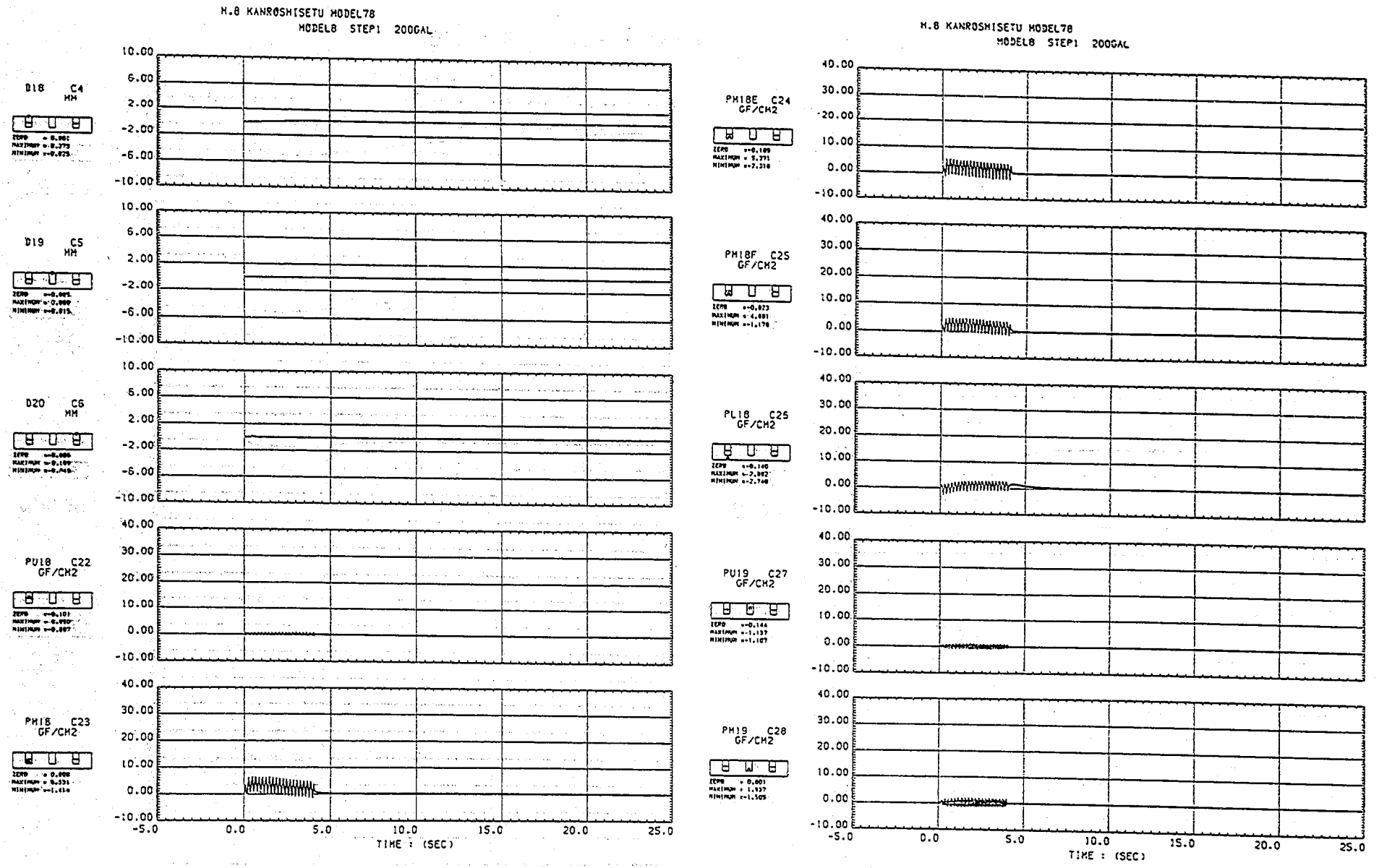


図５．４(2)　測定データの時刻歴（モデル８、ステップ１）

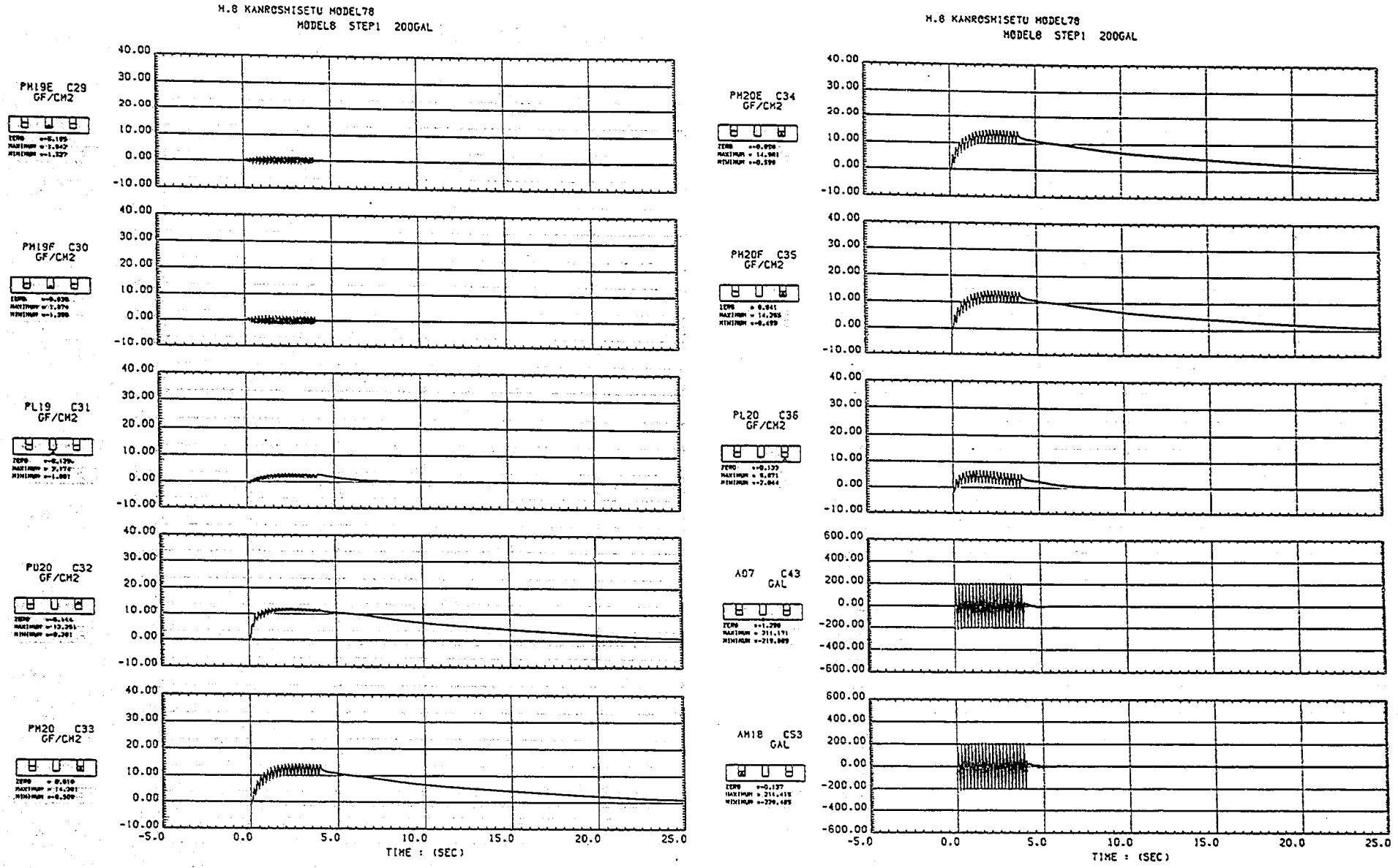


図5.4(2) 測定データの時刻歴（モデル8、ステップ1）

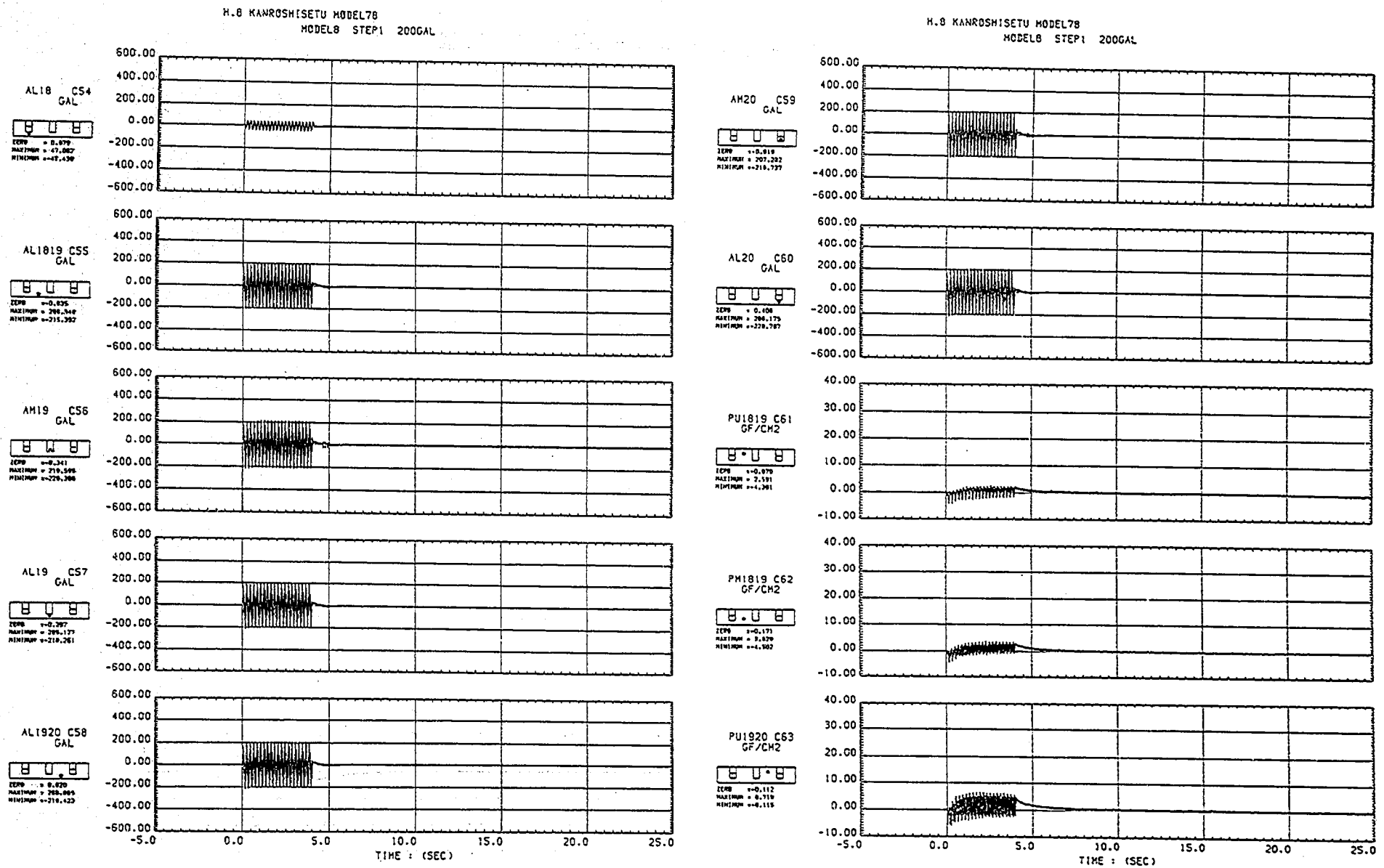


図５．４(2)　測定データの時刻歴（モデル８、ステップ１）

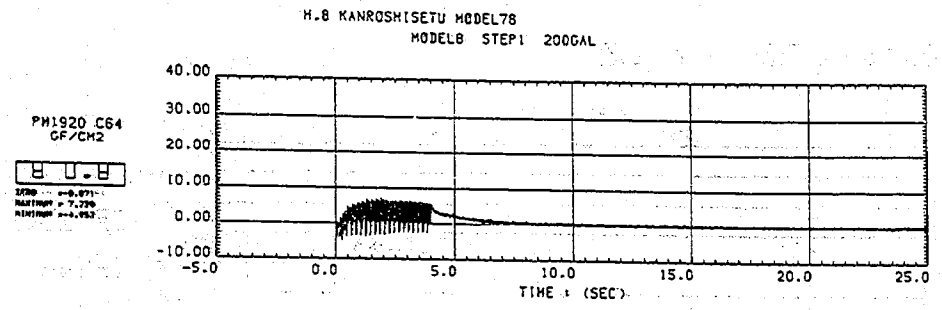


図５．４(2)　測定データの時刻歴（モデル８、ステップ１）

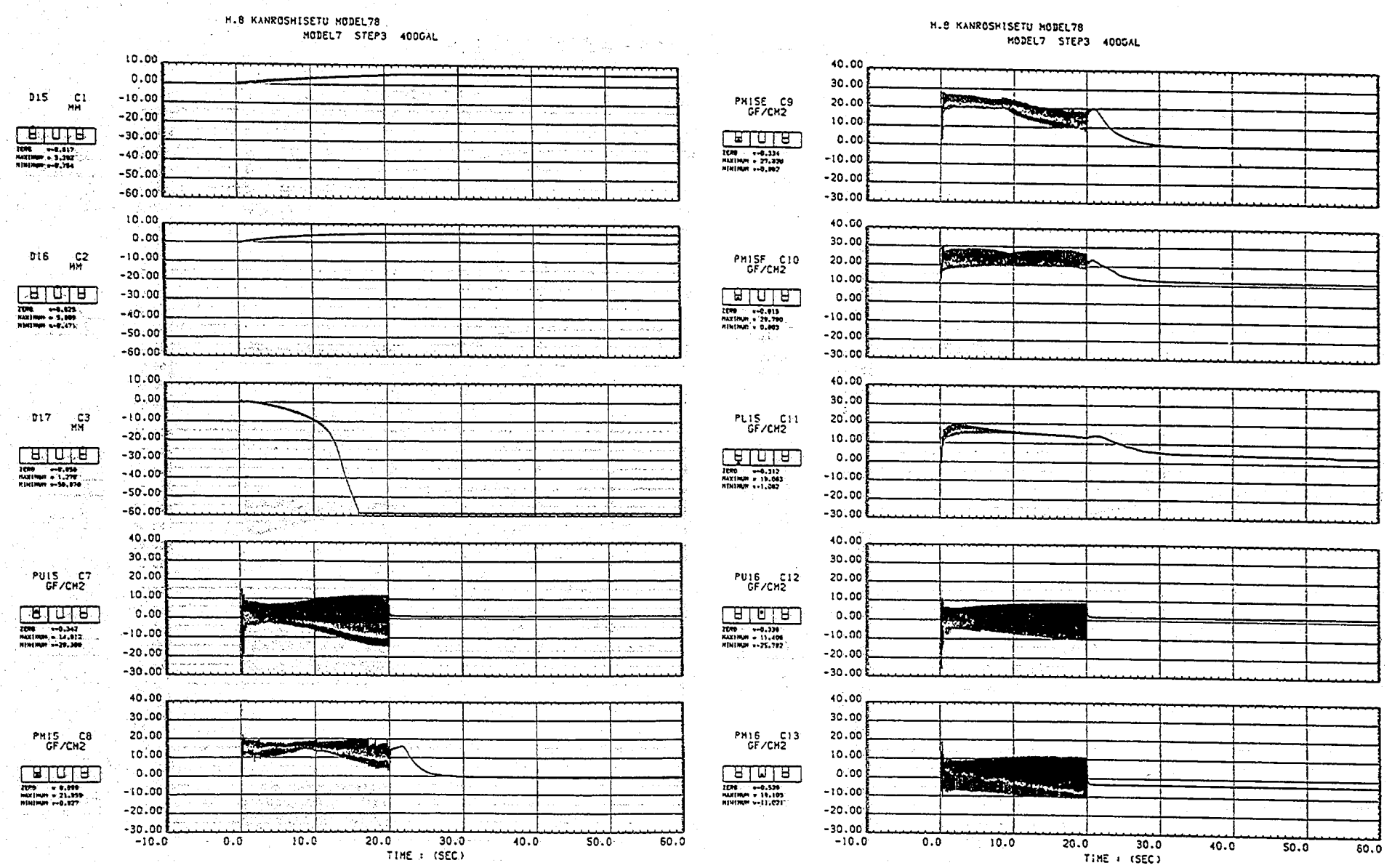


図５．４(3)　測定データの時刻歴（モデル７、ステップ３）

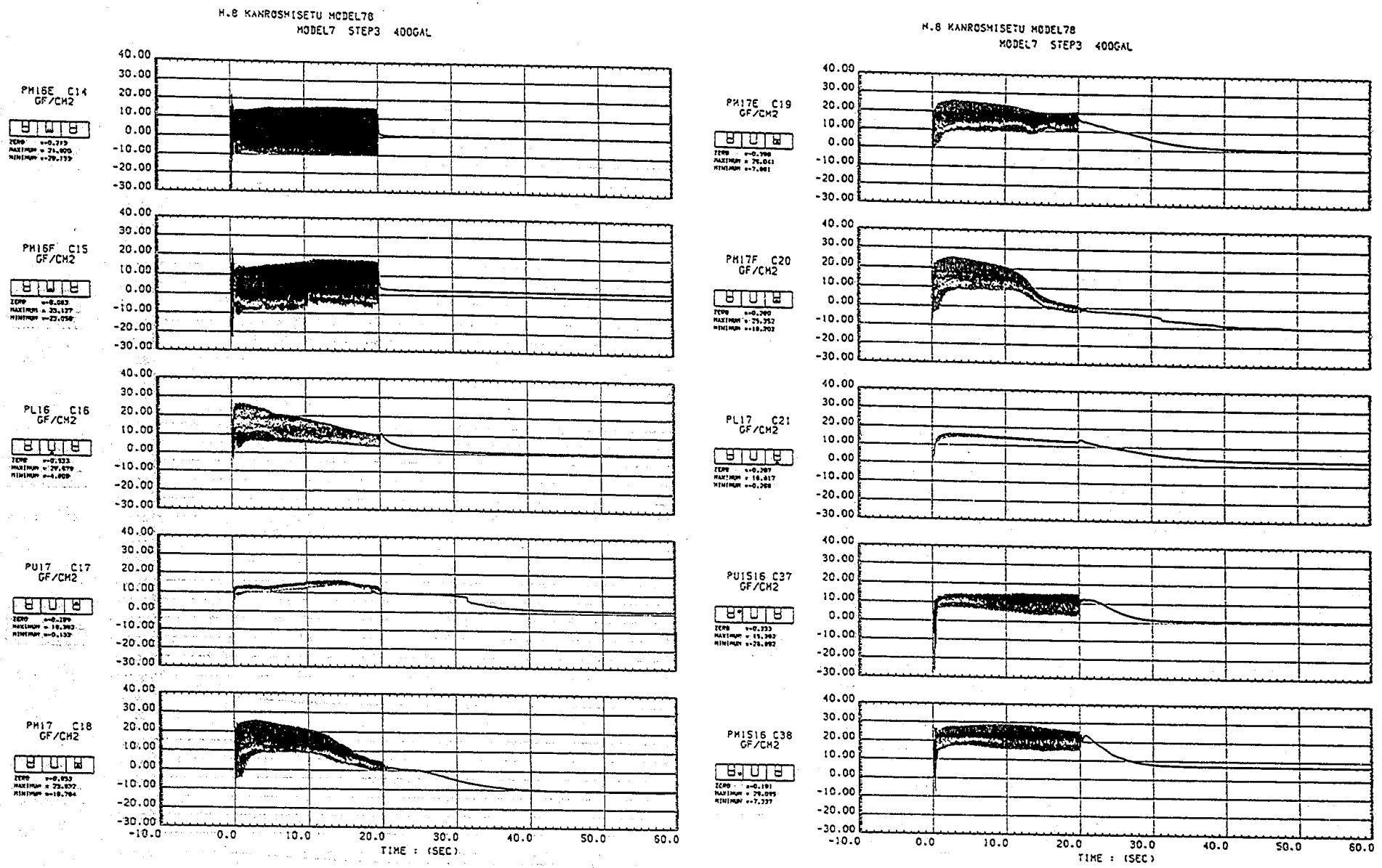


図5.4(3) 測定データの時刻歴（モデル7、ステップ3）

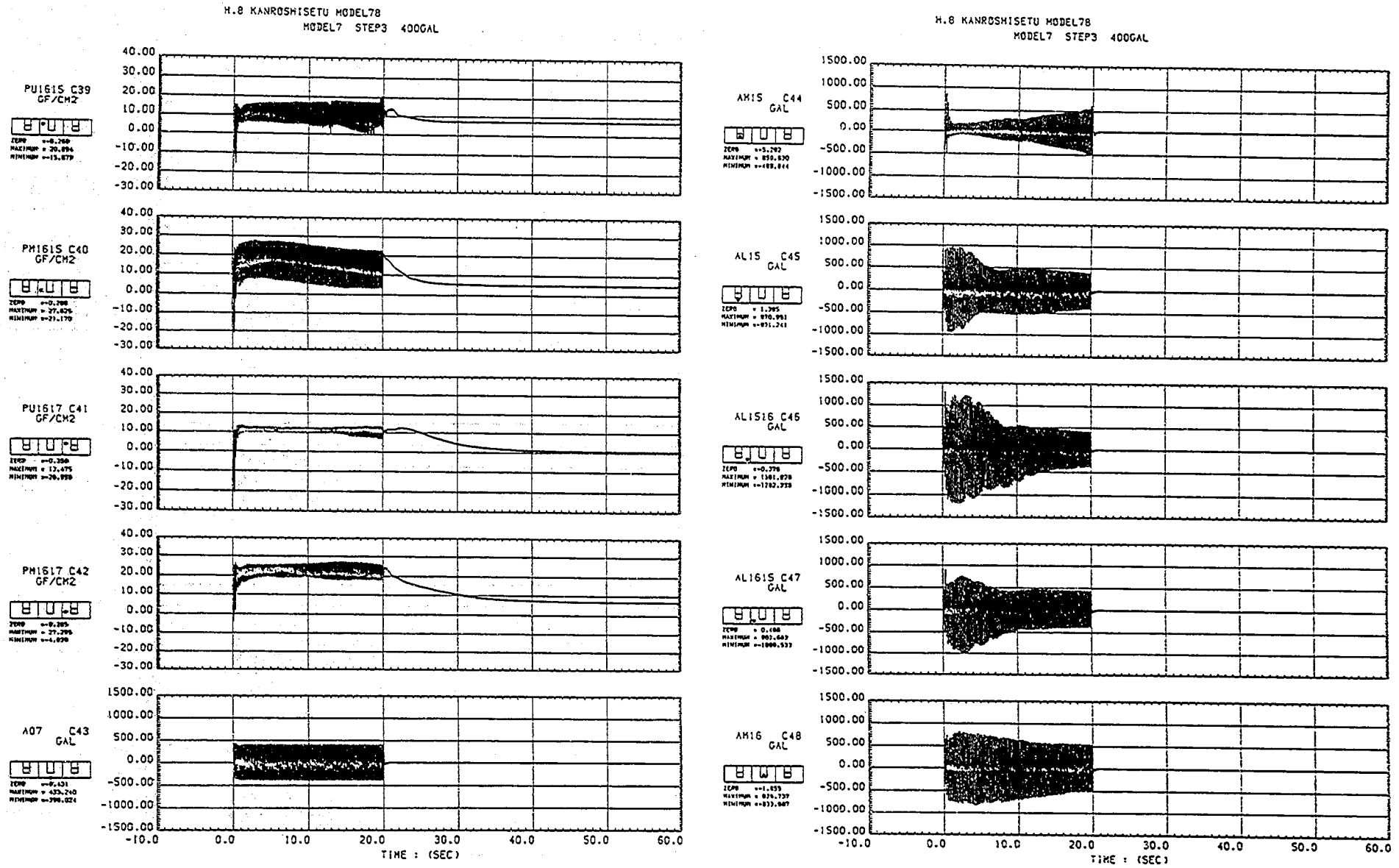


図５．４(3)　測定データの時刻歴（モデル７、ステップ３）

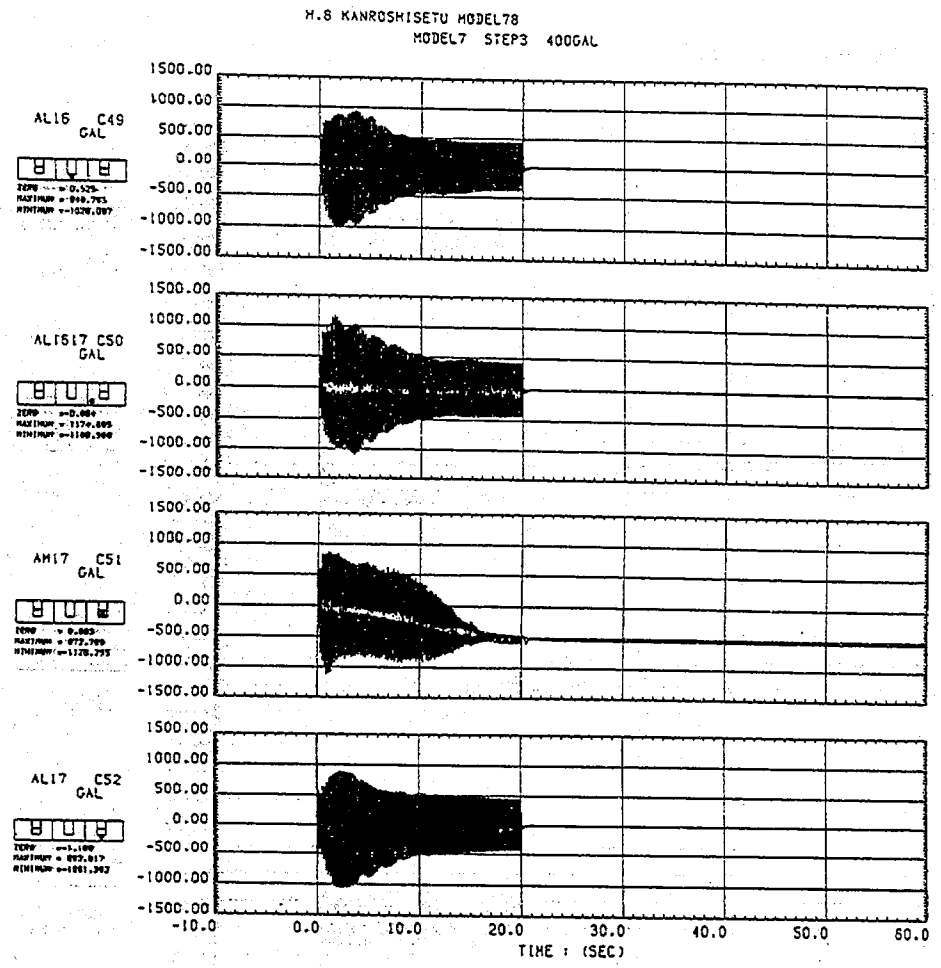


図5.4(3) 測定データの時刻歴（モデル7、ステップ3）

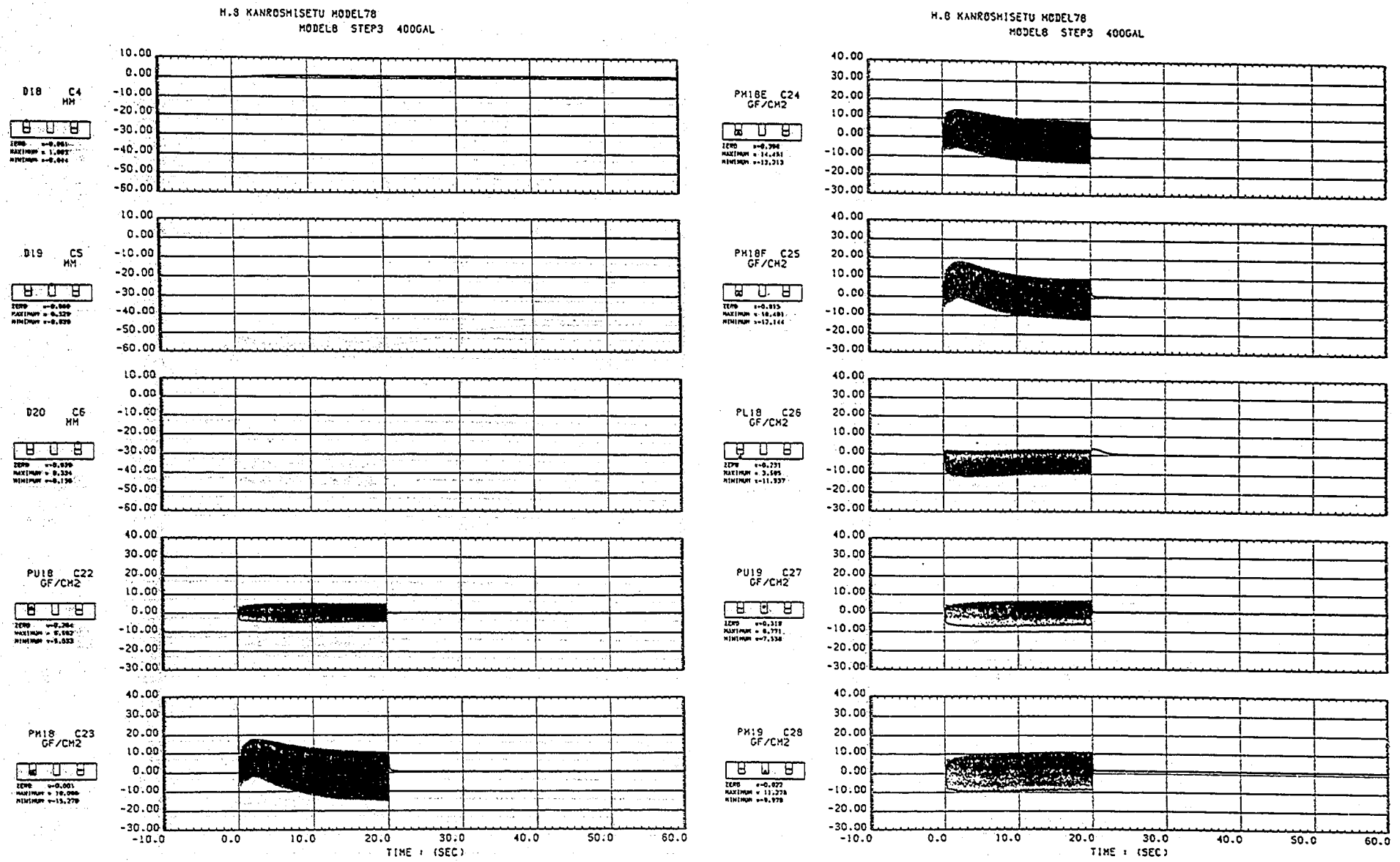


図５．４(4)　測定データの時刻歴（モデル８、ステップ３）

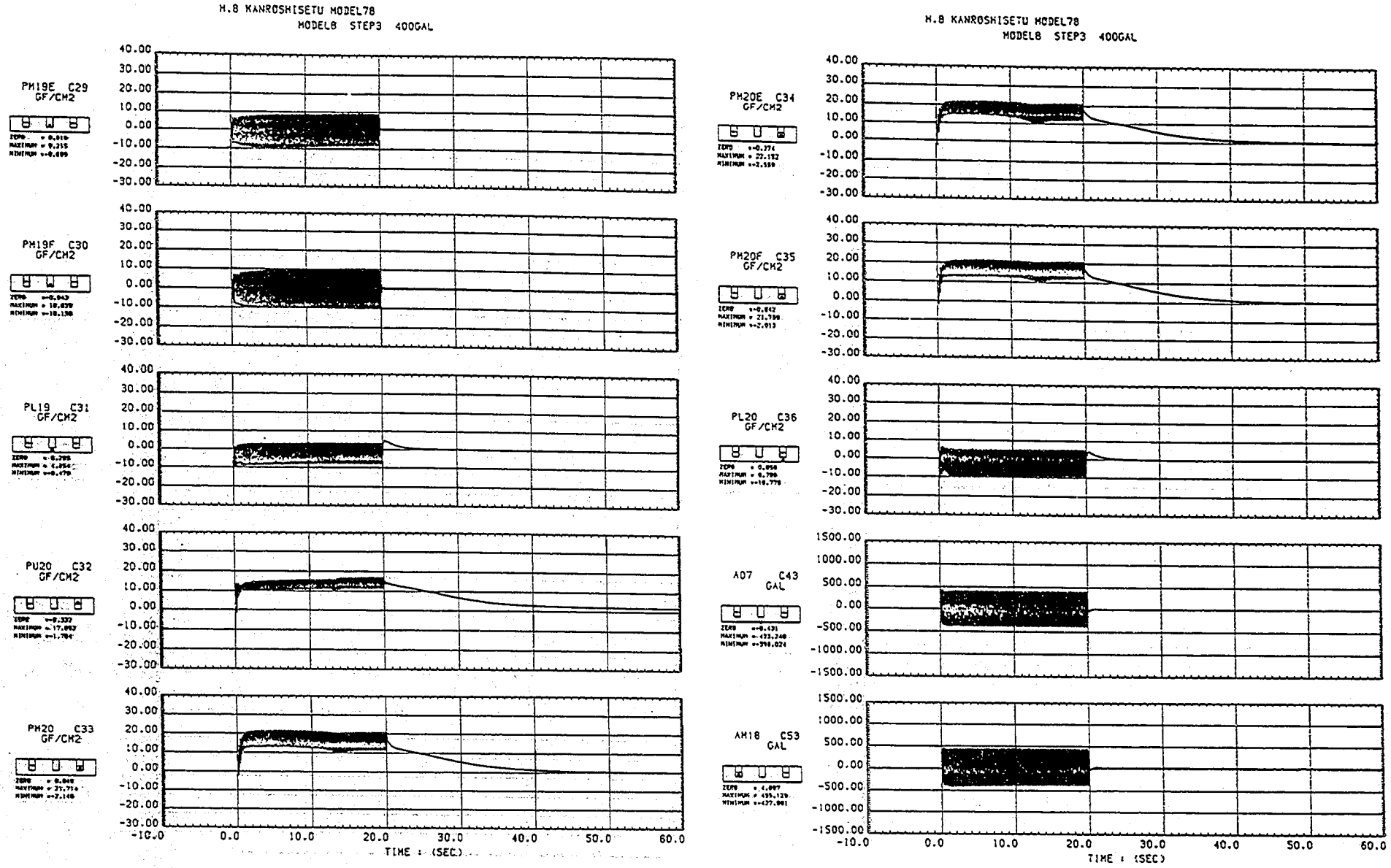


図5.4(4) 測定データの時刻歴（モデル8、ステップ3）

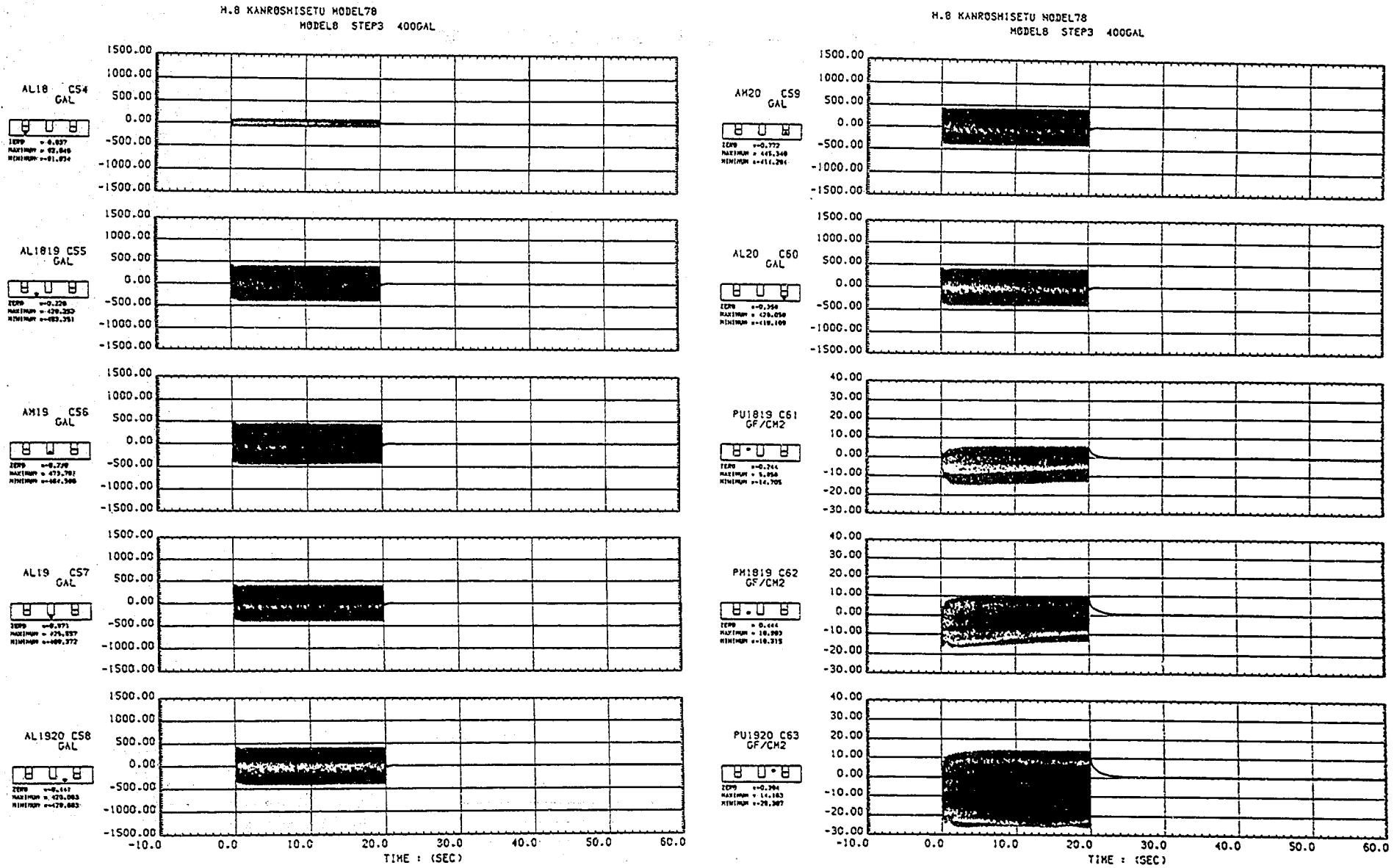


図５．４(4)　測定データの時刻歴（モデル８、ステップ３）

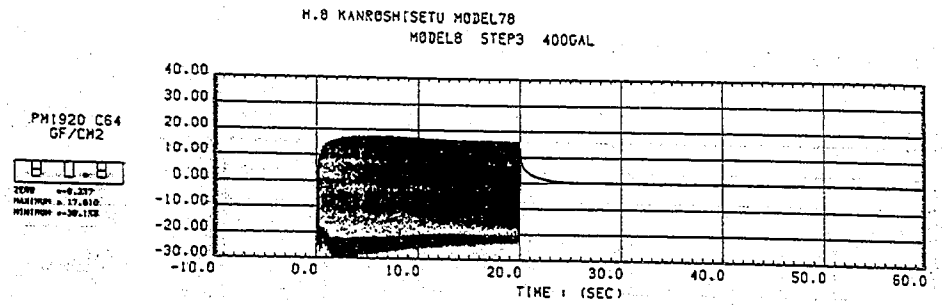


図5．4(4) 測定データの時刻歴（モデル8、ステップ3）

これらの時刻歴を見ると以下のようなことがいえる。

(1) 原地盤部の過剰間隙水圧は、原地盤の相対密度の低いモデル7においては、ほぼ有効上載圧まで上昇するが、原地盤の相対密度の高いモデル8においては有効上載圧まで上昇しない。

(2) 全面砕石で埋め戻したケース16, 19では埋戻し部の過剰間隙水圧（PU16, PM16, PM16F, PM16E, PU19, PM19, PM19F, PM19E）は初期有効上載圧まであがっておらず液状化していないことがわかる。また、これらのケースでは埋戻し部、埋戻し部下部の原地盤の過剰間隙水圧（PL16, PL19）の消散が早い。

(3) 砕石で埋め戻されている部分の過剰間隙水圧（PU15, PU16, PM16＊, PM17＊, PU18, PU19, PM19＊, PM20＊）の振幅は、硅砂で埋め戻されている部分（PM15, PM15F, PM15E, PU17, PM18, PM18F, PM18E, PU20）よりも大きくなっている。これは、砕石の粒径が大きいことによりダイレタンシー特性が大きいこと、あるいは砕石中の間隙水は砕石の粒径が大きいため間隙を移動しやすく、加振中の動水圧を測定している等の可能性が考えられる。

(4) 地盤の相対密度が小さく液状化しやすいモデル7では、加速度計を設置したすべての地点で応答加速度振幅は一旦増加した後に減少する。間隙水圧の挙動との関連で見ると、原地盤の過剰間隙水圧の上昇とともに応答加速度振幅は増加し、原地盤の過剰間隙水圧がほぼ有効上載圧に達すると応答加速度振幅は減少している。また、地盤の相対密度が大きく液状化しにくいモデル8では、埋戻し部の液状化の有無に関係なく応答加速度はモデル7で見られたような乱れはなく、ほぼ入力加速度と同じ波形となっている。これはあたかも液状化した土を埋戻し部という狭い容器に入れて強制的に水平加振している状態になっているものと考えることができる。これらのことから、埋戻し部の応答加速度の挙動は、その周辺の原地盤の挙動に追従していると見ることができる。

(5) 応答加速度の最大値は、原地盤が液状化するモデル7ではいずれの地点でも入力加速度の2倍近くまで上がるが、原地盤の相対密度の高いモデル8ではいずれの地点でもほぼ入力加速度と同じレベルとなっている。これはモデル7では液状化により応答が大きくなったことを表している。地盤が液状化するときに浮き上がりやすいのは、原地盤が浮き上がった管渠の下部に回り込むことに加え、応答加速度が増幅することによる効果も働いていることが考えられる。ただし、実験（その1）、実験（その2）では原地盤の液状化の有無による応答加速度の最大値の差異は明瞭ではなかった。

(6) 浮上がりの生じたケース17では加振ステップ1では加振初期に浮上がりが生じ、この時管渠模型に取り付けた間隙水圧は急激に上昇しており、その後過剰間隙水圧が定常状態になると浮上がりもほぼ停止し、逆に過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の圧密により沈下する傾向に向かう。また加振終了後の浮上がりは見られず逆に過剰間隙水圧の消散とともに地盤の沈下に伴い若干沈下する。

(7) 大規模な浮上がりの生じたケース17の加振ステップ3では加振初期に浮上がりが発生しその後浮上がり速度が急速に増加している。また、浮上がり速度が急増したとき、管渠模型に取り付けた過剰間隙水圧（PM17, PM17E）の値は、浮上がりに伴う静水圧分の減少により急激に減少している。

(8) 管渠模型が沈下したケース15, 16においては模型の沈下は加振中、加振後とも生じているが、沈下量は加振中の方が大きい（D15, D16）。

5．4．2　管渠模型の浮上がり量

管渠模型の各加振ステップ毎の浮上がり量を表5．6に、管渠模型の最終浮上がり量（加振毎）と加振加速度の関係を図5．5に示す。同図には、比較のために実験（その2）で行った、原地盤が液状化しやすく無対策であるケース9および原地盤が液状化しにくく無対策のケース12の結果を併せて示す。

表5．6　管渠の浮上がり量

項目		STEP No.	A07 (gal)	(CASE15) D-15 (mm)	(CASE16) D-16 (mm)	(CASE17) D-17 (mm)	(CASE18) D-18 (mm)	(CASE19) D-19 (mm)	(CASE20) D-20 (mm)
変位計鉄芯部	浮上がり量	1	215.4	-3.0	-5.0	2.0	-1.0	0.0	0.0
		2	311.6	-4.0	-3.0	1.0	0.0	1.0	0.0
		3	414.6	-5.0	-5.0	83.0	-2.0	-1.0	0.0
	累積浮上がり量	1	215.4	-3.0	-5.0	2.0	-1.0	0.0	0.0
		2	311.6	-7.0	-8.0	3.0	-1.0	1.0	0.0
		3	414.6	-12.0	-13.0	86.0	-3.0	0.0	0.0
ワイヤー部	浮上がり量	1	215.4	-3.0	-3.0	3.0	-1.0	0.0	-1.0
		2	311.6	-4.0	-4.0	1.0	0.0	0.0	0.0
		3	414.6	-5.0	-5.0	83.0	-1.0	-1.0	0.0
	累積浮上がり量	1	215.4	-3.0	-3.0	3.0	-1.0	0.0	-1.0
		2	311.6	-7.0	-7.0	4.0	-1.0	0.0	-1.0
		3	414.6	-12.0	-12.0	87.0	-2.0	-1.0	-1.0
解体時の累積浮上がり量		3	414.6	-16.0	-15.0	110.0	0.0	2.0	7.0

注1）＋：浮上がり量　　－：沈下

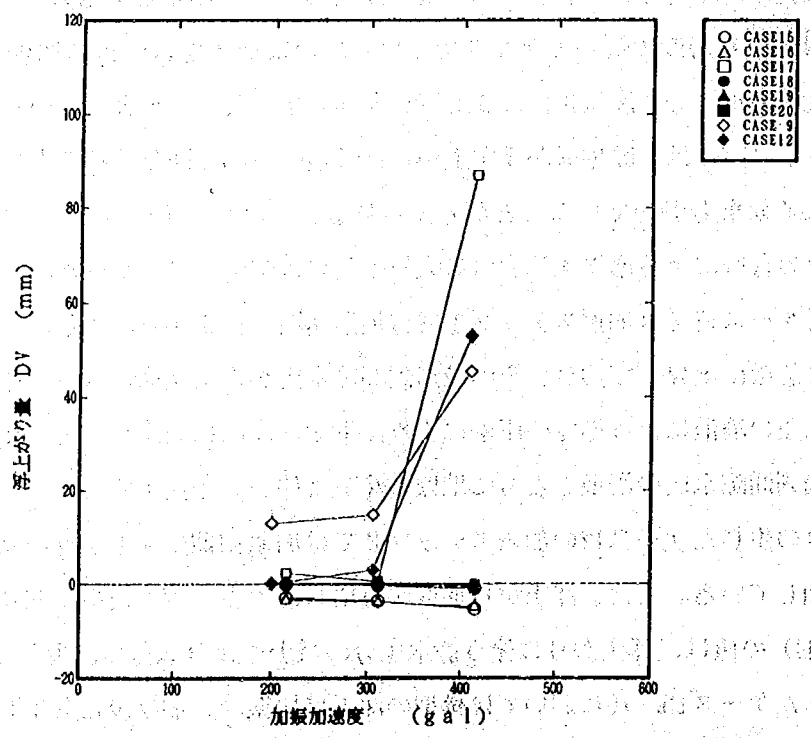


図5．5　最終浮上がり量（加振毎）と加振加速度の関係

加振ステップ1（正弦波200gal 20波）ではケース17においては浮き上がりが3㎜程度生じ、ケース15, 16においては地盤の圧密によると思われる若干の沈下が生じた（3㎜程度)。原地盤部が液状化しないケース18～20においてはほとんど変化が見られなかった。

加振ステップ2（正弦波300gal 20波）ではケース17において浮き上がりが1㎜程度生じ、ケース15, 16においては沈下が3～4㎜生じた。ケース18～20においてはほとんど変化が見られなかった。

加振ステップ3（正弦波400gal 100波）ではケース17において90㎜程度の大規模な浮き上がりが生じ、ケース15, 16においては沈下が5㎜程度生じた。ケース18～20ではほとんど変化は見られなかった（0～3㎜程度の沈下)。

最終浮き上がり量(加振ごと)は各加振ステップにおいてもケース17, 18, 19, 20, 15, 16の順で大きかった。

図5．6に最終浮上がり量（累積）と加振加速度の関係を示す。累積の最終浮上がり量においても、ケース17がもっとも大きかった。

以上より原地盤が液状化しないケース18～20においては浮上がり、および沈下はほとんど生じなかった。原地盤が液状化するケースでは上部砕石埋戻し（ケース15)、および全面砕石埋戻し（ケース16）に関しては地盤の圧密によると思われる若干の沈下が生じ、下部砕石埋戻し（ケース17）においては大規模な浮上がりが生じた。

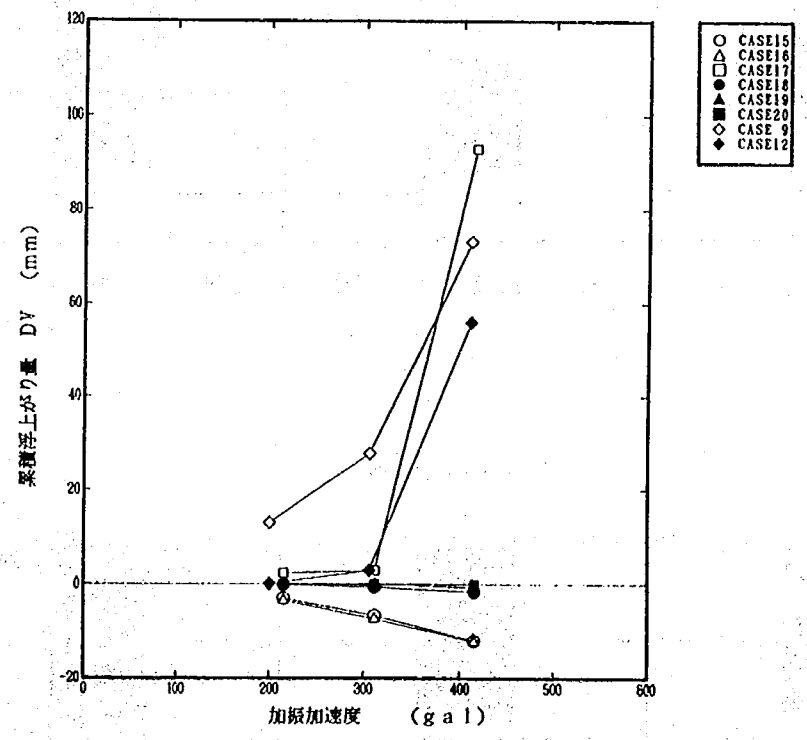


図5．6　最終浮上がり量（累積）と加振加速度の関係

5．4．3　模型地盤の変形状況

管渠模型周辺の変形状況のスケッチを図5．7(1)～(4)に示す。

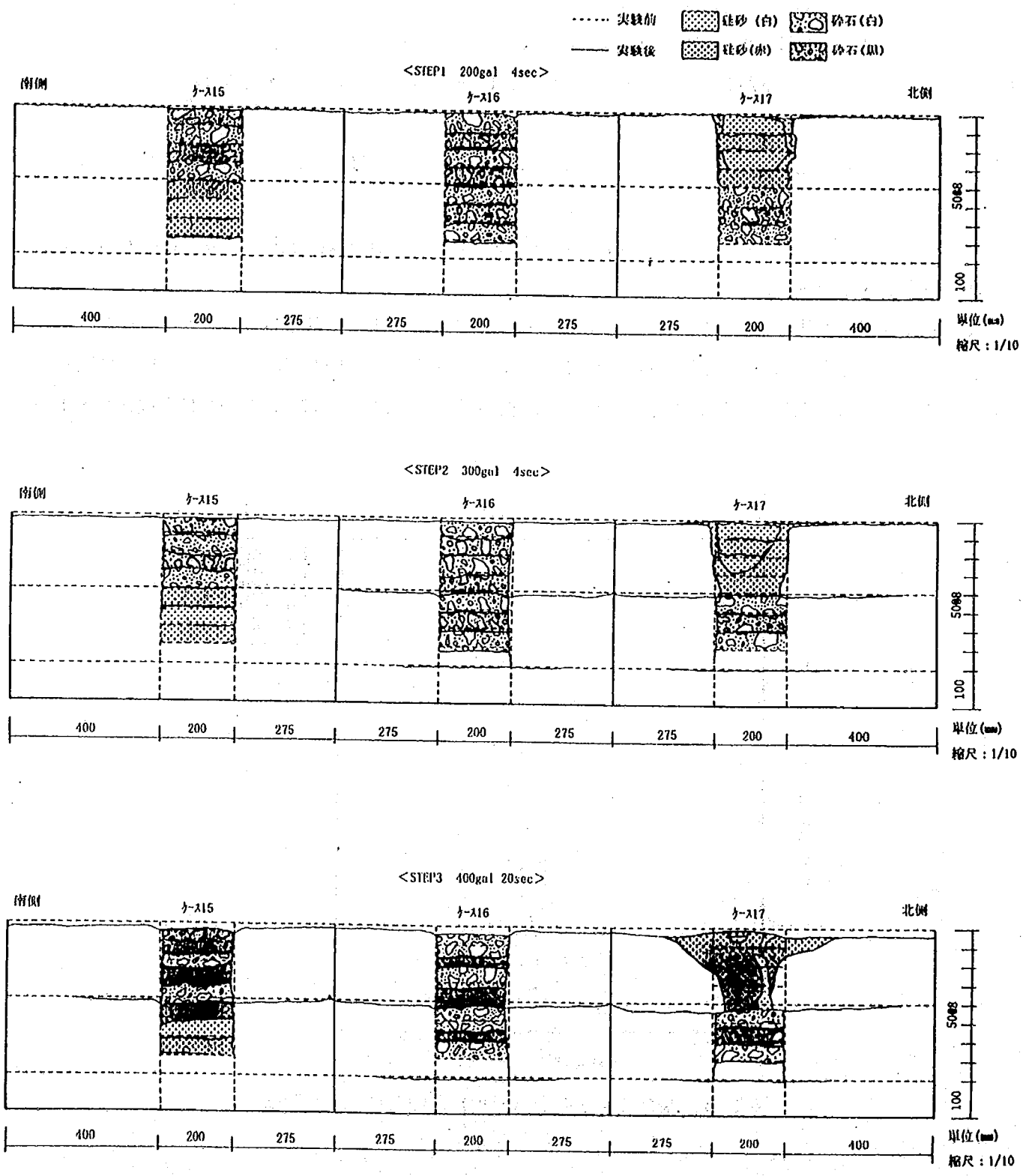


図5．7(1)　管渠模型周辺の変形状況（モデル7、側面図）

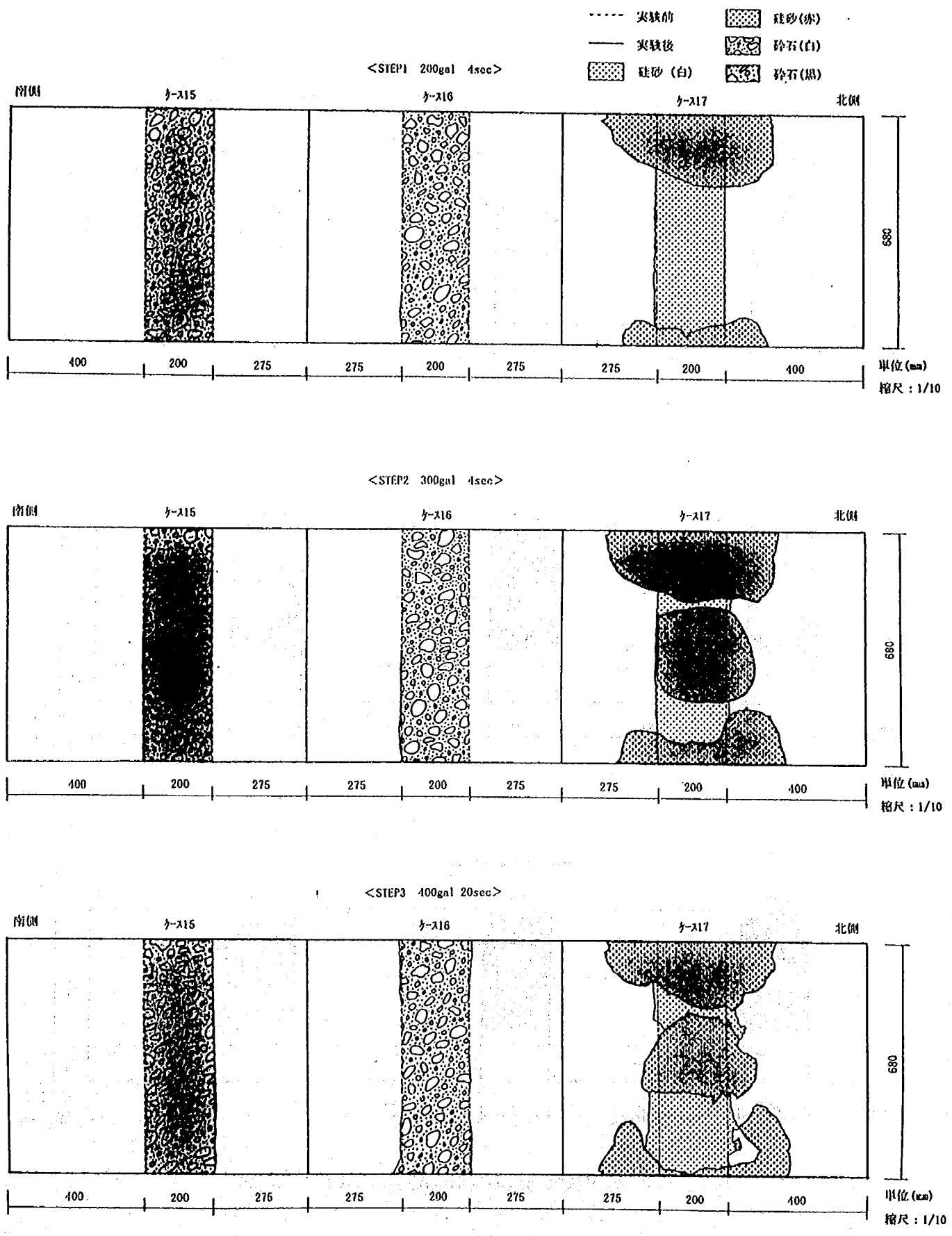


図５．７(2)　管渠模型周辺の変形状況（モデル７、平面図）

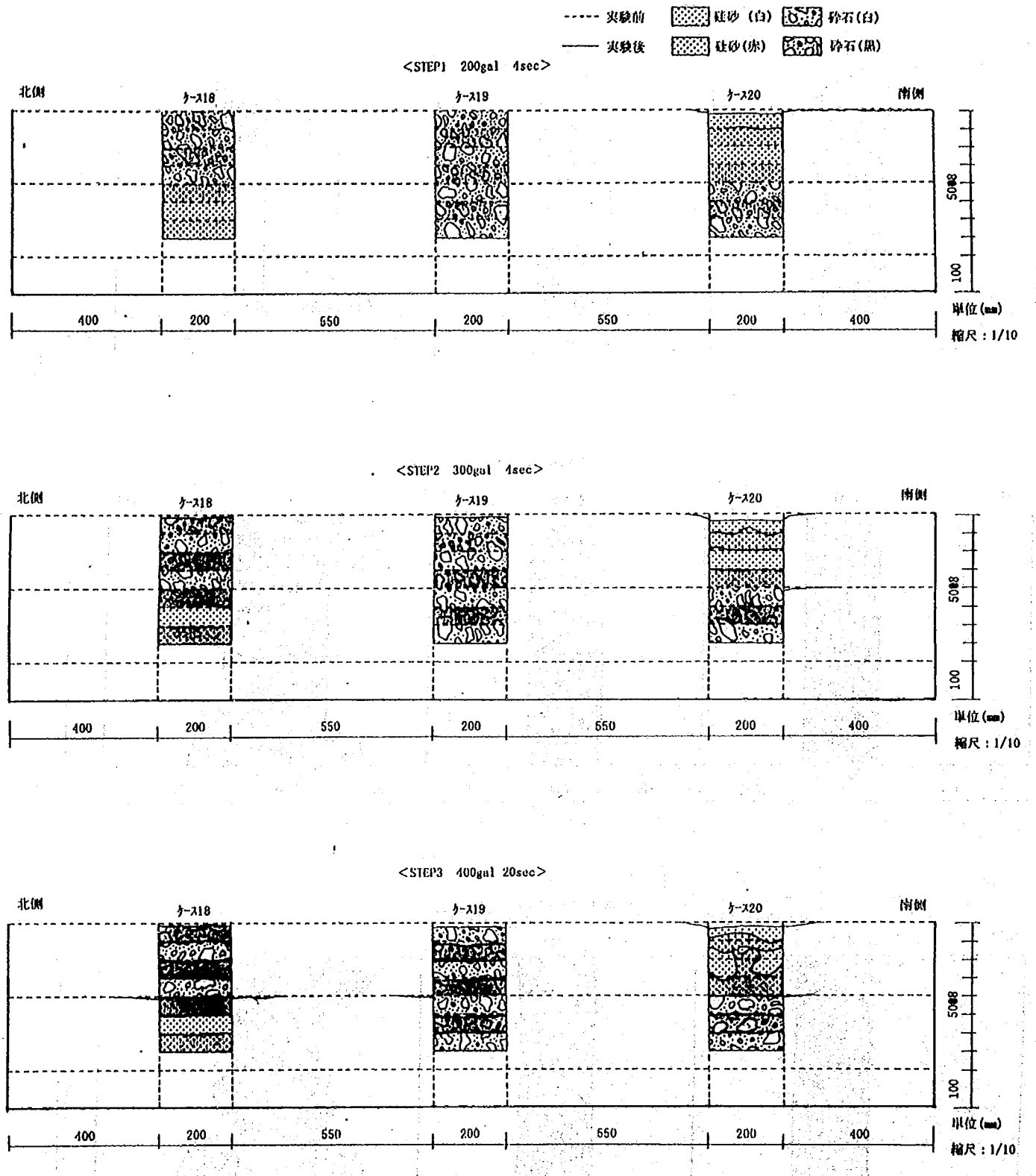


図５．７(3)　管渠模型周辺の変形状況（モデル８、側面図）

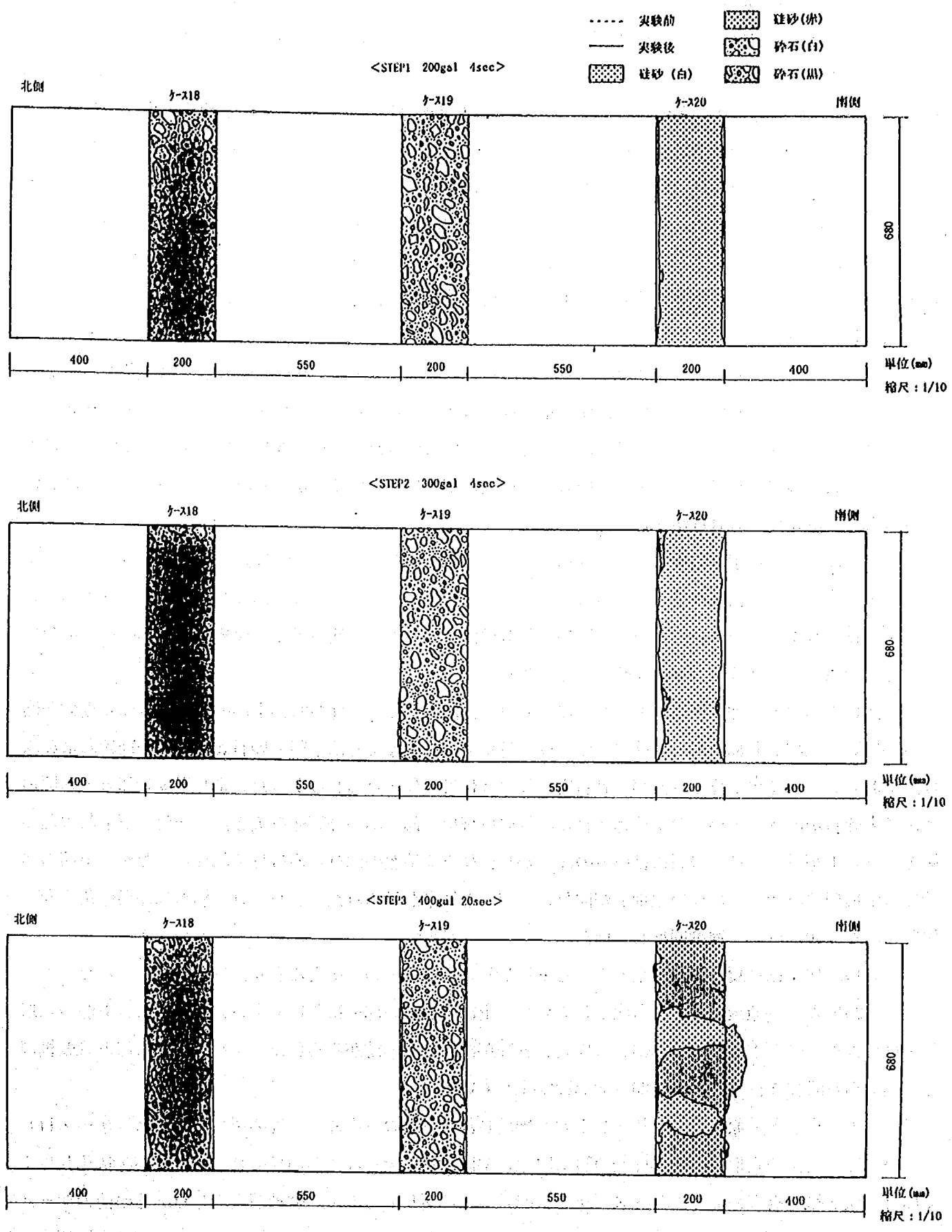


図５，７(4)　管渠模型周辺の変形状況（モデル８、平面図）

加振ステップ1（正弦波200gal 20波）終了時の地盤の変形状況は、浮上がりの生じたケース17において後ろの壁面より噴砂の痕跡が見られた。原地盤が液状化するケース15，16，17においては液状化により地盤が全体的に締まり地表面が若干沈下した。ケース20においても原地盤と埋戻し部境界のメンブレン沿いに噴砂の痕跡が若干見られたが、全体としてはケース18，19，20では見た目ではほとんど変化は生じなかった。

加振ステップ2（正弦波300gal 20波）終了時においては、ケース17において変位計のワイヤー沿い、壁面沿いに噴砂の痕跡が見られ、管渠模型の浮上がりに伴い埋戻し部上部の硅砂の部分に原地盤の豊浦砂が回り込んでいる様子が見られた。ケース15，16，17においては加振ステップ1と同様に地表面沈下が見られた。ケース20では加振ステップ1と同様にメンブレン沿いの噴砂が若干見られたのに加え、上部硅砂部は液状化によりメッシュを形成する色砂の境界が若干混ざった痕跡が見られた。ケース18，19においてはほとんど変化は見られなかった。

加振ステップ3（正弦波400gal 100波）終了時においては、ケース17においては大きな噴砂発生の痕跡が見られたことに加え、管渠の浮上がりに伴い地表面が大きく盛り上り、原地盤が埋戻し部上部の硅砂層へ大きく回り込んだ。ケース15，16ではほとんど変化は見られなかった。ケース20において中央の変位計のワイヤー沿いに噴砂の痕跡が見られ、上部の硅砂層が中央部で上昇しているのが見られた。ケース18，19においてはほとんど変化は見られなかった。

実験終了後の模型掘削時の変形状況の写真を写真5．1(1)～(6)に、スケッチを図5．8に示す。

ケース15，16は地表面は沈下し、原地盤との境界部は若干変形しており砕石部に原地盤の砂が混入している様子が見られた。ケース15においては硅砂の部分は沈下しており、沈下量は管渠真上と管渠のない部分で鉛直方向の相対的な変位差（5㎜程度）が見られた。

ケース17においては地表面は浮上がりに伴って盛り上がっており、埋戻し部上部の硅砂部分に原地盤が回り込んでいた。埋戻し部上部の硅砂層では噴砂の跡が見られ、埋戻し部下部の砕石層に上部の硅砂および原地盤が混入しているのが見られたが、砕石層自体の変形はさほど見られなかった。また埋戻し部直下の原地盤に多少砕石が混入しているのが確認された。管渠は埋戻し部下部の砕石層を突き抜け埋戻し部上部の硅砂層まで浮き上がり、下部の砕石には模型の浮上がりに伴う原地盤の回り込みは見られなかったが、上部の硅砂は管渠模型の浮上がりに伴い原地盤が回り込んでいる様子が見られた。また、管渠模型は加振直角方向に傾いており、30°～45°程度回転していた。

ケース18，19では埋戻し部は原地盤より若干沈下しているものの、ほとんど変形は見られなかった。

ケース20地表面は原地盤部よりも沈下しており、上部の硅砂の部分において上方に硅砂が吹きあがった形跡が見られた。砕石と硅砂の境界部分は砕石と硅砂が混ざった形跡がみられた。また、埋戻し部と管渠模型との間に相対的な変位差が目測で20～30㎜程度生じていた。

以上をまとめると、原地盤の液状化しやすく埋戻し部の下部のみを砕石で埋め戻したケース（ケース17）においては、地盤の変形は上部の硅砂の層に原地盤が回り込む大きな変形が見られ、原地盤が液状化しにくく埋戻し部下部のみ埋め戻したケース（ケース20）では埋戻し部で若干の噴砂が見られた。その他のケース（埋戻し部すべて砕石埋戻し、埋戻し部上部砕石埋戻し）においては地盤の変形は埋戻し部が若干沈下する程度であった。

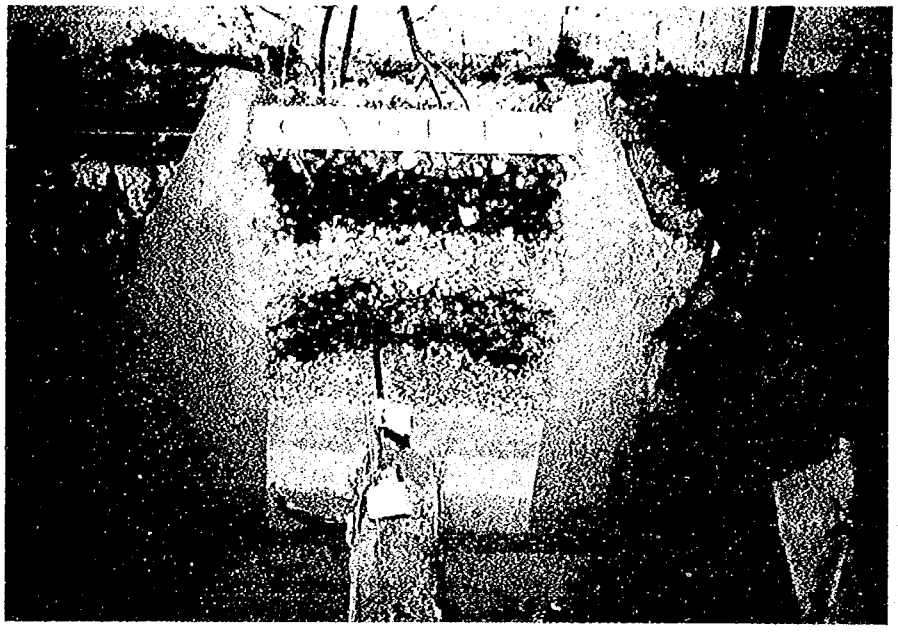


写真５．１(1)　模型解体時の状況（ケース15）

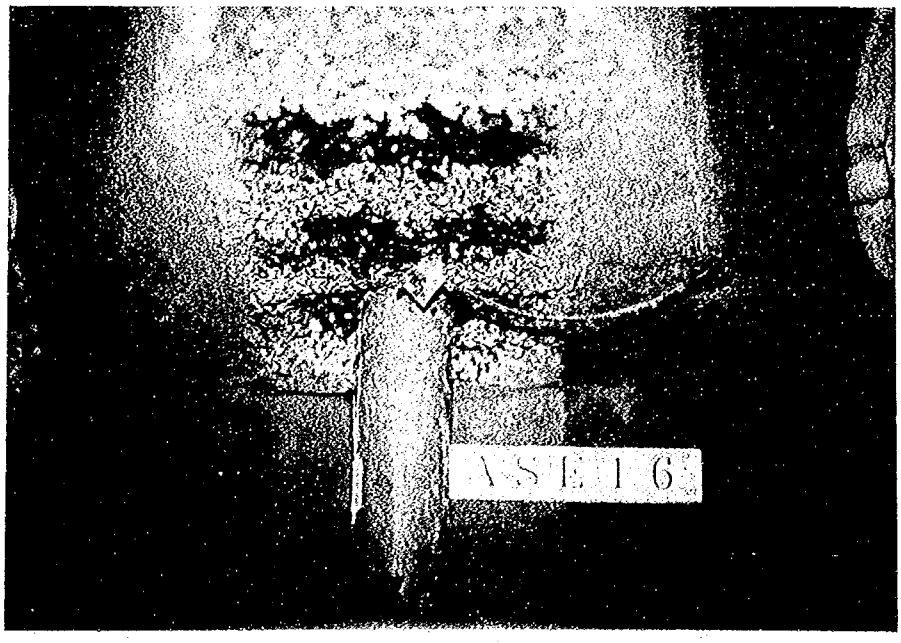


写真５．１(2)　模型解体時の状況（ケース16）

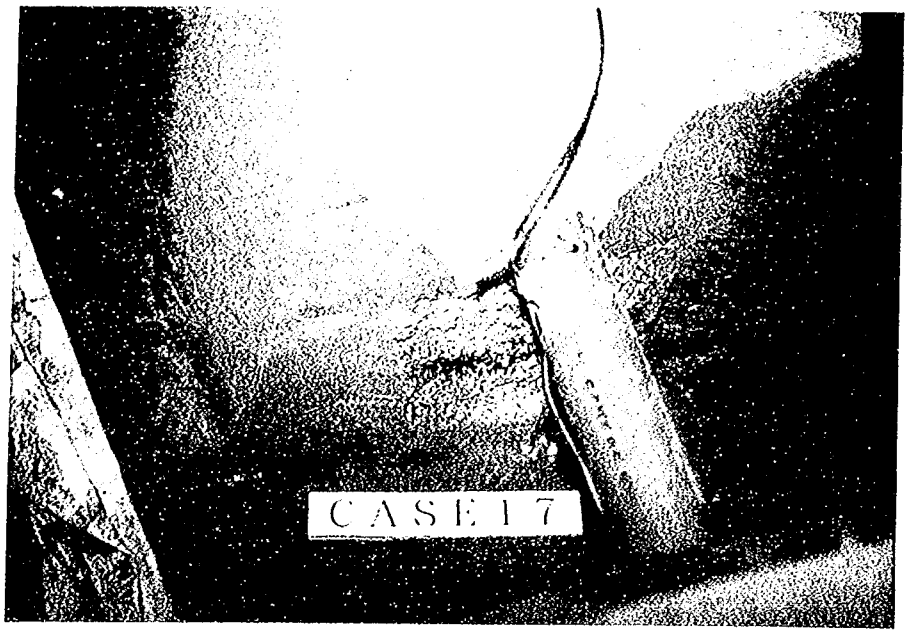


写真５．１(3)　模型解体時の状況（ケース17）

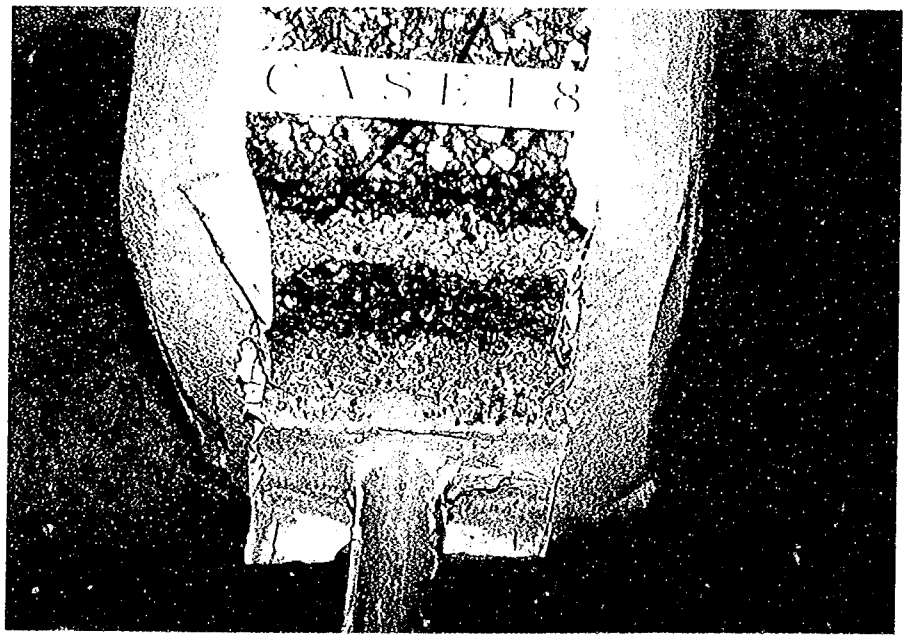


写真５．１(4)　模型解体時の状況（ケース18）

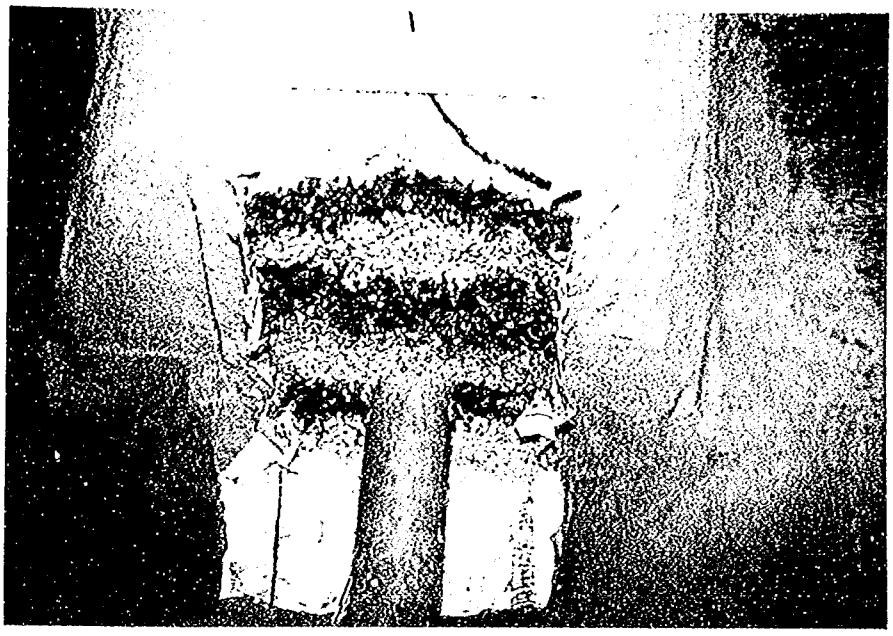


写真５．１(5)　模型解体時の状況（ケース19）

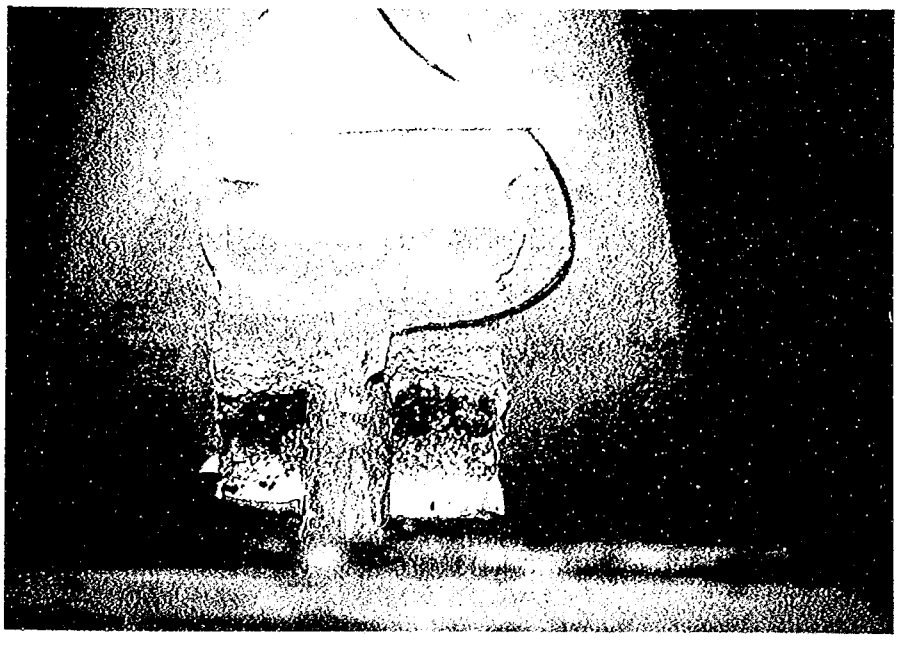


写真５．１(6)　模型解体時の状況（ケース20）

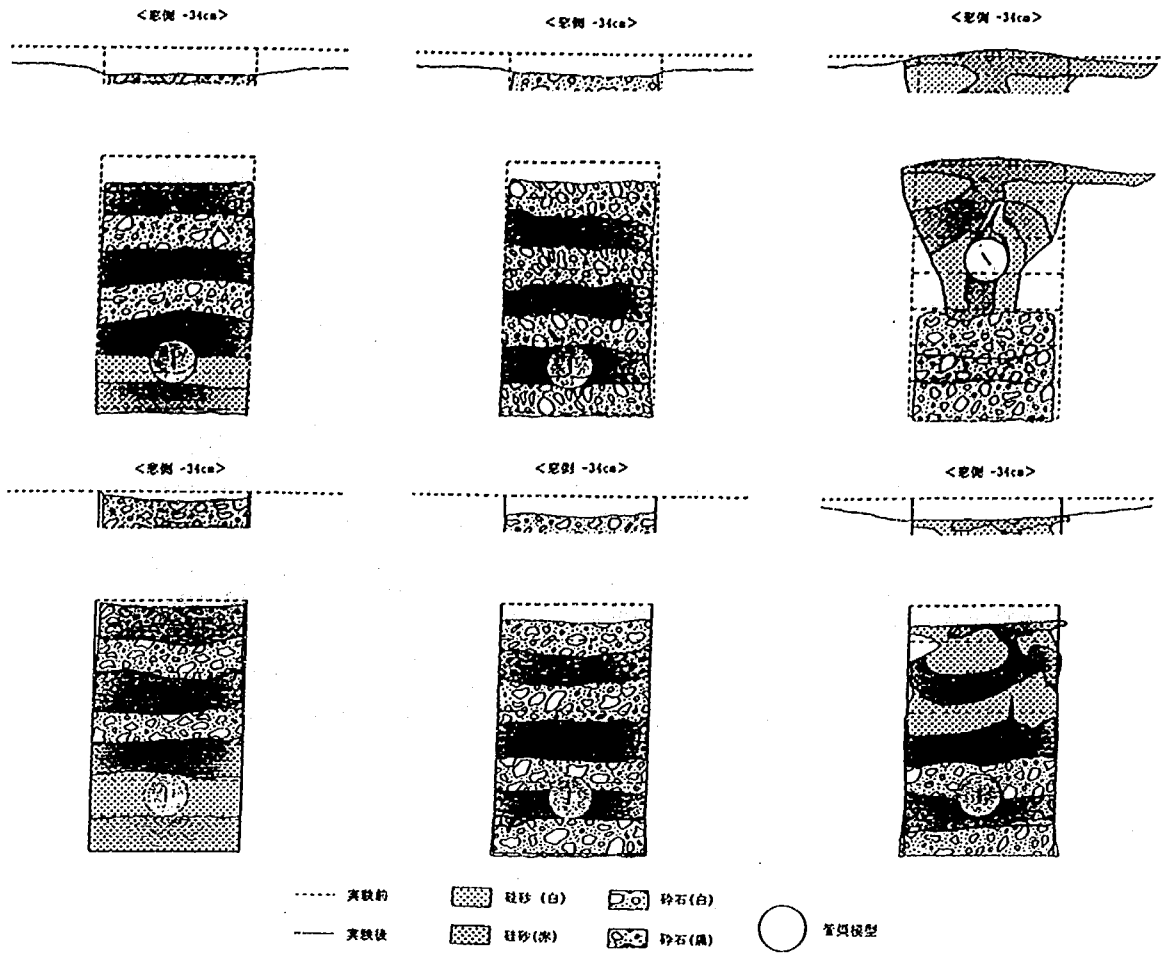


図５．８　模型解体時の管渠模型周辺の変形状況

５．４．４　地盤の過剰間隙水圧

間隙水圧計の埋設深度および有効上載圧を表５．７に示す。また、過剰間隙水圧の最大値と加振加速度の関係を図５．９(1)～(11)に示す。

(1)　原地盤部

図５．９(1)～(3)を見ると、原地盤部の最大過剰間隙水圧の地盤の相対密度による差（モデルによる差）ははっきり見られ、原地盤の相対密度が低いモデル７では過剰間隙水圧の最大値はほぼ初期有効上載圧に達しているが、原地盤の相対密度が高いモデル8では過剰間隙水圧の上昇はモデル７よりも小さい。しかし、これらの埋戻し部の違いによる差はほとんど見られない。過剰間隙水圧の最大値は埋戻し部上部および中央部では加振加速度を増加するほど大きくなる（図５．９(1)(2)）。また、図５．９(3)に示すように、管路模型下方の原地盤の最大過剰間隙水圧は、モデル７においては各ケースとも加振加速度を増加させるごとに小さくなっており、これはステップ加振により地盤が締まったことが原因と考えられる。

(2)　管渠模型直下

図５．９(5)に示すように、管渠模型直下の最大過剰間隙水圧はモデルごとに見ると、モデル７ではケース17，15，16の順で高く、モデル８ではケース20，18，19の順で高くなっており、砕石埋戻し部が下部、上部、全面の順で管渠模型直下の最大過剰間隙水圧は大きくなっている。また、埋戻し条件が同じケース

表5．7　間隙水圧計の埋設深度および有効上載圧

モデルNo.	センサーNo.	深度(cm) GL.-	原地盤	埋戻砂	埋戻砕石	管路	σ_v' (gf/cm²)
モデル7	PU15	15	-	-	15	-	13.5
	PM15	30	-	4	20	6	18.9
	PM15E	30	-	4	20	6	18.9
	PM15F	30	-	4	20	6	18.9
	PL15	45	10	9	20	6	32.5
	PU16	15	-	-	15	-	13.5
	PM16	30	-	-	24	6	19.2
	PM16E	30	-	-	24	6	19.2
	PM16F	30	-	-	24	6	19.2
	PL16	45	10	-	29	6	33.2
	PU17	15	-	15	-	-	12.2
	PM17	30	-	20	4	6	17.5
	PM17E	30	-	20	4	6	17.5
	PM17F	30	-	20	4	6	17.5
	PL17	45	10	20	9	6	31.5
	PU1516	15	15	-	-	-	14.2
	PM1516	30	30	-	-	-	28.3
	PU1615	15	15	-	-	-	14.2
	PM1615	30	30	-	-	-	28.3
	PU1617	15	15	-	-	-	14.2
	PM1617	30	30	-	-	-	28.3
モデル8	PU18	15	-	-	15	-	13.9
	PM18	30	-	4	20	6	19.5
	PM18E	30	-	4	20	6	19.5
	PM18F	30	-	4	20	6	19.5
	PL18	45	10	9	20	6	34.1
	PU19	15	-	-	15	-	13.7
	PM19	30	-	-	24	6	19.5
	PM19E	30	-	-	24	6	19.5
	PM19F	30	-	-	24	6	19.5
	PL19	45	10	-	29	6	34.3
	PU20	15	-	15	-	-	12.8
	PM20	30	-	20	4	6	18.4
	PM20E	30	-	20	4	6	18.4
	PM20F	30	-	20	4	6	18.4
	PL20	45	10	20	9	6	33.2
	PU1819	15	15	-	-	-	15.3
	PM1819	30	30	-	-	-	30.7
	PU1920	15	15	-	-	-	15.3
	PM1920	30	30	-	-	-	30.7

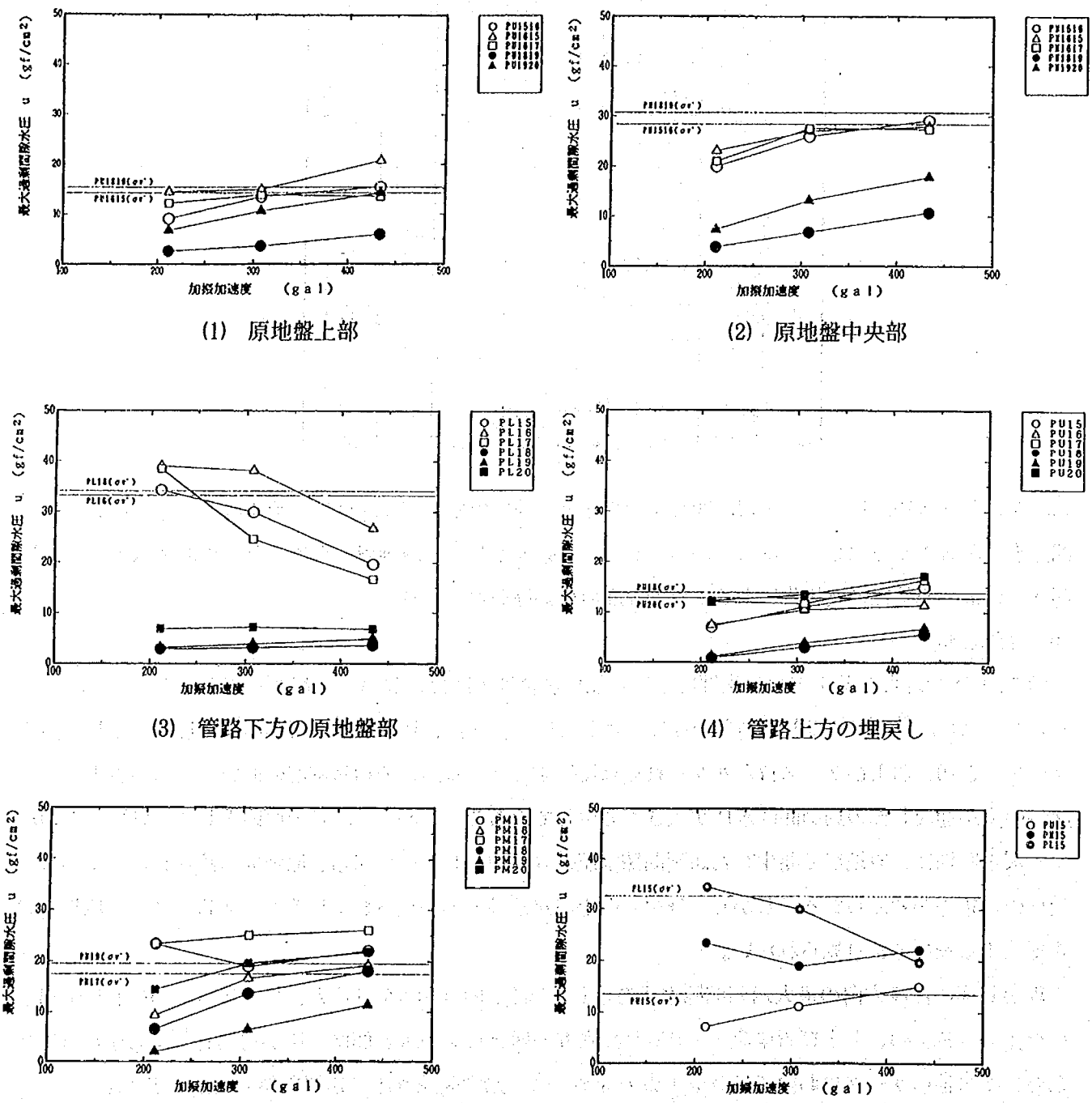
15，20、ケース16，19、ケース17，20を比較すると、地盤の相対密度の低いモデルの方が埋戻し部の過剰間隙水圧が大きく発生していることがわかる。この原因として、原地盤で発生した過剰間隙水圧が埋戻し部への伝播、原地盤の液状化による応答加速度の増幅等が考えられる。

(3)　埋戻し部

図5．9(4)の埋戻し部上部の過剰間隙水圧と加振加速度の関係を見ると、埋戻し部下部を硅砂で埋め戻したケース17，20ではほぼ初期有効上載圧に達している。また、埋戻し部上部が砕石で埋め戻されているケース15と19、およびケース17と20をそれぞれ比較すると、原地盤の相対密度の低いケース15およびケース17の方が埋戻し部の過剰間隙水圧が大きく発生していることがわかる。この原因として、管渠直下の埋戻し部と同様に、原地盤で発生した過剰間隙水圧の砕石埋戻し部への伝播、原地盤の液状化による応答加速度の増幅等が考えられる。しかし、埋戻し部上部が硅砂で埋め戻されているケース17，20では原地盤の密度による差はあまり見られない。

埋戻し部の深度方向の最大過剰間隙水圧を示した図5．9(6)～(11)を見ると、ケース17，20においては、管渠上方（PL＊）、および管渠直下（PM＊）両方の埋戻し部の過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達しており、その他のケースにおいては管渠上方の埋戻し部の過剰間隙水圧は初期有効上載圧にまで達していないことがわかる。ケース17では大規模な浮上がりが生じ、ケース20は計測値では浮上がりは生じていないが、模型解体時の観察から5㎜程度浮上がりが生じているため、ケース20に浮上がりは生じたと考えると、

浮上がりの生じたケースでは埋戻し部上部および管渠模型直下の過剰間隙水圧が有効上載圧に達していると言える。このことから、浮上がりが生じるためには管渠直下および管渠上方の両方とも液状化する必要があると考えられ、管渠模型直下が液状化したにもかかわらず、浮上がりの生じなかったケース15，16，18では、管渠上方の埋戻し部に液状化が生じなかったため、この部分が抵抗となることにより浮上がりが生じなかったと考えられる。



(1) 原地盤上部

(2) 原地盤中央部

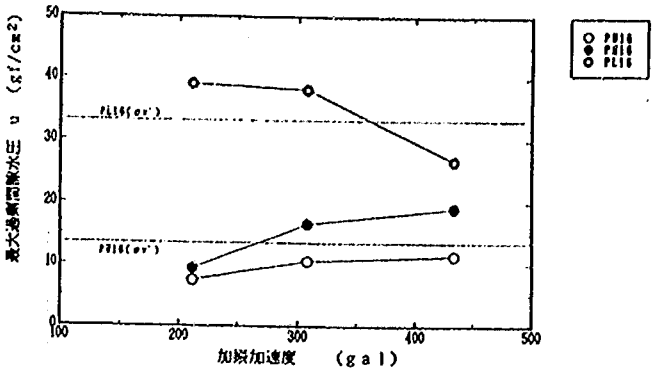
(3) 管路下方の原地盤部

(4) 管路上方の埋戻し

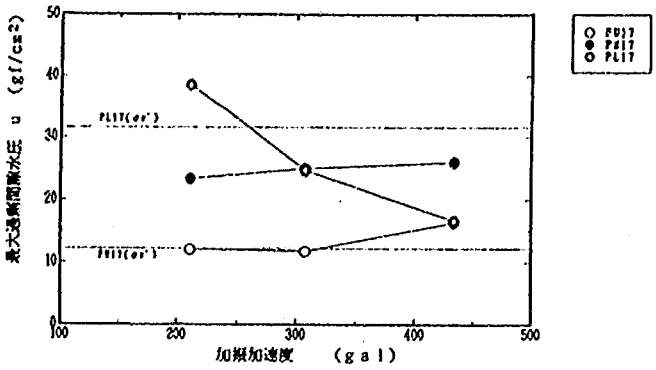
(5) 管路下端部

(6) 深度方向の比較、ケース15

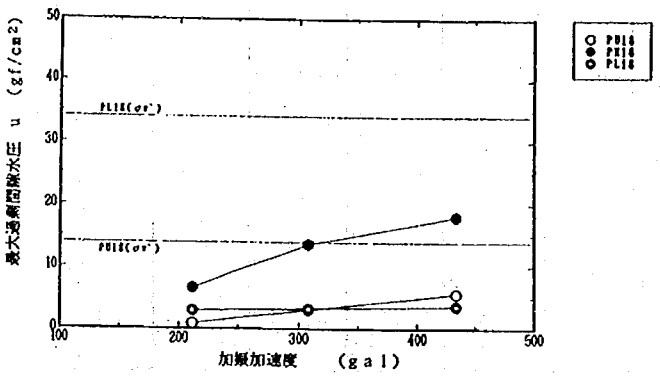
図5．9 過剰間隙水圧最大値と加振加速度の関係



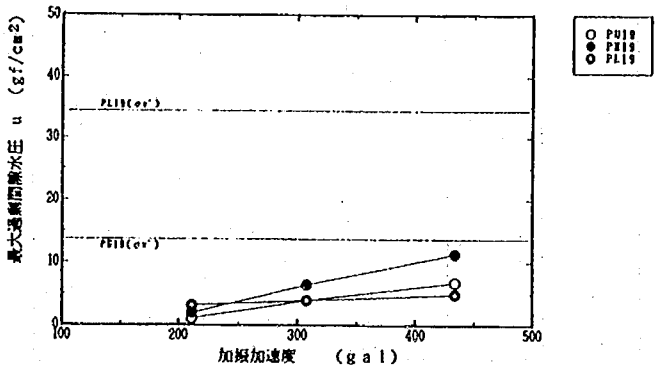
(7) 深度方向の比較、ケース16



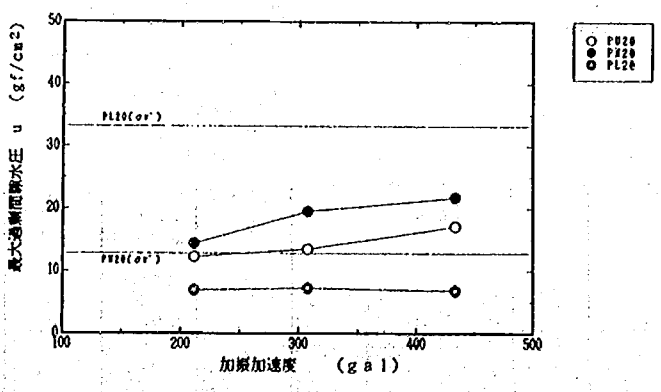
(8) 深度方向の比較、ケース17



(9) 深度方向の比較、ケース18



(10) 深度方向の比較、ケース19



(11) 深度方向の比較、ケース20

図5．9 過剰間隙水圧最大値と加振加速度の関係

5．4．5　浮上がり安全率

(1)　計算方法

管渠模型の浮上がり安定性を評価する指標として浮上がり安全率Fuを式3．1～3．16により求めた。浮上がり安全率Fuの計算結果を表5．8に、最終浮上がり量と最小浮上がり安全率を表5．9示す。

表5．8(1)　浮上がり安全率の計算表（ケース15、ステップ1）

<初期状態>　(ｹｰｽ15-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.90 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3　γsat硅 = 1.818 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3　γ'硅砂 = 0.818 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.87 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.17 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.818 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM15 (gf/cm2)	PM15F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL15) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0	16670	10532	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5080	0	1.679
1.0	-0.298	16689	10543	21.428	19.397	20.413	20.383	7180	17.744	-792	5071	0	0.999
2.0	-0.551	16706	10552	21.586	19.020	20.303	20.248	7133	32.580	4596	5064	0	1.002
3.0	-0.967	16733	10567	22.191	18.895	20.543	20.446	7203	34.161	5095	5051	44	0.996
4.0	-1.422	16763	10583	22.348	19.041	20.695	20.552	7240	33.917	4970	5038	0	0.998
5.0	-1.851	16791	10599	19.509	16.027	17.768	17.583	6194	30.269	4702	5025	0	1.060
10.0	-2.723	16848	10630	13.330	5.225	9.278	9.005	3173	21.149	4441	5000	0	1.294
20.0	-2.912	16860	10637	10.043	-2.604	3.720	3.428	1208	7.043	1328	4994	0	1.509
30.0	-2.950	16863	10638	9.754	-3.253	3.251	2.956	1041	6.557	1319	4993	0	1.531
40.0	-2.938	16862	10638	9.622	-3.442	3.090	2.796	985	6.435	1331	4993	0	1.538
50.0	-2.938	16862	10638	9.570	-3.463	3.054	2.760	972	6.314	1301	4993	0	1.540
60.0	-2.963	16864	10639	9.517	-3.504	3.007	2.710	955	6.192	1274	4993	0	1.542

表5．8(2)　浮上がり安全率の計算表（ケース15、ステップ2）

<初期状態>　(ｹｰｽ15-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 24.20 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3　γsat硅 = 1.818 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3　γ'硅砂 = 0.818 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.57 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.17 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.818 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM15 (gf/cm2)	PM15F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL15) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0	16864	10639	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	4993	0	1.681
1.0	-0.714	16910	10665	18.432	24.245	21.339	21.267	7493	17.857	-1065	4972	0	0.987
2.0	-1.168	16940	10681	18.511	24.056	21.284	21.167	7458	20.778	22	4958	0	0.990
3.0	-1.711	16976	10700	17.006	24.517	20.762	20.590	7255	22.239	751	4942	0	1.002
4.0	-2.103	17001	10715	17.323	24.874	21.099	20.888	7361	23.457	1084	4931	0	0.997
5.0	-2.507	17028	10729	14.340	24.140	19.240	18.989	6692	25.770	2586	4919	0	1.036
10.0	-3.327	17081	10759	5.812	9.548	7.680	7.347	2589	19.805	4541	4895	0	1.356
20.0	-3.63	17101	10770	-1.026	-2.256	-1.641	-2.004	-706	11.769	4943	4886	0	1.801
30.0	-3.643	17102	10770	-1.105	-2.780	-1.943	-2.307	-813	11.039	4787	4885	0	1.820
40.0	-3.656	17103	10771	-1.264	-2.843	-2.054	-2.419	-853	10.795	4739	4885	0	1.827
50.0	-3.656	17103	10771	-1.237	-2.843	-2.040	-2.406	-848	10.430	4603	4885	0	1.826
60.0	-3.668	17104	10771	-1.290	-2.843	-2.067	-2.433	-858	10.430	4612	4885	0	1.828

表5．8(3)　浮上がり安全率の計算表（ケース15、ステップ3）

<初期状態>　　(ケース15-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 24.56 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3　γsat砂 = 1.818 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3　γ'砂 = 0.818 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.21 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.17 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.818 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM15 (gf/cm2)	PM15F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL15) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0	17104	10771	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	4993	0	1.682
1.0	0.501	17071	10753	17.576	24.669	21.123	21.173	7461	14.947	-2080	5007	0	0.993
2.0	-0.109	17111	10775	17.089	23.783	20.436	20.425	7198	16.561	-1236	4989	0	1.009
3.0	-0.22	17118	10779	16.17	24.669	20.420	20.398	7189	17.057	-1048	4986	0	1.009
4.0	-0.675	17148	10795	16.386	25.605	20.996	20.928	7376	17.057	-1235	4973	0	1.000
5.0	-0.991	17169	10807	16.007	25.753	20.880	20.781	7324	17.057	-1184	4963	0	1.003
10.0	-2.521	17269	10862	17.252	24.768	21.010	20.758	7317	15.94	-1578	4918	0	1.006
20.0	-4.507	17399	10933	14.384	21.814	18.099	17.648	6222	13.334	-1421	4860	0	1.074
30.0	-5.341	17453	10963	-0.277	14.41	7.067	6.532	2303	5.764	-228	4835	0	1.392
40.0	-5.354	17454	10964	-0.602	11.671	5.535	4.999	1762	4.523	-134	4835	0	1.452
50.0	-5.354	17454	10964	-0.764	11.671	5.454	4.918	1734	4.275	-195	4835	0	1.455
60.0	-5.367	17455	10964	-0.764	11.573	5.405	4.868	1716	3.654	-401	4835	0	1.457

表5．8(4)　浮上がり安全率の計算表（ケース16、ステップ1）

<初期状態>　　(CASE16-STEP1-200GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.42 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.34 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.04 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.902 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM16 (gf/cm2)	PM16F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL16) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0	16477	10359	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5355	0	1.689
1.0	-0.298	16497	10370	4.077	5.620	4.849	4.819	1697	33.465	10351	5345	5005	1.026
2.0	-0.551	16515	10379	3.684	4.767	4.226	4.170	1469	39.041	12586	5337	7249	0.918
3.0	-0.967	16543	10394	3.123	3.776	3.450	3.353	1181	38.685	12746	5324	7422	0.924
4.0	-1.422	16574	10411	3.067	3.523	3.295	3.153	1110	37.854	12517	5309	7208	0.939
5.0	-1.851	16604	10426	1.944	1.495	1.720	1.534	540	27.772	9458	5295	4163	1.165
10.0	-2.725	16664	10458	1.888	0.942	1.415	1.143	402	2.149	371	5267	0	1.628
20.0	-2.912	16676	10464	1.804	0.804	1.304	1.013	357	0.370	-224	5260	0	1.635
30.0	-2.95	16679	10466	1.776	0.804	1.290	0.995	350	0.607	-132	5259	0	1.636
40.0	-2.938	16678	10465	1.776	0.804	1.290	0.996	351	0.489	-175	5260	0	1.636
50.0	-2.938	16678	10465	1.776	0.768	1.267	0.973	343	0.370	-210	5260	0	1.637
60.0	-3.373	16708	10481	1.720	0.712	1.216	0.879	309	0.370	-176	5246	0	1.643

表5．8(5) 浮上がり安全率の計算表（ケース16、ステップ2）

<初期状態>　(CASE16-STEP2-300GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.76 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.00 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.04 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.902 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM16 (gf/cm2)	PM16F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL16) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16708	10481	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5246	0	1.691
1.0	-0.911	16770	10514	6.071	9.712	7.892	7.800	2748	36.344	10336	5216	5120	0.968
2.0	-1.962	16842	10551	7.550	9.943	8.747	8.550	3012	36.819	10243	5182	5061	0.959
3.0	-2.704	16893	10578	12.351	10.151	11.251	10.981	3868	35.157	8788	5158	3631	0.991
4.0	-3.297	16934	10600	10.481	10.521	10.501	10.171	3583	33.732	8560	5138	3422	1.020
5.0	-3.767	16966	10616	5.596	2.410	4.003	3.626	1278	20.911	6250	5123	1127	1.381
10.0	-3.853	16972	10620	4.954	1.578	3.266	2.881	1015	2.747	-26	5120	0	1.546
20.0	-3.890	16974	10621	4.507	1.440	2.974	2.585	911	0.491	-734	5119	0	1.560
30.0	-3.915	16976	10622	4.284	1.371	2.828	2.436	858	0.373	-724	5118	0	1.567
40.0	-3.915	16976	10622	4.117	1.324	2.721	2.329	821	0.254	-729	5118	0	1.573
50.0	-3.915	16976	10622	3.977	1.324	2.651	2.259	796	0.373	-662	5118	0	1.576
60.0	-3.915	16976	10622	3.810	1.255	2.533	2.141	754	0.254	-663	5118	0	1.582

表5．8(6) 浮上がり安全率の計算表（ケース16、ステップ3）

<初期状態>　(CASE16-STEP3-400GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.37 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.902 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.902 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.95 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.04 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.902 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM16 (gf/cm2)	PM16F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL16) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16440	10340	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5228	0	1.688
1.0	-0.272	16458	10350	9.792	13.505	11.649	11.621	4092	24.610	4768	5219	0	1.210
2.0	-0.891	16501	10372	9.063	13.797	11.430	11.341	3993	25.645	5239	5199	40	1.216
3.0	-1.362	16533	10389	9.231	13.855	11.543	11.407	4017	24.266	4719	5184	0	1.218
4.0	-1.795	16563	10405	9.343	14.438	11.891	11.711	4124	22.886	4115	5170	0	1.210
5.0	-2.154	16587	10417	9.680	14.905	12.293	12.077	4253	21.852	3614	5158	0	1.200
10.0	-3.528	16681	10467	11.195	16.946	14.071	13.718	4831	18.059	1670	5113	0	1.157
20.0	-4.679	16760	10508	11.139	16.771	13.955	13.487	4751	10.123	-1106	5076	0	1.165
30.0	-4.877	16774	10515	-3.335	2.659	-0.338	-0.826	-291	1.508	834	5070	0	1.740
40.0	-4.890	16775	10516	-3.335	2.600	-0.368	-0.857	-302	1.048	679	5069	0	1.742
50.0	-4.890	16775	10516	-3.391	2.484	-0.454	-0.943	-332	1.163	751	5069	0	1.747
60.0	-4.890	16775	10516	-3.448	2.542	-0.453	-0.942	-332	0.933	668	5069	0	1.747

表5．8(7) 浮上がり安全率の計算表（ケース17、ステップ1）

<初期状態>　　(ケース17-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.34 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat硅 = 1.815 gf/cm3　γsat砕 = 1.903 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'硅砂 = 0.815 gf/cm3　γ'砕石 = 0.903 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.34 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.07 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.903 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM17 (gf/cm2)	PM17F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL17) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0	15805	10331	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0	0	5367	0	1.628
1.0	1.726	15687	10268	16.899	16.760	16.830	17.002	5986	21.213	1651	5424	0	1.028
2.0	3.223	15584	10215	15.799	17.100	16.450	16.772	5904	32.716	5874	5472	402	1.005
3.0	3.125	15591	10218	15.222	16.647	15.935	16.247	5719	33.321	6276	5469	807	0.992
4.0	2.940	15604	10225	15.524	16.732	16.128	16.422	5781	32.837	6040	5463	577	1.002
5.0	2.499	15634	10241	14.754	16.590	15.672	15.922	5605	29.326	4952	5449	0	1.051
10.0	2.474	15636	10242	8.182	10.552	9.367	9.614	3385	18.186	3162	5448	0	1.222
20.0	2.425	15639	10243	1.802	4.401	3.102	3.344	1177	13.464	3670	5446	0	1.459
30.0	2.413	15640	10244	0.098	2.729	1.414	1.655	583	12.011	3741	5446	0	1.539
40.0	2.425	15639	10243	-0.260	2.474	1.107	1.350	475	11.526	3674	5446	0	1.554
50.0	2.425	15639	10243	-0.370	2.332	0.981	1.224	431	11.284	3632	5446	0	1.561
60.0	2.401	15641	10244	-0.452	2.247	0.898	1.138	400	11.284	3662	5445	0	1.565

表5．8(8) 浮上がり安全率の計算表（ケース17、ステップ2）

<初期状態>　　(ケース17-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.10 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat硅 = 1.815 gf/cm3　γsat砕 = 1.903 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'硅砂 = 0.815 gf/cm3　γ'砕石 = 0.903 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.58 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.07 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.903 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM17 (gf/cm2)	PM17F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL17) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	15641	10244	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5445	0	1.626
1.0	0.727	15591	10218	19.465	17.802	18.634	18.706	6585	18.952	238	5469	0	0.988
2.0	1.096	15566	10205	18.722	16.922	17.822	17.932	6312	21.862	1558	5481	0	1.004
3.0	1.256	15555	10199	18.805	17.121	17.963	18.089	6367	23.074	1939	5486	0	1.000
4.0	1.121	15564	10204	18.832	17.433	18.133	18.245	6422	23.196	1928	5482	0	0.997
5.0	0.629	15598	10222	14.926	14.140	14.533	14.596	5138	23.680	3387	5466	0	1.082
10.0	0.678	15594	10220	10.166	9.966	10.066	10.134	3567	14.103	1510	5467	0	1.205
20.0	0.580	15601	10223	1.830	3.806	2.818	2.876	1012	8.284	1970	5464	0	1.479
30.0	0.543	15603	10225	-0.040	1.080	0.520	0.574	202	6.950	2300	5463	0	1.594
40.0	0.519	15605	10226	-0.371	0.796	0.213	0.264	93	6.687	2278	5462	0	1.611
50.0	0.519	15605	10226	-0.453	0.711	0.129	0.181	64	6.344	2220	5462	0	1.616
60.0	0.519	15605	10226	-0.481	0.626	0.073	0.124	44	6.344	2240	5462	0	1.619

表5．8(9)　浮上がり安全率の計算表（ケース17、ステップ3）

<初期状態>　　(ケース17-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.05 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砂 = 1.815 gf/cm3　γsat砕 = 1.903 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砂 = 0.815 gf/cm3　γ'砕石 = 0.903 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 5.63 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.07 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.903 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.944 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB				過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL17)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (g)	Us (g)	PM17 (gf/cm2)	PM17F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	Ud (g)	Uds (gf/cm2)	S (g)	T (g)	F (g)	Fu
初　期	0.000	15605	10226	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5445	0	1.626
1.0	-0.298	15626	10236	24.371	23.424	23.898	23.868	8402	14.674	-3119	5436	0	0.893
2.0	0.376	15579	10212	25.486	25.125	25.306	25.343	8921	16.253	-3070	5458	0	0.867
3.0	1.234	15521	10181	25.932	25.182	25.557	25.680	9039	16.617	-3057	5486	0	0.860
4.0	1.970	15470	10155	25.152	24.728	24.940	25.137	8847	16.496	-2909	5509	0	0.868
5.0	2.889	15407	10122	24.650	24.501	24.576	24.864	8751	16.253	-2900	5539	0	0.870
7.0	5.000	15263	10046	23.100	23.000	23.050	23.550	8287	15.200	-2815	5608	0	0.888
10.0	9.659	14943	9878	21.359	20.872	21.116	22.081	7767	15.038	-2353	5759	0	0.905
12.0	15.200	14564	9678	19.000	17.700	18.350	19.870	6986	14.609	-1730	5940	0	0.935
15.0	46.200	12440	8562	12.300	6.240	9.270	16.920	5931	13.700	-999	6947	0	0.929
16.0	56.400	11741	8195	10.100	4.430	7.265	15.740	5511	13.500	-651	7279	0	0.931
20.0 *	58.586	11591	8116	4.684	1.422	3.053	10.543	3690	13.095	1024	7350	0	1.068
30.0 *	58.617	11589	8115	-4.797	-3.681	-4.239	1.065	373	6.536	1980	7351	0	1.485
40.0 *	58.586	11591	8116	-9.816	-8.615	-9.216	-3.957	-1385	3.257	2558	7350	0	1.873
50.0 *	58.586	11591	8116	-10.430	-9.919	-10.175	-4.571	-1600	2.771	2598	7350	0	1.935
60.0 *1	90.000	9439	6986	-10.541	-9.862	-10.202	-1.541	-537	2.649	1491	8371	0	1.622

*　：変位計オーバー
*1：スケール読み値

表5．8(10)　浮上がり安全率の計算表（ケース18、ステップ1）

<初期状態>　　(ケース18-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.54 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.926 gf/cm3　γsat砂 = 1.858 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.926 gf/cm3　γ'砂 = 0.858 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.72 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.52 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.858 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB				過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧(PL18)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (g)	Us (g)	PM18 (gf/cm2)	PM18F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	Ud (g)	Uds (gf/cm2)	S (g)	T (g)	F (g)	Fu
初　期	0	16655	10403	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5531	0	1.699
1.0	-0.014	16656	10403	3.429	3.189	3.309	3.308	1165	1.427	-651	5531	0	1.528
2.0	-0.092	16662	10406	3.130	2.916	3.023	3.014	1061	1.940	-363	5528	0	1.542
3.0	-0.157	16666	10408	2.477	2.452	2.465	2.449	862	2.013	-138	5526	0	1.569
4.0	-0.209	16669	10410	2.069	2.097	2.083	2.062	726	2.013	-2	5525	0	1.588
5.0	-0.222	16670	10411	0.463	0.405	0.434	0.412	145	1.134	263	5524	0	1.676
10.0	-0.222	16670	10411	0.273	0.296	0.285	0.262	92	0.182	-27	5524	0	1.684
20.0	-0.222	16670	10411	0.327	0.296	0.312	0.289	102	0.328	16	5524	0	1.683
30.0	-0.222	16670	10411	0.273	0.296	0.285	0.262	92	0.253	-1	5524	0	1.684
40.0	-0.209	16669	10410	0.273	0.296	0.285	0.264	93	0.109	-54	5525	0	1.684
50.0	-0.222	16670	10411	0.273	0.296	0.285	0.262	92	0.109	-53	5524	0	1.684
60.0	-0.209	16669	10410	0.273	0.296	0.285	0.264	93	0.109	-54	5525	0	1.684

表5．8(11) 浮上がり安全率の計算表（ケース18、ステップ2）

<初期状態>　　(ｹｰｽ18-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.56 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.926 gf/cm3　γsat硅 = 1.858 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.926 gf/cm3　γ'硅砂 = 0.858 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.70 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.52 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.858 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB				過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL18)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (g)	Us (g)	PM18 (gf/cm2)	PM18F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	Ud (g)	Uds (gf/cm2)	S (g)	T (g)	F (g)	Fu
初期	0.000	16669	10410	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5525	0	1.699
1.0	-0.075	16674	10413	10.183	9.463	9.823	9.816	3457	1.641	-2866	5522	0	1.276
2.0	-0.167	16681	10416	11.545	10.856	11.201	11.184	3939	1.567	-3374	5519	0	1.233
3.0	-0.258	16687	10419	10.347	9.873	10.110	10.084	3551	1.494	-3013	5517	0	1.267
4.0	-0.389	16695	10424	8.985	8.644	8.815	8.776	3091	1.567	-2526	5513	0	1.311
5.0	-0.428	16698	10426	0.898	0.970	0.934	0.891	314	1.200	118	5511	0	1.650
10.0	-0.428	16698	10426	0.544	0.670	0.607	0.564	199	0.320	-83	5511	0	1.667
20.0	-0.415	16697	10425	0.517	0.615	0.566	0.525	185	0.320	-70	5512	0	1.670
30.0	-0.415	16697	10425	0.517	0.615	0.566	0.525	185	0.320	-70	5512	0	1.670
40.0	-0.415	16697	10425	0.490	0.588	0.539	0.498	175	0.247	-86	5512	0	1.671
50.0	-0.415	16697	10425	0.517	0.561	0.539	0.498	175	0.320	-60	5512	0	1.671
60.0	-0.415	16697	10425	0.490	0.561	0.526	0.484	170	0.247	-82	5512	0	1.672

表5．8(12) 浮上がり安全率の計算表（ケース18、ステップ3）

<初期状態>　　(ｹｰｽ18-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.60 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.926 gf/cm3　γsat硅 = 1.858 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.926 gf/cm3　γ'硅砂 = 0.858 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.66 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.52 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.858 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間	浮上り量	上載土の自重	静水圧による浮力	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB				過剰間隙水圧による揚力	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL18)	土塊底面に作用する揚力	土塊の有効重量	浸透水力に起因する力	浮上り安全率
t (SEC)	Dvm (mm)	Ws (g)	Us (g)	PM18 (gf/cm2)	PM18F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	Ud (g)	Uds (gf/cm2)	S (g)	T (g)	F (g)	Fu
初期	0.000	16697	10425	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5525	0	1.699
1.0	-0.087	16703	10428	15.676	15.951	15.814	15.805	5566	2.083	-4816	5522	0	1.108
2.0	-0.284	16716	10435	18.006	18.371	18.189	18.160	6396	2.012	-5671	5516	0	1.054
3.0	-0.506	16731	10443	17.784	18.261	18.023	17.972	6329	1.869	-5657	5509	0	1.058
4.0	-0.650	16741	10448	17.063	17.161	17.112	17.047	6004	1.869	-5331	5505	0	1.079
5.0	-0.781	16749	10453	16.286	16.061	16.174	16.095	5669	1.940	-4970	5500	0	1.102
10.0	-0.991	16763	10461	13.013	11.993	12.503	12.404	4369	2.655	-3413	5494	0	1.199
20.0	-1.004	16764	10461	10.572	9.409	9.991	9.890	3483	2.942	-2424	5494	0	1.275
30.0	-1.004	16764	10461	0.532	0.722	0.627	0.527	185	0.438	-28	5494	0	1.670
40.0	-1.017	16765	10462	0.532	0.667	0.600	0.498	175	0.438	-18	5493	0	1.672
50.0	-1.004	16764	10461	0.532	0.612	0.572	0.472	166	0.366	-34	5494	0	1.673
60.0	-1.017	16765	10462	0.476	0.612	0.544	0.442	156	0.438	2	5493	0	1.675

表5．8(13)　浮上がり安全率の計算表（ケース19、ステップ1）

<初期状態>　(CASE19-STEP1-200GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.46 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.913 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.913 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.78 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.83 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.913 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM19 (gf/cm2)	PM19F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL19) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16600	10374	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5771	0	1.698
1.0	0.005	16599	10374	1.744	1.541	1.643	1.643	579	2.307	252	5771	0	1.609
2.0	0.005	16599	10374	1.910	1.594	1.752	1.753	617	2.974	454	5771	0	1.603
3.0	-0.005	16600	10374	1.882	1.435	1.659	1.658	584	2.907	463	5771	0	1.608
4.0	-0.025	16602	10375	1.882	1.461	1.672	1.669	588	2.774	411	5770	0	1.607
5.0	-0.025	16602	10375	0.230	-0.078	0.076	0.074	26	1.974	685	5770	0	1.694
10.0	-0.025	16602	10375	0.175	-0.052	0.062	0.059	21	0.175	42	5770	0	1.695
20.0	-0.025	16602	10375	0.230	-0.001	0.115	0.112	39	0.108	-1	5770	0	1.692
30.0	-0.025	16602	10375	0.175	0.001	0.088	0.086	30	0.108	9	5770	0	1.693
40.0	-0.015	16601	10374	0.175	0.054	0.115	0.113	40	0.108	-1	5771	0	1.692
50.0	-0.025	16602	10375	0.202	0.081	0.142	0.139	49	0.108	-10	5770	0	1.690
60.0	-0.035	16602	10375	0.202	0.081	0.142	0.138	49	0.108	-10	5770	0	1.690

表5．8(14)　浮上がり安全率の計算表（ケース19、ステップ2）

<初期状態>　(CASE19-STEP2-300GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.46 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.913 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.913 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.78 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.83 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.913 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM19 (gf/cm2)	PM19F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL19) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16602	10375	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5770	0	1.698
1.0	-0.028	16604	10376	5.280	4.948	5.114	5.111	1800	2.652	-845	5769	0	1.447
2.0	-0.079	16608	10378	5.997	5.612	5.805	5.797	2041	3.584	-751	5767	0	1.419
3.0	-0.089	16608	10378	6.356	5.851	6.104	6.095	2146	3.584	-856	5767	0	1.407
4.0	-0.089	16608	10378	6.328	5.825	6.077	6.068	2137	3.384	-918	5767	0	1.408
5.0	-0.099	16609	10379	0.590	0.083	0.337	0.327	115	2.586	816	5767	0	1.680
10.0	-0.089	16608	10378	0.507	0.110	0.309	0.300	105	0.456	59	5767	0	1.681
20.0	-0.089	16608	10378	0.480	0.110	0.295	0.286	101	0.323	16	5767	0	1.682
30.0	-0.089	16608	10378	0.452	0.163	0.308	0.299	105	0.257	-13	5767	0	1.681
40.0	-0.099	16609	10379	0.452	0.163	0.308	0.298	105	0.323	11	5767	0	1.681
50.0	-0.089	16608	10378	0.452	0.190	0.321	0.312	110	0.270	-13	5767	0	1.681
60.0	-0.099	16609	10379	0.452	0.190	0.321	0.311	110	0.257	-17	5767	0	1.681

表5．8(15) 浮上がり安全率の計算表（ケース19、ステップ3）

<初期状態>　(CASE19-STEP3-400GAL)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.48 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.788 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'砕石 = 0.788 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.77 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.83 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.788 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 0.946 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM19 (gf/cm2)	PM19F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL19) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	15526	10380	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5223	0	1.594
1.0	-0.024	15528	10381	6.075	5.695	5.885	5.883	2071	2.454	-1188	5222	0	1.329
2.0	-0.044	15529	10381	7.193	7.130	7.162	7.157	2520	2.788	-1517	5222	0	1.283
3.0	-0.055	15530	10382	8.144	8.034	8.089	8.084	2847	2.854	-1819	5222	0	1.251
4.0	-0.095	15532	10383	8.592	8.406	8.499	8.490	2989	2.988	-1914	5220	0	1.238
5.0	-0.125	15534	10384	8.815	8.566	8.691	8.678	3056	2.921	-2004	5220	0	1.232
10.0	-0.287	15544	10390	8.815	8.566	8.691	8.662	3050	3.188	-1903	5215	0	1.232
20.0	-0.448	15555	10396	7.809	6.864	7.337	7.292	2568	3.188	-1420	5210	0	1.278
30.0	-0.478	15557	10397	1.265	0.590	0.928	0.880	310	0.254	-218	5210	0	1.548
40.0	-0.478	15557	10397	1.209	0.590	0.900	0.852	300	0.188	-232	5210	0	1.549
50.0	-0.488	15557	10397	1.209	0.644	0.927	0.878	309	0.321	-194	5209	0	1.548
60.0	-0.478	15557	10397	1.209	0.644	0.927	0.879	309	0.254	-218	5210	0	1.548

表5．8(16) 浮上がり安全率の計算表（ケース20、ステップ1）

<初期状態>　(ケース20-STEP1-200gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.23 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat硅 = 1.855 gf/cm3　γsat砕 = 1.917 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'硅砂 = 0.855 gf/cm3　γ'砕石 = 0.917 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.72 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.95 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.917 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM20 (gf/cm2)	PM20F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL20) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16039	10291	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5803	0	1.657
1.0	0.036	16036	10290	11.974	11.942	11.958	11.962	4211	6.549	-1854	5805	0	1.176
2.0	0.036	16036	10290	14.141	14.058	14.100	14.103	4965	6.710	-2550	5805	0	1.118
3.0	0.036	16036	10290	14.333	14.265	14.299	14.303	5036	5.987	-2880	5805	0	1.113
4.0	0.036	16036	10290	14.059	14.007	14.033	14.037	4942	5.505	-2960	5805	0	1.120
5.0	0.036	16036	10290	10.904	10.858	10.881	10.885	3832	2.855	-2804	5805	0	1.208
10.0	0.036	16036	10290	6.679	6.650	6.665	6.668	2348	0.446	-2187	5805	0	1.350
20.0	0.049	16035	10289	2.289	2.391	2.340	2.345	826	-0.036	-839	5805	0	1.534
30.0	0.023	16037	10290	0.506	0.533	0.520	0.522	184	0.205	-110	5804	0	1.628
40.0	0.049	16035	10289	0.259	0.249	0.254	0.259	91	0.285	11	5805	0	1.643
50.0	0.049	16035	10289	0.204	0.223	0.214	0.218	77	0.124	-32	5805	0	1.645
60.0	0.036	16036	10290	0.122	0.146	0.134	0.138	48	0.124	-4	5805	0	1.650

表5．8(17) 浮上がり安全率の計算表（ケース20、ステップ2）

<初期状態>　　(ｹｰｽ20-STEP2-300gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.23 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat砕 = 1.855 gf/cm3　γsat砕 = 1.917 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'硅砂 = 0.855 gf/cm3　γ'砕石 = 0.917 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.72 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.95 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.917 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM20 (gf/cm2)	PM20F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL20) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16036	10290	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5805	0	1.657
1.0	-0.005	16037	10290	11.974	11.942	11.958	11.958	4210	6.549	-1852	5804	0	1.176
2.0	0.034	16034	10289	14.141	14.058	14.100	14.103	4965	6.710	-2550	5806	0	1.118
3.0	0.060	16032	10288	14.333	14.265	14.299	14.305	5036	5.987	-2881	5807	0	1.113
4.0	0.060	16032	10288	14.059	14.007	14.033	14.039	4943	5.505	-2961	5807	0	1.119
5.0	0.073	16031	10287	10.904	10.858	10.881	10.888	3833	2.855	-2806	5807	0	1.207
10.0	0.073	16031	10287	6.679	6.650	6.665	6.672	2349	0.446	-2188	5807	0	1.349
20.0	0.073	16031	10287	2.289	2.391	2.340	2.347	826	-0.036	-839	5807	0	1.534
30.0	0.060	16032	10288	0.506	0.533	0.520	0.526	185	0.205	-111	5807	0	1.628
40.0	0.060	16032	10288	0.259	0.249	0.254	0.260	92	0.285	11	5807	0	1.643
50.0	0.073	16031	10287	0.204	0.223	0.214	0.221	78	0.124	-33	5807	0	1.645
60.0	0.060	16032	10288	0.122	0.146	0.134	0.140	49	0.146	3	5807	0	1.649

表5．8(18) 浮上がり安全率の計算表（ケース20、ステップ3）

<初期状態>　　(ｹｰｽ20-STEP3-400gal)

1)管の上端部から地表面までの距離　H = 23.22 cm
2)管の外径　D = 6.0 cm
3)管の奥行き　L = 60.0 cm
4)埋戻し部の単位体積重量　γsat硅 = 1.855 gf/cm3　γsat砕 = 1.917 gf/cm3
5)管の見かけの単位体積重量　γeq = 0.600 gf/cm3
6)水の単位体積重量　γw = 1.000 gf/cm3
7)管の自重　Wm = 1017.88 gf
8)埋戻し部の水中単位体積重量　γ'硅砂 = 0.855 gf/cm3　γ'砕石 = 0.917 gf/cm3
9)管の下端部から埋戻し部低面までの距離　Z1 = 4.73 cm
10)埋戻し部底面からUds計測点までの距離　Z2 = 10.95 cm
11)管下方の埋戻し部の単位体積重量　γ1' = 0.917 gf/cm3
12)管下方の原地盤部の単位体積重量　γ2' = 1.023 gf/cm3

加振開始からの時間 t (SEC)	浮上り量 Dvm (mm)	上載土の自重 Ws (g)	静水圧による浮力 Us (g)	管の下端部における過剰間隙水圧 UdB PM20 (gf/cm2)	PM20F (gf/cm2)	平均値 (gf/cm2)	補正値 (gf/cm2)	過剰間隙水圧による揚力 Ud (g)	管の下方における原地盤の過剰間隙水圧 (PL20) Uds (gf/cm2)	土塊底面に作用する揚力 S (g)	土塊の有効重量 T (g)	浸透水力に起因する力 F (g)	浮上り安全率 Fu
初期	0.000	16032	10288	0.000	0.000	0.000	0.000	0	0.000	0	5805	0	1.657
1.0	0.020	16031	10287	11.906	12.022	11.964	11.966	4213	-7.433	-6889	5805	0	1.176
2.0	0.060	16028	10285	13.339	13.576	13.458	13.464	4740	-10.310	-8452	5807	0	1.134
3.0	0.099	16025	10284	13.284	13.472	13.378	13.388	4713	-10.232	-8397	5808	0	1.136
4.0	0.112	16024	10284	13.284	13.421	13.353	13.364	4705	-10.310	-8416	5808	0	1.137
5.0	0.138	16023	10283	13.228	13.421	13.325	13.338	4696	-9.999	-8296	5809	0	1.138
10.0	0.112	16024	10284	12.512	12.488	12.500	12.511	4405	-9.454	-7808	5808	0	1.160
20.0	-0.006	16033	10288	11.355	11.971	11.663	11.662	4106	-9.143	-7397	5804	0	1.185
30.0	-0.058	16036	10290	5.349	5.497	5.423	5.417	1907	-0.434	-2063	5803	0	1.398
40.0	-0.085	16038	10291	1.326	1.405	1.366	1.357	478	-0.434	-634	5802	0	1.584
50.0	-0.085	16038	10291	0.444	0.473	0.459	0.450	158	-0.201	-231	5802	0	1.632
60.0	-0.098	16039	10291	0.059	0.214	0.137	0.127	45	-0.356	-173	5801	0	1.650

表5．9　最終浮上がり量と浮上がり安全率

CASE No.	STEP No.	最終浮上がり量 Dmv (mm)	浮上がり安全率 Fu 最小安全率 Fumin	浮上がり安全率 Fu ﾘﾌﾄｵﾌ時安全率 FuLO
15	1	-2.963	0.995	0.999
	2	-3.668	0.986	0.986
	3	-5.367	0.994	0.994
16	1	-3.373	0.918	1.026
	2	-3.915	0.959	0.968
	3	-4.890	1.148	1.209
17	1	2.401	0.992	1.032
	2	0.519	0.990	0.990
	3	90.000	0.862	0.868
18	1	-0.209	1.528	1.528
	2	-0.415	1.232	1.275
	3	-1.017	1.053	1.108
19	1	-0.035	1.603	1.609
	2	-0.099	1.407	1.447
	3	-0.478	1.231	1.329
20	1	0.036	1.113	1.176
	2	0.060	1.113	1.118
	3	-0.098	1.135	1.176

(2)　浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化

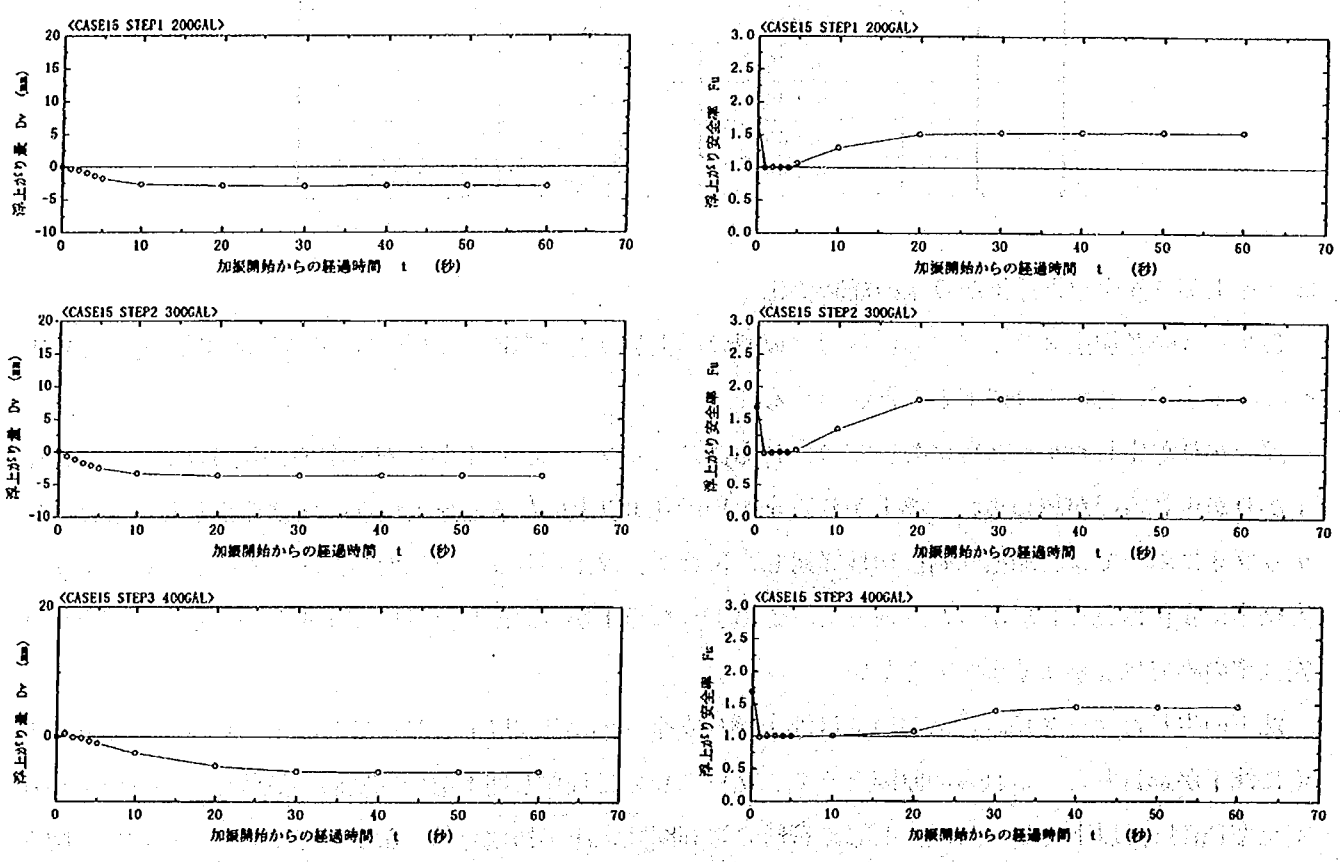
各ケースの各加振ステップにおける管渠模型の浮上がり安全率Fuと浮上がり量の経時変化を図5．10(1)～(6)に示す。これらより以下のことがいえる。

浮上がりが生じたケース17においては、各加振ステップとも、浮上がり安全率Fuが1.0以下になると浮上がりが生じるのが認められ、浮上がり安全率Fuが1.0以上になると浮上がりはほぼ停止した。また、ステップ3においては、加振開始後10秒経過した付近で、浮上がり速度が急増したが、そのときの浮上がり安全率に変化は見られなかった。従って、このような浮上がり速度が急激に変化する様な現象は浮上がり安全率のみでは評価する事ができない。

沈下の生じたケース15，16においては浮上がり安全率Fuが1.0以下となっても浮上がりは生じておらず、逆に沈下が進行した。これらの原因として、ケース15では埋戻し部下部の硅砂層の液状化により浮上がり安全率Fuは1.0以下となったが、上部砕石層の過剰間隙水圧が初期有効上載圧まで上昇していない（図5．9(7)）ことから、浮上がり安全率の計算では考慮していない上部砕石層のせん断抵抗Qが残っていたため、浮上がり安全率Fuが1.0以下となっても浮上がりが生じなかったと考えられる。さらに、上部砕石層の効果により下部硅砂層で発生した過剰間隙水圧の消散が早いため、過剰間隙水圧の消散に伴う地盤の圧密により沈下が生じたものと考えられる。ケース16については、表5．8を見ると、浮上がり安全率Fuが1.0以下となっているのは、浸透水力に起因する力Fの効果によることがわかる。従ってケース16では埋戻し部直下の原地盤に発生した過剰間隙水圧が埋戻し部の砕石層へ逃げることにより浸透水力が働いたが、ケース15と同様に砕石層のせん断抵抗Qが残っているため、埋戻し部全体の浮上がりは生じなかったもの

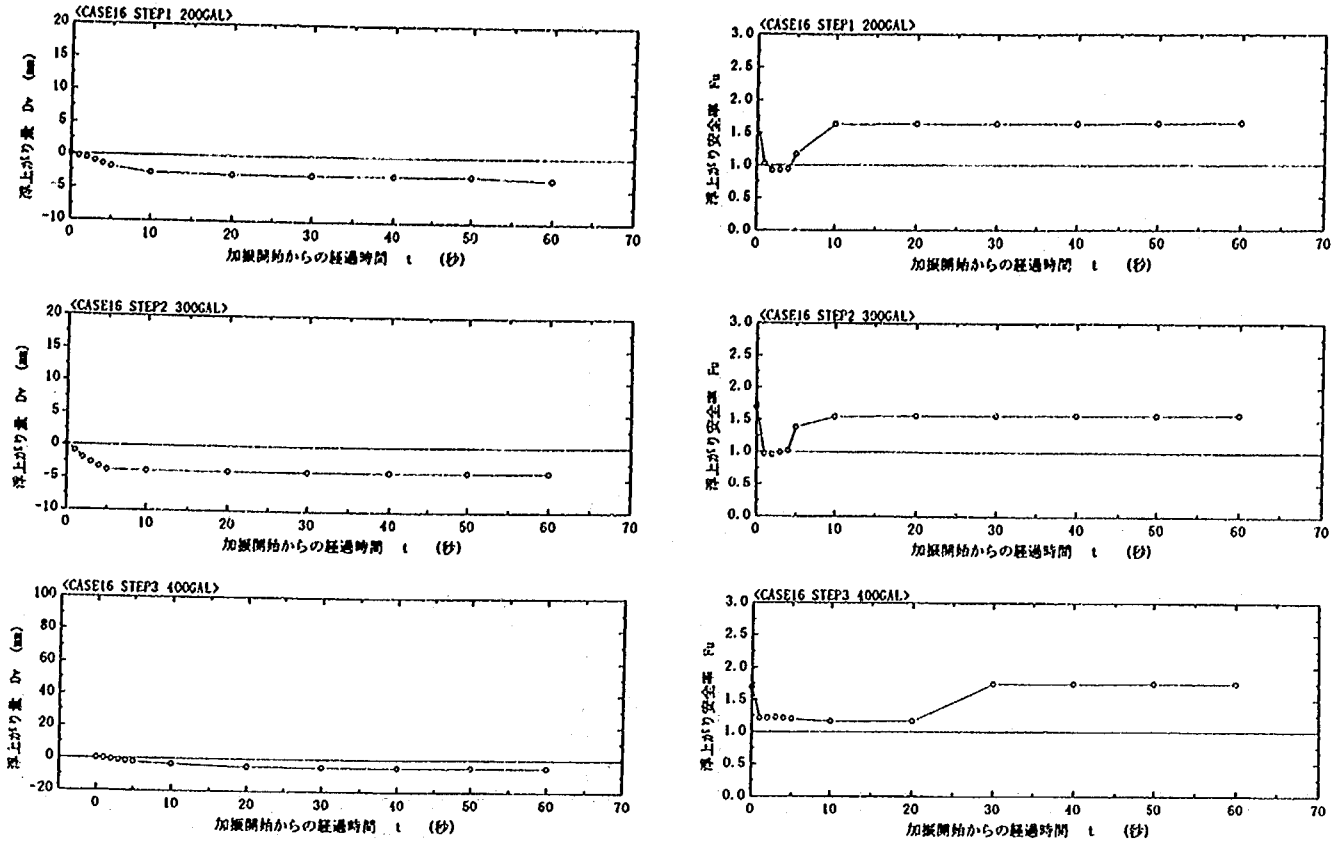
と考えられる。また、ケース16のステップ3では、埋戻し部直下の原地盤部はステップ加振により締まったことにより過剰間隙水圧があまり発生せず、従って、浸透水力に起因する力が作用しなかったため、浮上がり安全率Fuは1.0以上となったと考えられる。このように埋戻し部全面を砕石で埋め戻した場合、原地盤に発生した過剰間隙水圧が埋戻し部の砕石層に逃げ込もうとすることによる大きな浸透水力が発生するが、この効果による埋戻し部全体の浮上がりは生じておらず、この様な現象をどのように評価するかは今後の課題と考えられる。

浮上がり・沈下ともあまり生じなかった、モデル8のケース18～20においては浮上がり安全率Fuは1.0以上となっており、従って浮上がり安全率Fuが1.0以上では管渠の浮上がり安定性はほぼ保たれているといえる。

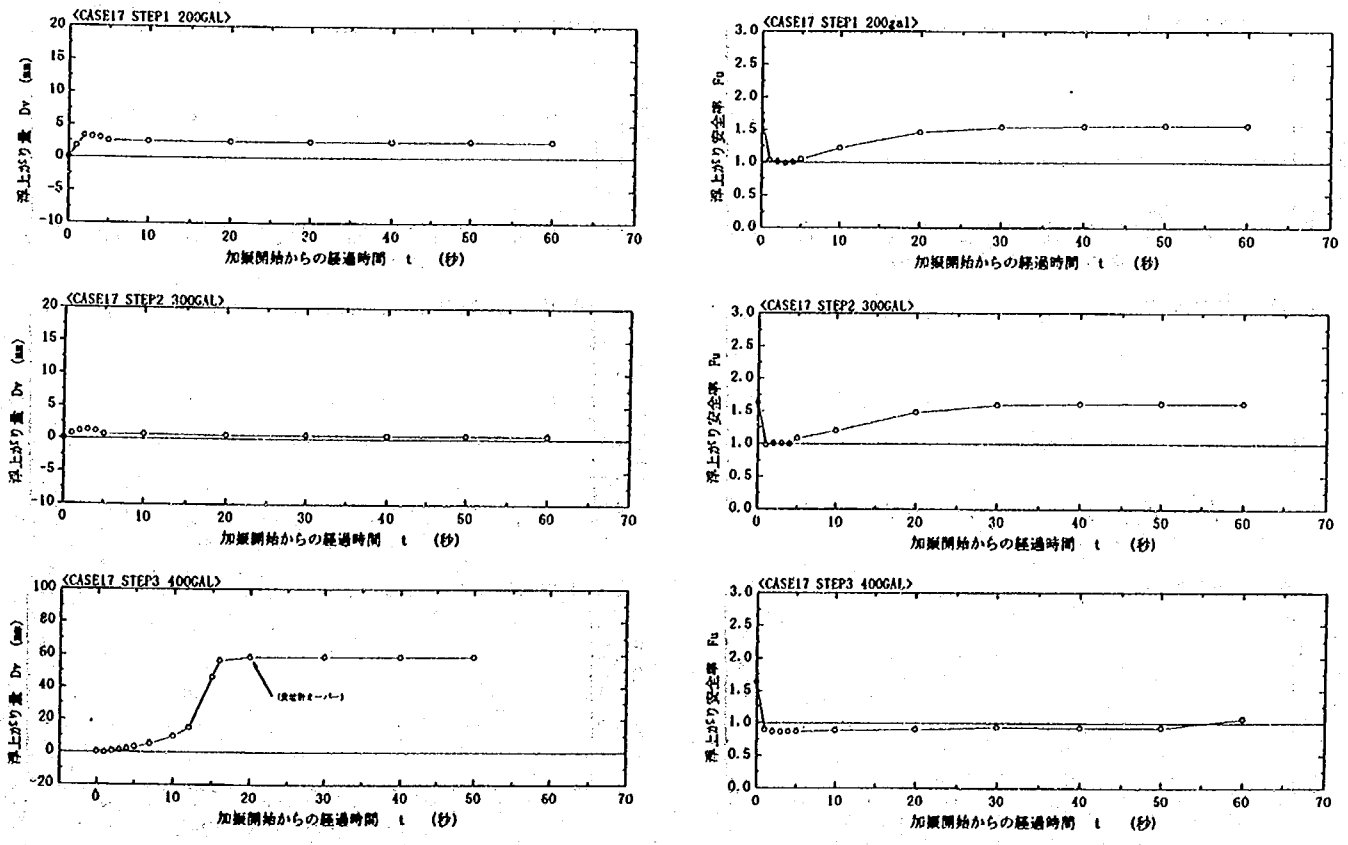


(1) ケース15

図5.10 浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化

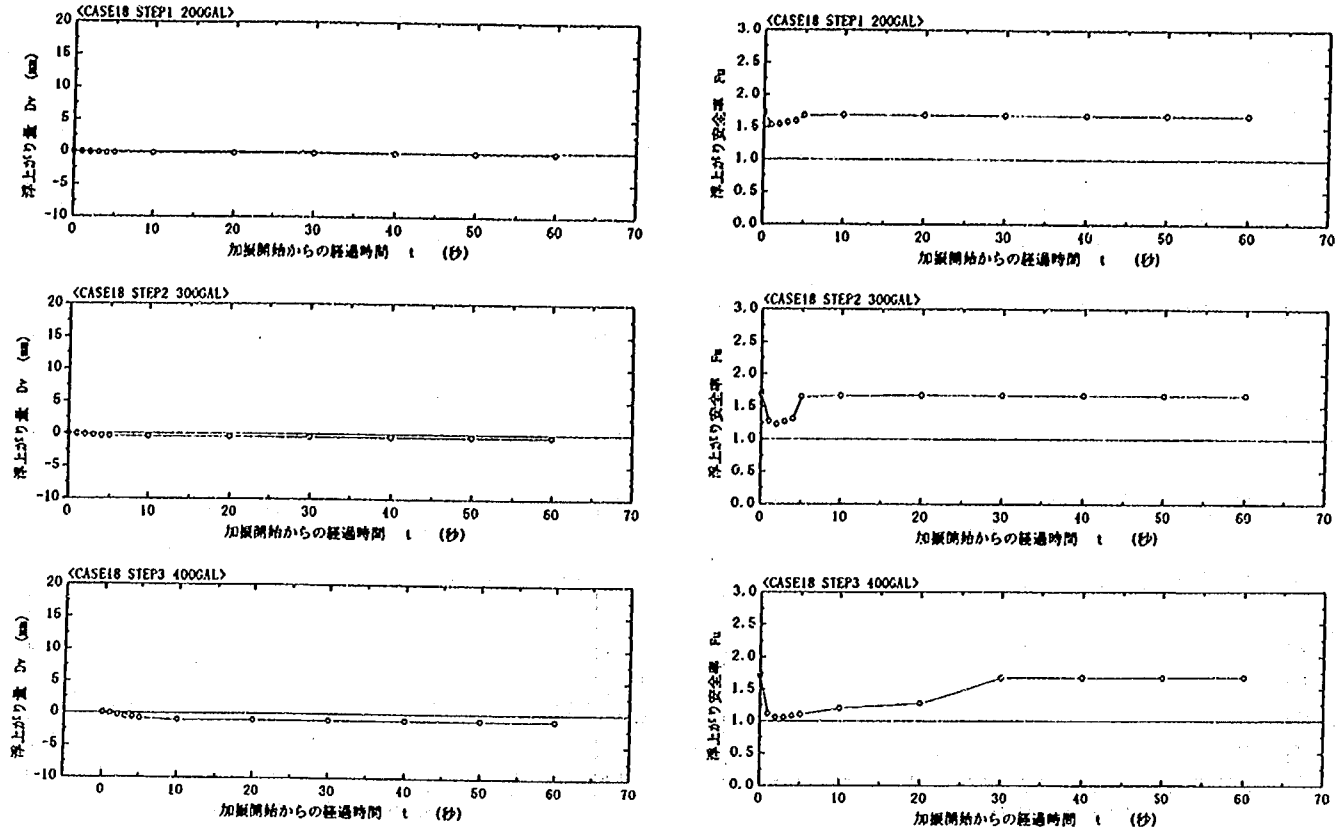


(2) ケース16

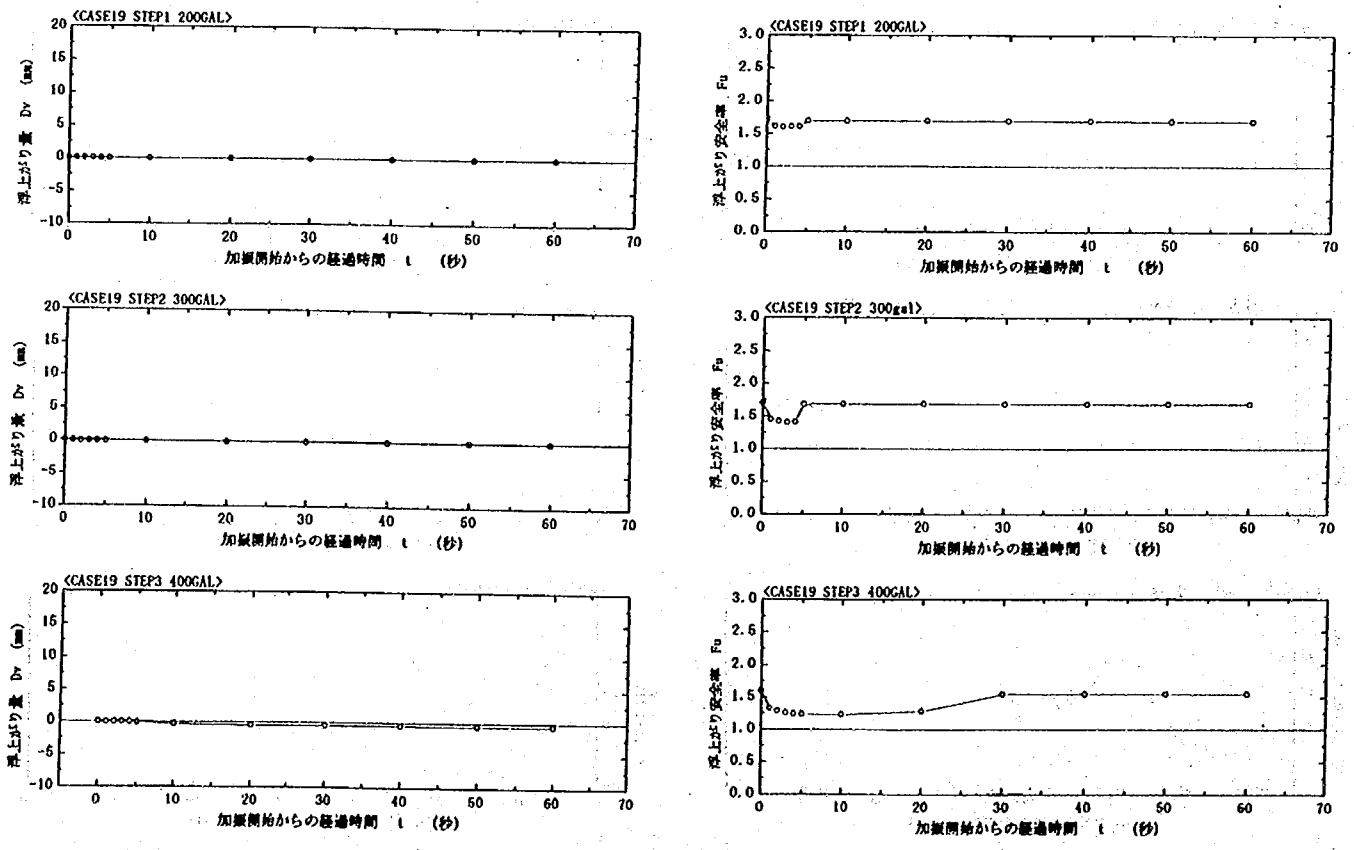


(3) ケース17

図5.10 浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化

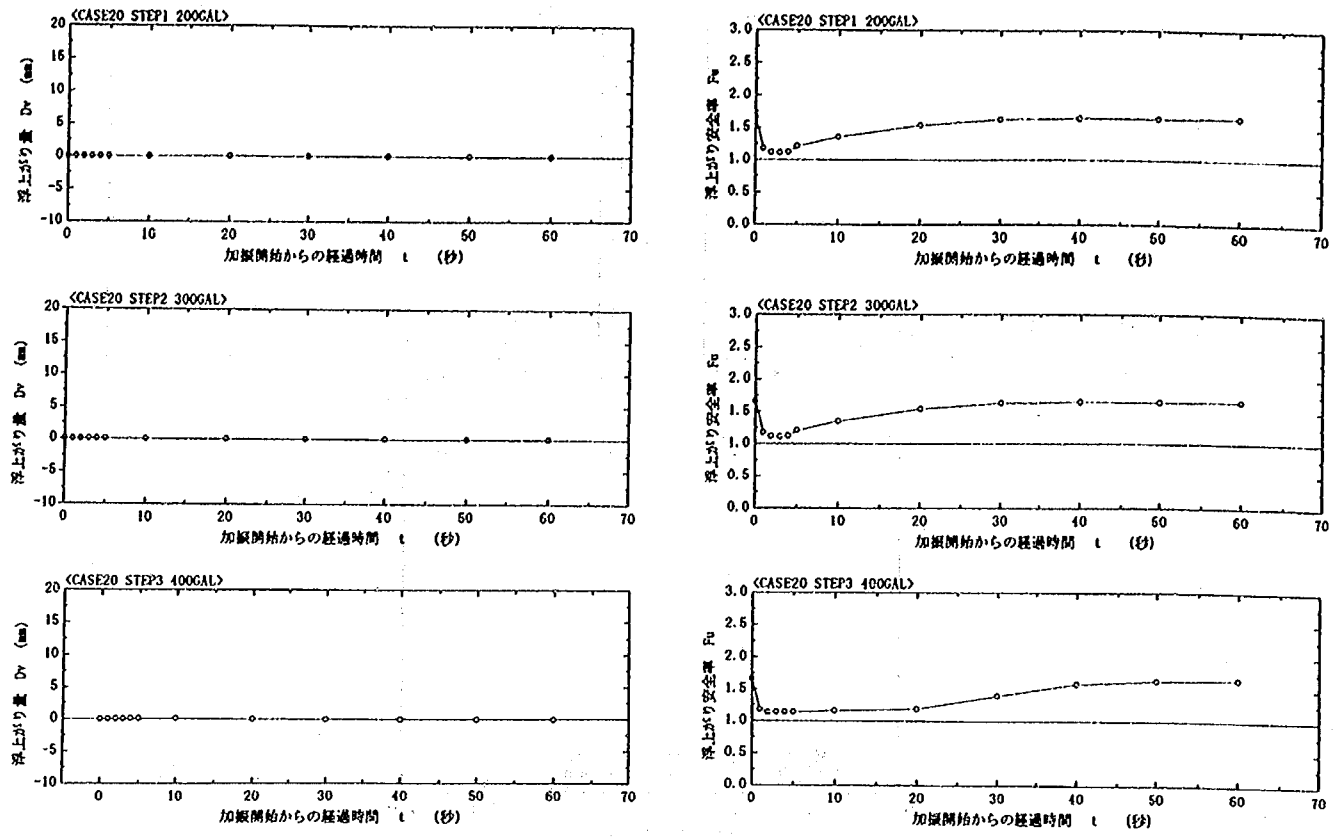


(4) ケース18



(5) ケース19

図5.10 浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化



(6) ケース20

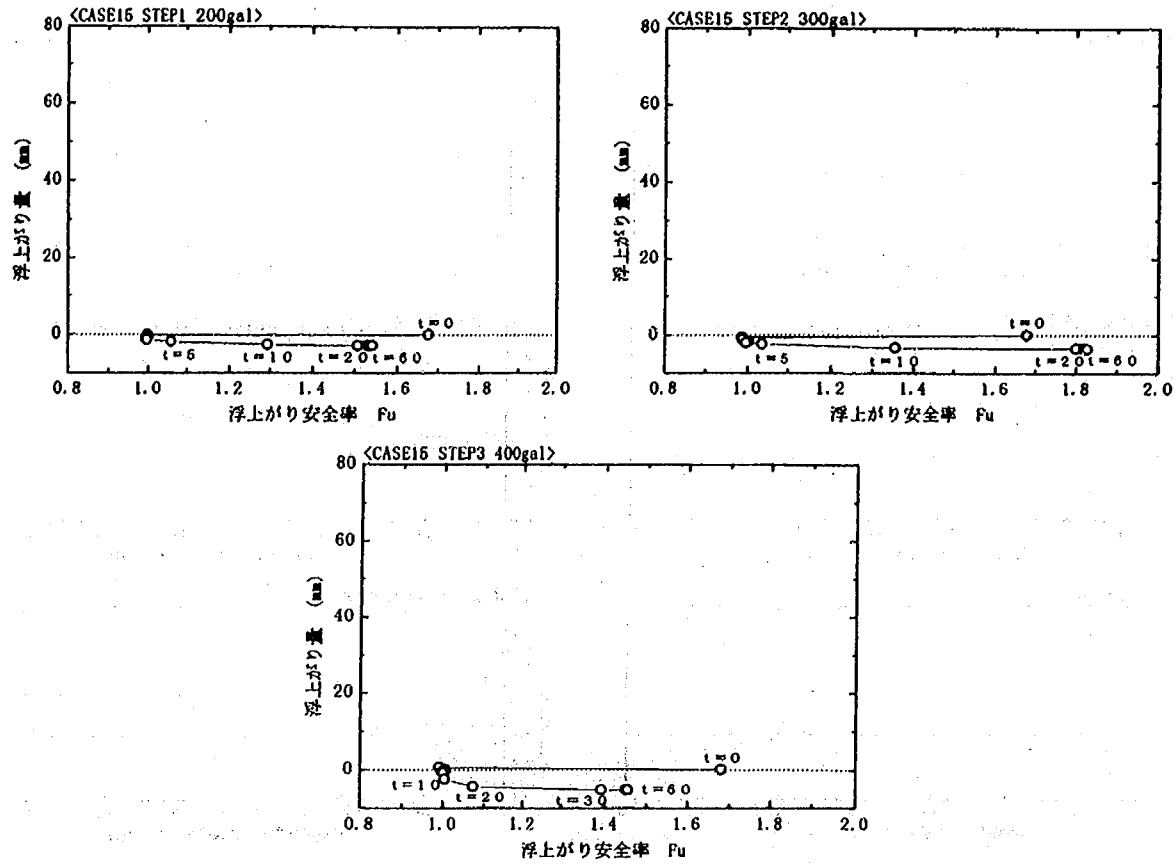
図5.10 浮上がり安全率と浮上がり量の経時変化

(3) 浮上がり安全率と浮上がり量の関係

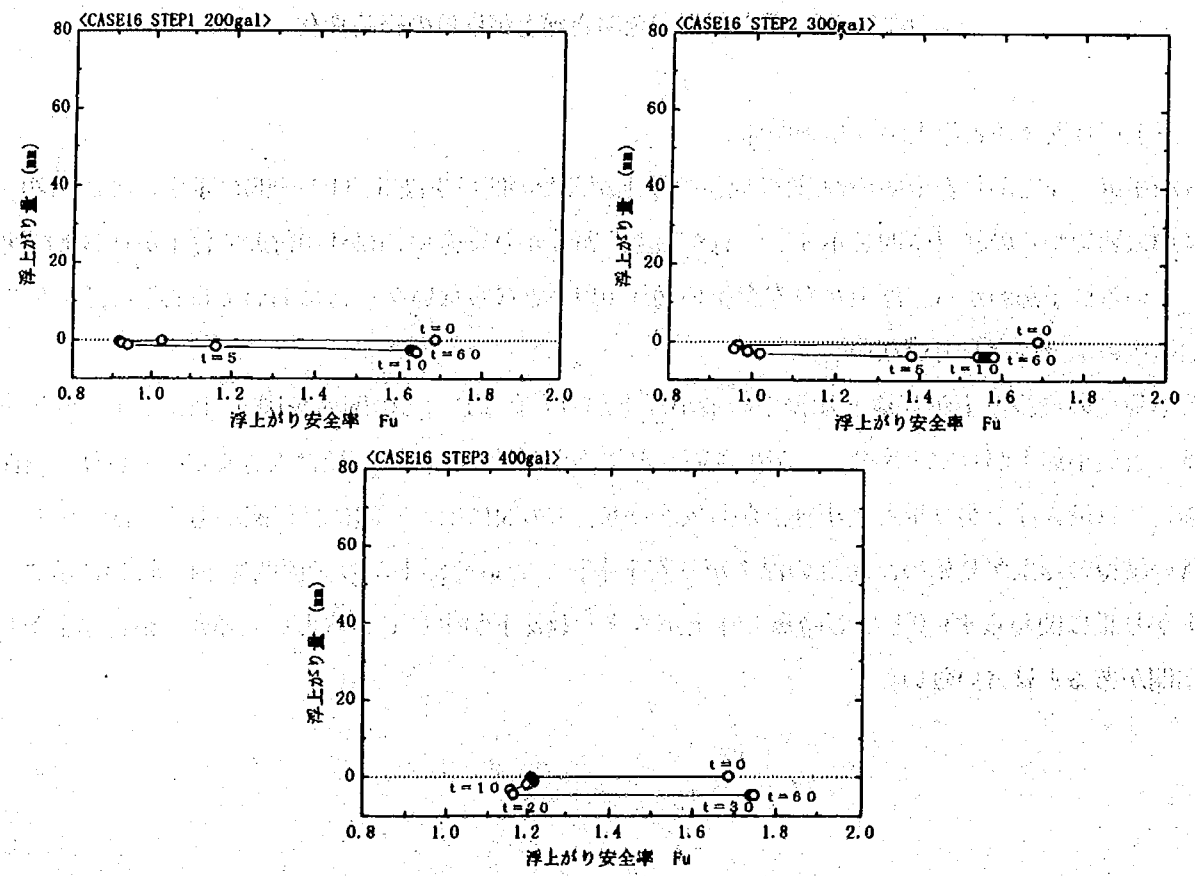
各加振毎の浮上がり安全率Fuと管渠模型の浮上がり量の関係を図5.11(1)～(6)に示す。なお、図中の数字は加振開始からの経過時間を示す。これからも、浮上がり安全率Fuが1.0付近で浮上がりおよび沈下が生じている様子がわかる。浮上がり安全率Fuが1.0以下とならないケースにおいては管渠の浮上がりおよび加振中の沈下は生じていない。

管渠模型の最終浮上がり量と加振中の最小浮上がり安全率F_{umin}の関係を図5.12に示す。各ケース別に見ると最小浮上がり安全率F_{umin}が小さいほど浮上がり量または沈下量は大きくなっており、条件が同じ場合には最終浮上がり量と最小浮上がり安全率F_{umin}の間には定性的には相関があると思われる。

管渠模型の浮上がり始めた時点の浮上がり安全率F_{u0}と最終浮上がり量の関係を図5.13に示す。最終浮上がり量に関わらず1.0となる時点で浮上がりまたは沈下が生じているといえるが、最終浮上がり量との相関があるとは言い難い。

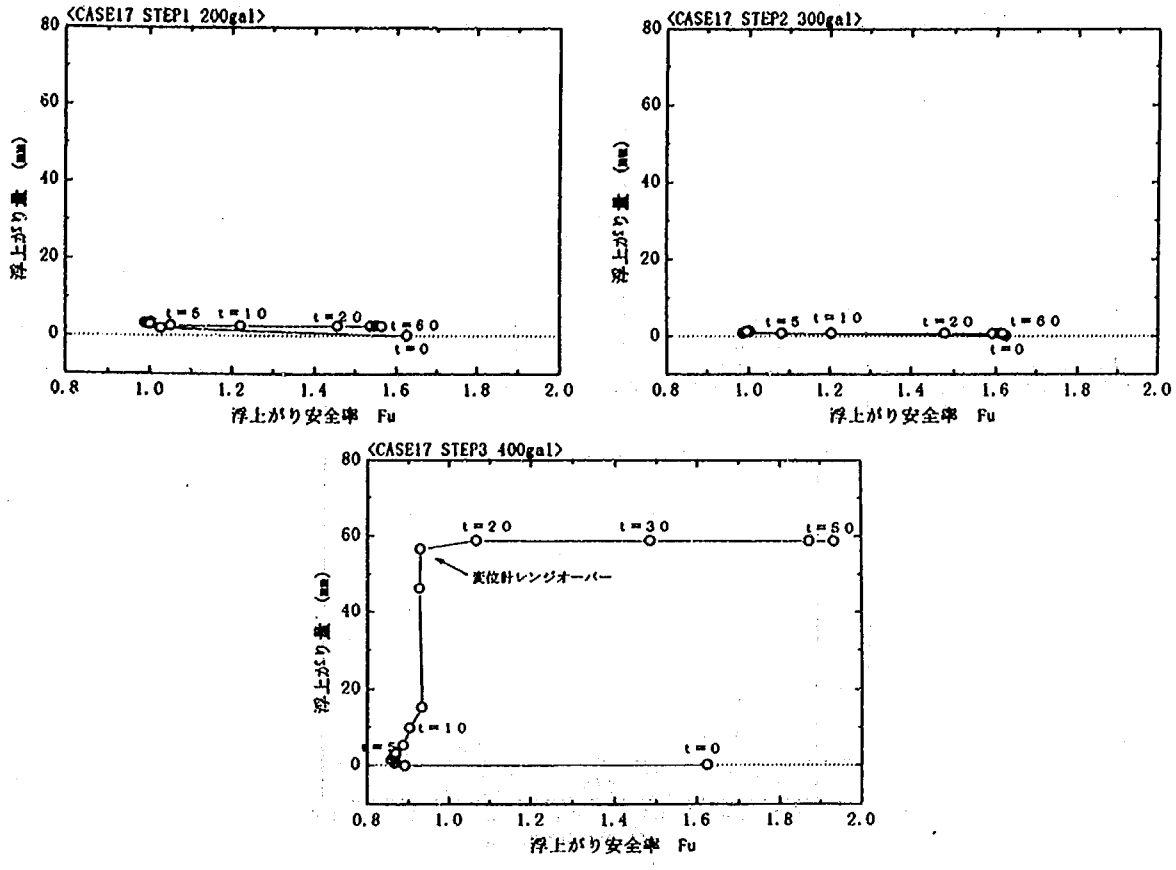


(1) ケース15

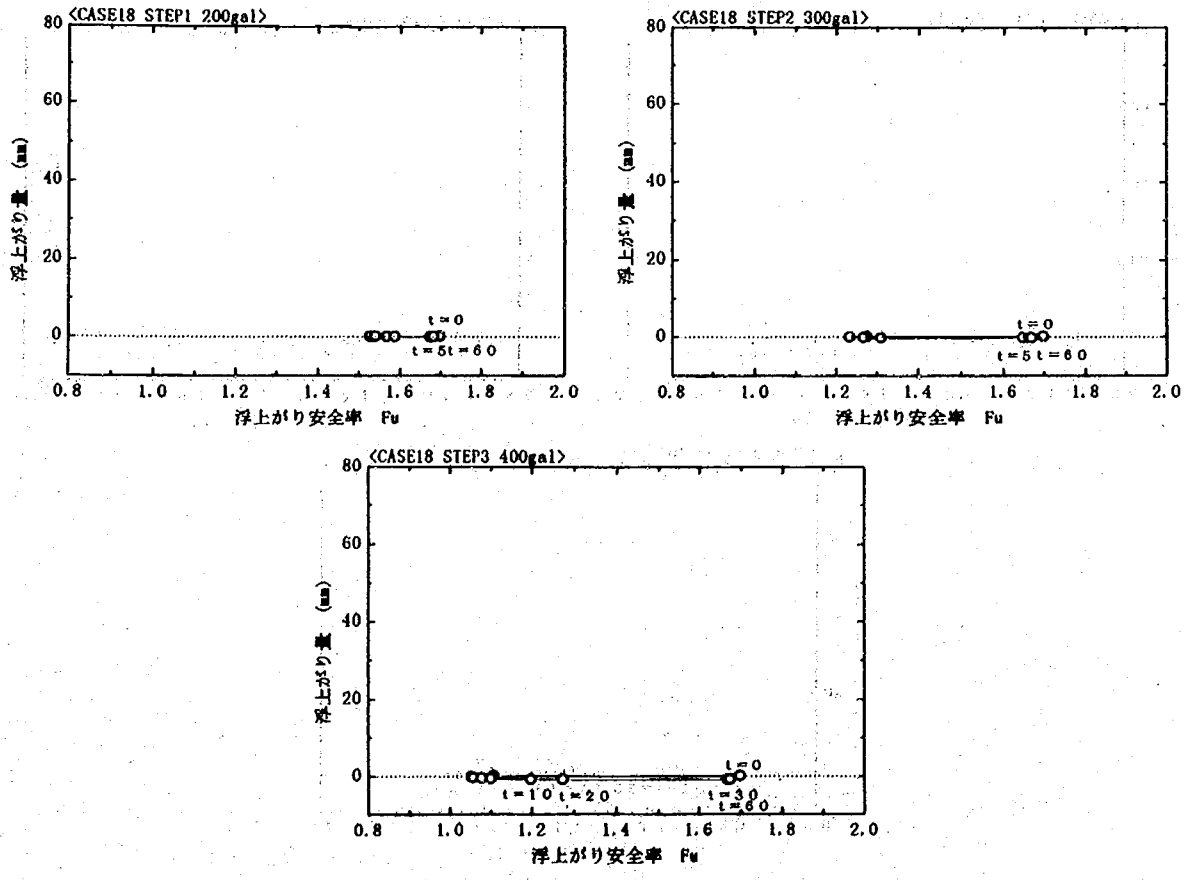


(2) ケース16

図5.11 浮上がり安全率と浮上がり量の関係

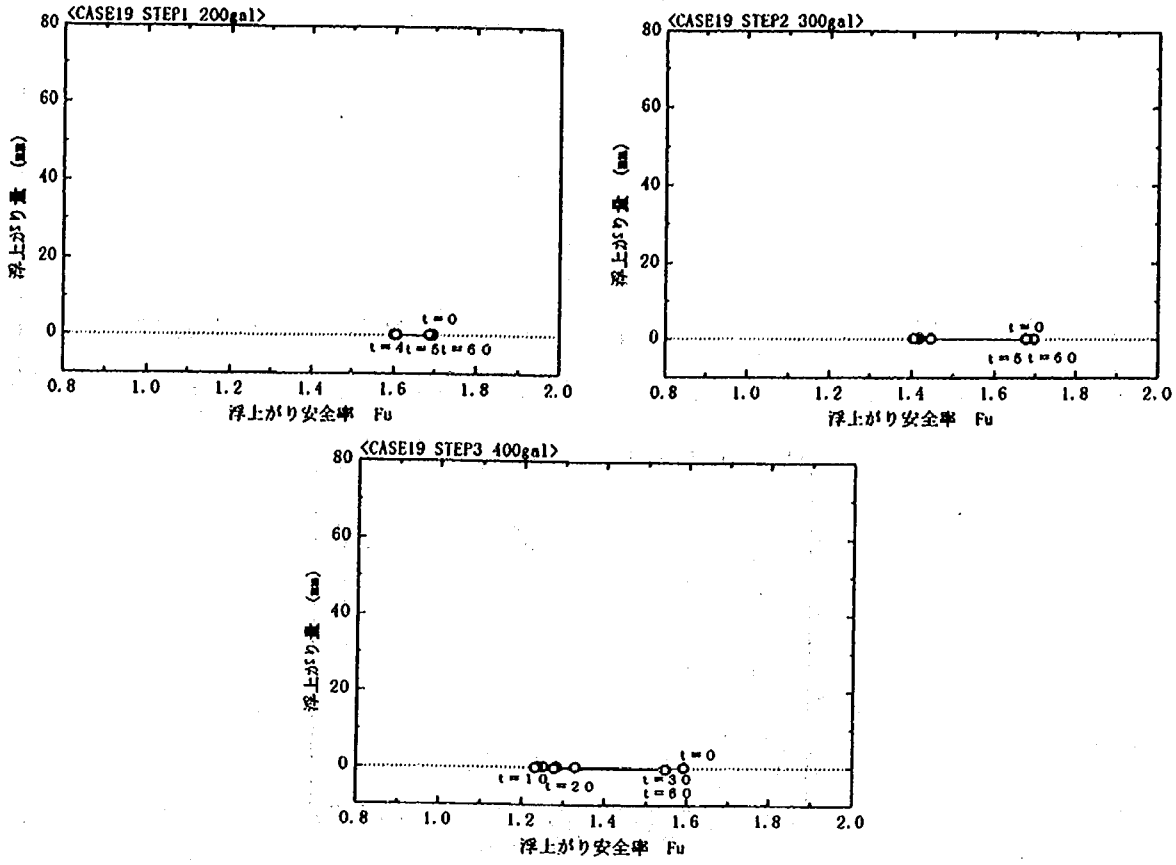


(3) ケース17

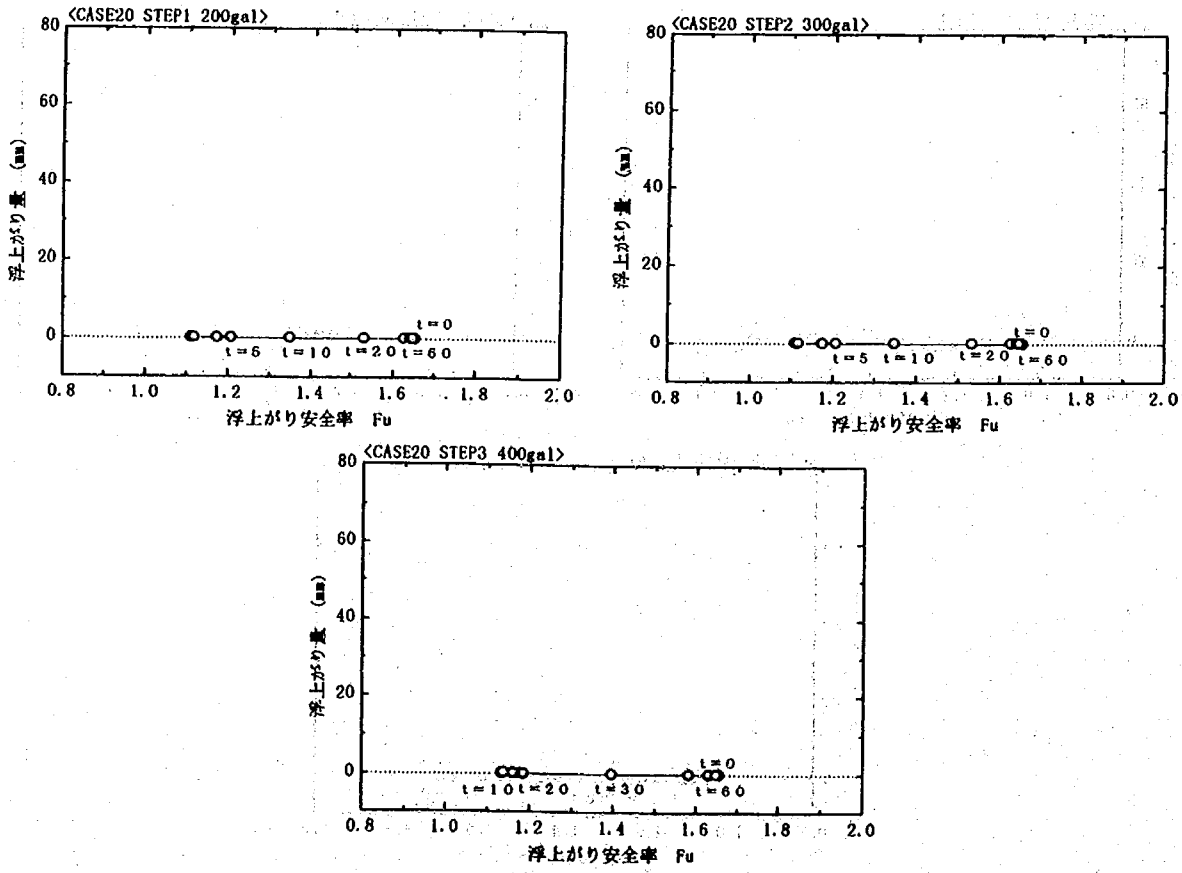


(4) ケース18

図5.11 浮上がり安全率と浮上がり量の関係



(5) ケース19



(6) ケース20

図5.11 浮上がり安全率と浮上がり量の関係

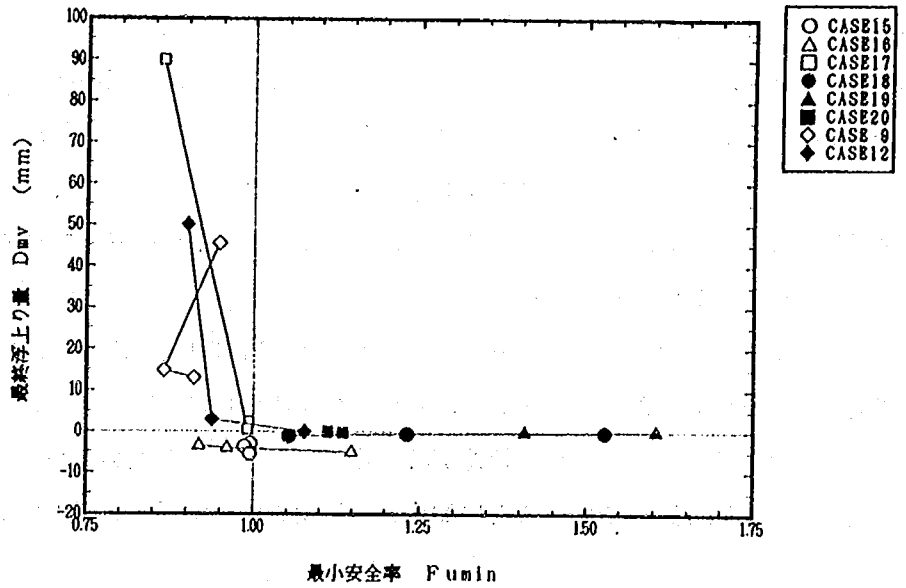


図5.12　最終浮上がり量と最小浮上がり安全率の関係

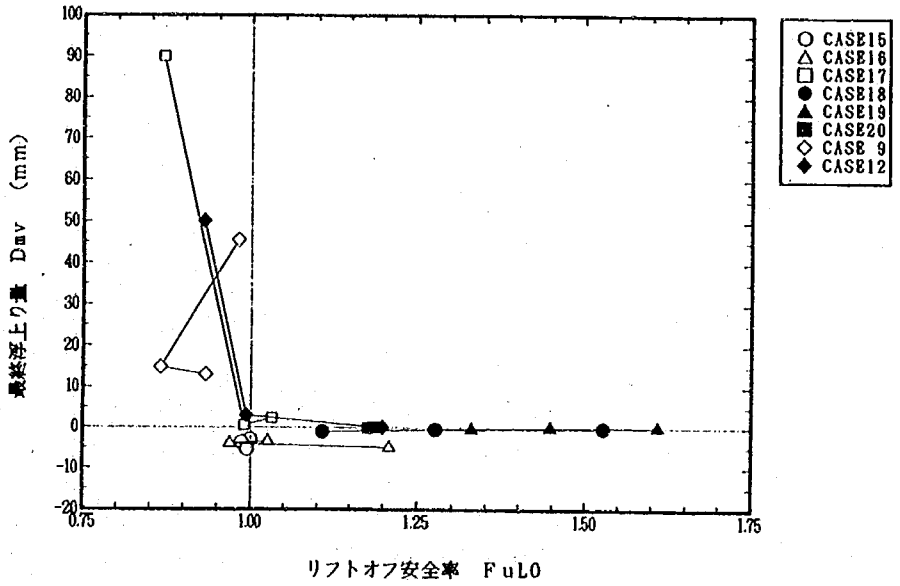


図5.13　最終浮上がり量と浮上がり始めた時点の浮上がり安全率の関係

5.5　まとめ

本実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

(1) 管渠埋戻し部周辺の原地盤の密度の違いの影響により、原地盤の密度の低いモデルよりも原地盤の密度の高いモデルの方が、浮上がり量または沈下量が少なかった。

(2) 砕石埋戻しの位置の違いにより、埋戻し部上部を埋め戻した場合および、埋戻し部全面を埋め戻した場合は浮上がりは生じず、埋戻し部下部のみを砕石で埋め戻した場合は浮上がりが生じた。従って、埋戻し部上部あるいは埋戻し部全面の砕石による埋め戻しは、地盤の液状化時の管渠の浮上がり対策として効果があり、下部のみの砕石による埋戻しは浮上がり対策として有効でないと言える。

(3) 埋戻し部下部の砕石埋戻しで、管渠の浮上がりが生じたケース17の地盤の変形は、下部の砕石部分においては管渠の浮上がりに伴う地盤の変状はあまり生じず、埋戻し部上部の硅砂部分は管渠の浮上がりに伴う管渠下方への原地盤の回り込み、および埋戻し部上方の盛り上がりが見られた。また、埋戻し部下部を砕石で埋め戻したケース17、20においては噴砂が確認された。

(4) 砕石による埋戻し部は変形を抑制する効果があり、また、埋戻し部上部を砕石で埋め戻した場合には、埋戻し部下部の変形も抑制する効果があった。

(5) 原地盤の密度の違いにより地盤および管渠模型の応答加速度は異なり、原地盤が液状化しやすい場合は、応答加速度振幅は一旦増大した後減少するが、原地盤が液状化しにくい場合は入力加速度とほぼ同様の応答加速度であった。このことにより、地盤が液状化するときに浮き上がりやすいのは、原地盤が浮き上がった管渠の下部に回り込みやすいことに加え、応答加速度が増幅することによる効果も働いていると考えられる。

(6) 管渠模型が浮き上がりまたは加振中に沈下し始める時点における浮上がり安全率は1.0程度であった。浮き上がった後の最小浮上がり安全率と最終浮上がり量の間に定性的にはある程度の相関があった。

6．全体のまとめおよび今後の課題

6．1　全体のまとめ

下水道施設の地震時浮上がり安定性について、模型振動台実験により検討を行った。これらの実験より得られた結果をまとめると以下のとおりである。

(1)　原地盤の密度の影響

管渠模型では、埋戻し部分が液状化した場合のみに浮上がりが生じた。

管渠埋戻し部周辺の原地盤の密度の違いの影響により、原地盤の密度の低いモデルよりも原地盤の密度の高いモデルの方が、浮上がり量または沈下量が少なくなる傾向があった（一部のケースではステップ加振を進めると逆転するものもあった)。

浮上がりの生じたケースにおいては、原地盤が液状化しやすいケースでは小さい加振加速度から浮上がりが徐々に生じ、液状化しにくいケースではある加振加速度で突然大きな浮上がりが生じた。

原地盤が液状化しやすいケースは、埋戻し部下方では原地盤側から埋戻し部へ、埋戻し部上方では埋戻し部から原地盤側へ砂が移動し、地表面は相対的に盛り上がった。一方、原地盤が液状化しにくいケースでは、ほとんど埋戻し部のみで砂の移動が生じ、地表面は埋戻し部が相対的に沈下した。浮上がりが生じるためには砂が管渠の下方へ回り込む必要があり、従って砂の回り込みを防ぐことにより、浮上がり量を低減させることが可能であると考えられる。

原地盤の密度の違いにより地盤および管渠模型の応答加速度は異なり、原地盤が液状化しやすい場合は、地盤および管渠模型の応答加速度振幅は一旦増大した後減少する傾向が見られたが、原地盤が液状化しにくい場合は入力加速度とほぼ同様の応答加速度であった。これらより、地盤が液状化するときに浮き上がりやすいのは、原地盤が浮き上がった管渠の下部に回り込みやすいことに加え、応答加速度が増幅することによる効果も働いていると考えられる。

(2)　埋戻し部の深さの影響

埋戻し部が深い場合、管渠下方の地盤が変形し浮き上がり量も大きかった。これは浮上がりに伴う管渠下部への砂の周り込みが、埋戻し部が深い方が容易となるためと考えられる。

(3)　管径、マンホールの影響

管渠付きマンホール模型では、原地盤が液状化した場合の方が浮き上がり量が大きく、原地盤部の下方あるいは全体が埋戻し部を押し込む形で地盤が変形した。浮き上がったマンホールの下には管渠側の埋戻し部の回り込みが生じ、いずれのケースも浮上がり量は管渠のみのケースよりもきわめて大きかった。また、原地盤が液状化した場合でマンホール下部の原地盤の密度が高い場合の浮上がり量は、下部の原地盤の密度が低い場合よりも、小さくなる傾向が見られた。

管渠模型については、管径が大きく見かけの比重が小さいケースの方が浮き上がり量が大きかった。

(4)　基礎の影響

はしご胴木基礎のあるケースでも、基礎のないケースと同程度かそれ以上の浮上がりが生じた。ただし

実験結果は、土槽の側壁によるせん断変形の拘束の有無の影響を受けていた可能性がある。

コンクリート基礎を用いた場合は浮上がりは生じず、逆に沈下する傾向にあった。管渠の見かけの比重を増すことで浮き上がりは生じないことがわかった。

(5) 対策工の適用性

1）砕石による埋戻し

実験（その2）において、埋戻し部の上部を砕石で埋め戻したケースでは下部の砂が液状化することによって浮上がりが生じたが、実験（その3）においては埋戻し部上部を砕石で埋め戻した場合は浮上がりは生じなかった。これらの差は、クッション砂層厚の影響かあるいは埋戻しに用いた砕石の粒度による影響かは断定できない。

砕石埋戻しの位置の違いついて、埋戻し部上部を埋め戻した場合、および埋戻し部全面を埋め戻した場合は浮上がりは生じず、埋戻し部下部を砕石で埋め戻した場合は浮上がりが生じた。

埋戻し部下部の砕石埋戻しで、管渠の浮上がりが生じたケースの地盤の変形は、下部の砕石部分においては管渠の浮上がりに伴う地盤の変状はあまり生じず、埋戻し部上部の硅砂部分は管渠の浮上がりに伴う管渠下方への原地盤の回り込み、および埋戻し部上方の盛り上がりが見られた。また、埋戻し部下部を砕石で埋め戻したケースにおいては噴砂が確認された。砕石による埋戻し部は変形を抑制する効果があり、また、埋戻し部上部を砕石で埋め戻した場合埋戻し部下部の変形も抑制する効果があった。

従って、埋戻し部上部および埋戻し部全面の砕石による埋戻しは、砕石による過剰間隙水圧の消散効果および砕石の剛性により、今回の条件の範囲では地盤の液状化時の管渠の浮上がり対策として効果があり、埋戻し部下部のみの砕石埋戻しでは浮き上がり対策としての効果はないということがわかった。

2）安定処理土

硅砂と超微粒子セメントを1：0.03の重量比で配合した安定処理土による埋戻しを用いたケースでは浮上がりは生じなかった。

(6) 浮上がり安全率

浮上がりの生じたケースでは、浮上がり安全率Fuが0.9～1.0程度に低下すると浮上がり始め、沈下の生じたケースにおいても、浮上がり安全率Fuが1.0以下に低下すると加振中の沈下が生じた。同一のケースでは最小安全率が小さくなるほど最終浮上がり量が大きくなる傾向が見られた。

以上より、浮上がり安全率により、浮上がりまたは加振中の沈下の有無は判断することができるが、浮上がり量に関しては定量的に推定することは困難であると考えられる。

6.2 今後の課題

本検討の内容に関連する今後の課題として、以下の点が上げられる。

(1) 下水道管渠の液状化時浮上がりに及ぼす埋戻し材の粒度および締固め度の影響についての検討。

(2) 下水道管渠の液状化時浮上がり対策として、砕石埋戻しの標準仕様を定める。

(3) 安定処理土、およびコンクリート基礎の液状化時浮き上がり対策としての標準仕様を定める。

(4) 浮上がり安全率の計算においての許容安全率、および設計地震力に関する検討。

(5) 大地震時の安定性評価法として、変位を考慮した評価法に関する検討。

(6) 処理場・ポンプ場等の地中面状構造物に対する液状化時の浮上がり安定性の評価法、および対策工法に関する検討。

(7) 側方流動対策に関する検討。

〈参考文献〉

1）谷口栄一、森下義：1983年日本海中部地震による地中構造物の浮上がりの被害、土木研究所資料第2235号、1985.

2）建設省土木研究所：平成5年（1993年）釧路沖地震災害調査報告、土木研究所報告第193号、1994.

3）田中修司、塩路勝久、大塚久哲、二宮嘉郎、松尾修、古関潤一：釧路沖地震により浮上した下水道マンホールの調査、土木研究所資料第3275号、1994.

4）土木研究所第一次調査団：平成6年北海道東方沖地震被害調査速報、土木技術資料，Vol.37、No.1、pp.20－27、1995.

5）田中修司、榊原隆：北海道東方沖地震下水道施設被害調査報告、下水道協会誌、Vol.32、No.380、1995. 1.

6）田中修司：地盤液状化時の下水道管きょの被害特性、月刊下水道、Vol.18、No.12、1995.

7）㈳日本道路協会：共同溝設計指針、1987. 8

8）㈳日本下水道協会：下水道施設地震対策指針と解説－1981年版－、1981.

9）建設省土木研究所：平成7年兵庫県南部地震土木研究所被害調査速報、土木研究所資料第3362号、1995.

10）建設省土木研究所：平成7年（1995年）兵庫県南部地震災害調査報告、土木研究所報告第196号、1996.

11）下水道地震対策技術調査検討委員会：下水道の地震対策についての最終提言、下水道協会誌、Vol.33、No.404、1996.

12）古賀泰之、古関潤一、谷口栄一、森下義、鷲田修三：掘割道路の地震時安定性に関する実験報告書、土木研究所資料第2550号、1988.

13）古関潤一、松尾修、林裕士、高橋晃浩：共同溝の地震時浮上がりに関する模型振動台実験及び有限要素解析、第9回日本地震工学シンポジウム、1994.

14）古関潤一、松尾修、林裕士、高橋晃浩：共同溝の地震時浮上がりに関する遠心模型実験及び振動台実験、土木学会第49回年次学術講演会、1994.

15）古関潤一、松尾修：共同溝の地震時浮上がり安定性の簡易評価法に関する検討、第30回土質工学研究発表会、1995.

16）安田進、岩田隆、永瀬英生、板藤繁：液状化による埋設管の浮上がりに関する振動台実験，第29回土質工学研究発表会、pp.919－920、1994.

17）板藤繁、安田進、増田民夫、永瀬英生、澤田尚：埋戻し部の液状化による地中構造物の浮上がりに関する振動台実験、土木学会第49回年次学術講演会 Ⅲ、pp.594－595、1994.

18）安田進、永瀬英生、板藤繁、本田直樹：地中構造物の浮上がりに伴う液状化砂の回り込みに関する振動台実験、第30回土質工学研究発表会、pp.1043－1044、1995.

19）板藤繁、安田進、増田民夫、永瀬英生、本田直樹：地中構造物の簡易な浮上がり対策工に関する振動台実験、土木学会第50回年次学術講演会 Ⅲ、pp.564－565、1995.

20）Nagase, H., Yanagihata, T., and Matsumoto, H. : Shaking table tests on floatation of

buried pipes in backfilled sand layer reinforced with geotextiles. Proc. International Symposium on Earth Reinforcement, Fukuoka, Japan, pp. 623－628. 1996.

21) 平野勇、東世司美、青山竜二、藤井斉昭：遠心模型による大口径埋設管の地震時挙動、農業土木学会誌、第63号、第２号、pp. 167－172、1995.

22) 平野勇、東世司美、青山竜二、池田淳、藤井斉昭：遠心模型実験による埋設管渠の動的挙動（その１）、土木学会第50回年次学術講演会　Ⅲ、pp. 540－541、1995.

23) 平野勇、東世司美、青山竜二、池田淳、藤井斉昭：遠心模型実験による埋設管渠の動的挙動（その２）、土木学会第50回年次学術講演会　Ⅲ、pp. 542－543、1995.

24) Nishio, N. : Mechanism of projection of sewerage manholes above ground due to soil liquefaction, Structural Eng. ／Earthquake Eng., JSCE, Vol. 11, №3, pp. 145－148, 1994.

25) 吉見吉昭、玉置克之、森信夫、近藤司：止水壁を用いた地中構造物の浮上がり防止策、地盤の液状化対策に関するシンポジウム発表論文集、土質工学会、pp. 263－268. 1991.

26) Yoshimi, Y., Tamaoki, K., Mori, N. and Kondo, T. : Protection of buried structures from soil liquefaction hazard by means of cutoff walls, Proc. 10th World Conference on Earthquake Engineering., Rotterdam, pp. 1485－1490, 1992.

27) Yoshimi, Y. : Simplified design if lifelines buried in liquefiable soil, Proc., 6 th U. S. －Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures Against Soil Liquefaction., NCEER／ADEP, pp. 1 － 6. 1996.

28) 建設省土木研究所：下水道管渠埋戻し土の動的三軸試験業務、1996.

管路施設の地震時浮上がりに
関する模型振動実験

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3486号
平成9年2月 (1997)

松尾 修、古関 潤一
佐々木哲也、近藤 浩市
林 裕士

要旨： 下水道管渠およびマンホールの地震時の挙動とその評価法を明らかにすることを目的として模型振動台実験を実施し、浮上がり安定性に及ぼす原地盤密度・埋戻し材料・基礎の形式等の影響について検討するとともに、浮上がり対策工としての砕石埋戻し・安定処理土による埋戻しの効果について検討した。さらに、浮上がり安定性評価手法としての浮上がり安全率の適用性について検討を行った。

キーワード：液状化、管路施設、浮上がり、埋戻し、振動台、浮上がり安全率

郵便はがき

50円切手をはって下さい

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地
建設省土木研究所
耐震技術研究センター・動土質研究室 行

No.

No.

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第 3486 号　　部

上記のとおり受領しました。

所　　属(住所)

氏　名　　印

土木研究所資料第 3486 号