ＩＳＳＮ　0386 － 5878
土木研究所資料第 4028 号

土 木 研 究 所 資 料

直接基礎の地震時応答に関する振動台実験

平成19年2月

独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ　基礎チーム

Copyright © (2007) 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 Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事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、独立行政法人土木研究所理事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4028号　2007年2月

直接基礎の地震時応答に関する振動台実験

構造物研究グループ　グループ長　福井　次郎[1)]
構造物研究グループ(基礎)　上席研究員　中谷　昌一
主任研究員　白戸　真大
研　究　員　河野　哲也
研　究　員　野々村佳哲
交流研究員　浅井　隆一[2)]
交流研究員　齋藤　隆[3)]

1) 平成16年3月まで構造物研究グループ(基礎)上席研究員
2) 交流研究員在職期間：平成15年4月～平成17年3月
3) 交流研究員在職期間：平成17年4月～

要　旨

浅い基礎に対して大規模地震時に生じ得る動的非線形応答および残留変位を直接的に評価し，耐震性を照査する耐震設計法の確立が求められている．これまで，筆者らは直接基礎の地震時残留変位予測手法を開発する目的で直接基礎模型の静的繰返し載荷実験を行っている．本研究では，より地震時に近い動的な載荷状態における直接基礎の挙動を把握するために，直接基礎模型を用いた振動台実験を行ったので，その結果を報告する．

キーワード：直接基礎，耐震設計，残留変位，振動台実験

目次

1. はじめに **1**

2. 実験概要 **2**

2.1 実験概要 2
2.2 三次元大型振動台およびせん断土槽 3
2.3 地盤材料 5
2.4 実験模型 7
2.5 2方向ロードセル 16
2.6 計測項目 21
2.7 実験ケースと振動台への入力波 28
2.8 実験手順 34
2.9 地盤作成方法 36
2.10 原位置での地盤調査 40
2.10.1 サウンディング 40
2.10.2 地表面高さの計測方法 42
2.10.3 S波速度測定方法 44
2.11 計測手順およびロードセルのデータ補正方法 46
2.12 変位の評価 51
2.12.1 加速度計測記録からの変位の評価 51
2.12.2 画像解析による変位の評価 62
2.12.3 Z軸周りの回転が水平挙動に与える影響の評価 64
2.13 画像解析データとその他の計測データとの同期 66

3. 実験結果 **72**

3.1 地盤作成結果 72
3.2 加振後の模型周辺地盤沈下量 72
3.3 サウンディング結果 73
3.4 S波速度計測結果 76
3.5 共振実験結果 77
3.6 加速度計測結果 79

3.6.1 振動台加速度時刻歴 79
3.6.2 地表面加速度時刻歴 83
3.6.3 模型の応答加速度時刻歴 86
3.6.4 地表面加速度記録の応答スペクトル 91
3.6.5 最大応答加速度分布 93
3.7 基礎底面作用力の時刻歴 96
3.8 基礎の変位の時刻歴 102
3.9 基礎底面接地幅の時刻歴 111
3.10 地盤の支持力 115
3.11 基礎底面作用力と変位の関係 122
3.11.1 画像解析データを用いて求めた M-θ_Y 関係 122
3.11.2 水平力 H-水平変位 u 関係 123
3.11.3 鉛直力 V-鉛直変位 v 関係 124
3.11.4 モーメント M-鉛直変位 v および水平力 H-鉛直変位 v 関係 126
3.12 基礎に生じる各変位の関係 133
3.13 加速度データを用いて求めたモーメント M に関する復元力特性 138
3.13.1 加速度データを用いて求めたモーメント M-回転角 θ 関係 138
3.13.2 M-θ_Y 関係に関する静的繰返し載荷実験および計算値との比較 140
3.13.3 基礎変位および地盤反力度分布のスナップショット 148
3.14 模型に生じる最大変位の推定法に関する考察 154
3.15 基礎に生じる残留変位性状とその推定法に関する考察 158
3.15.1 各加振における基礎の残留変位 158
3.15.2 地震力の規模と残留変位の関係 167
3.15.3 地震動による基礎の仕事量と残留変位量の関係 170
3.16 加振後の基礎周辺地盤高さ計測結果 172
3.17 転倒限界速度の検討 173

4. まとめ **175**

参考文献 **176**

資料 A CD-ROM 収録データ **178**
A.1 データファイル一覧 178
A.2 data 179
A.2.1 加速度計，2 方向ロードセル，変位計による計測データ 179
A.2.2 加速度計記録の 2 階積分による変位データ 180
A.2.3 計測荷重および画像解析による変位データ一覧 181

A.3 スペクトル 183
A.4 S 波計測記録 184
A.5 伝達関数 185

資料 B 計測器校正値一覧 **188**
B.1 加速度計 188
B.2 2 方向ロードセル 191
B.3 レーザー変位計 191

資料 C サウンディング試験結果 **192**

資料 D 地盤沈下量 **194**

図目次

2.1 三次元大型振動台およびせん断土槽概要図 4
2.2 豊浦砂粒度分布 5
2.3 豊浦砂の繰返し変形特性 (D_r=80%) 5
2.4 E_0 と σ_c' との関係 5
2.5 実験模型構造図 7
2.6 柱部構造図 10
2.7 慣性モーメント算出概念図 11
2.8 実験模型の質点系モデル化 15
2.9 2 方向ロードセル構造図 16
2.10 No.1 ロードセル鉛直成分検定結果 19
2.11 No.1 ロードセルせん断成分検定結果 19
2.12 振動台および地盤内計測器設置位置図 21
2.13 実験模型計測器設置位置図 22
2.14 スウィープ波 加速度波形 30
2.15 七峰橋波 (Type I 地震動) 加速度波形 30
2.16 神戸波 (Type II 地震動) 加速度波形 30
2.17 神戸波 (振幅 80%) (Type II 地震動) 加速度波形 30
2.18 七峰橋波 フーリエスペクトル 31
2.19 七峰橋波 加速度応答スペクトル 31
2.20 七峰橋波 速度応答スペクトル 31
2.21 神戸波 フーリエスペクトル 32
2.22 神戸波 加速度応答スペクトル 32
2.23 神戸波 速度応答スペクトル 32
2.24 神戸波 (振幅 80%) フーリエスペクトル 33
2.25 神戸波 (振幅 80%) 加速度応答スペクトル 33
2.26 神戸波 (振幅 80%) 速度応答スペクトル 33
2.27 Case 1-Step 4 実験手順 35
2.28 Case 1-Step 5 実験手順 35
2.29 地盤作成フロー図 37

2.30 地盤高さ計測点位置 (地盤作成時) 38
2.31 サウンディング位置図 41
2.32 土槽全体地盤高さ計測位置図 42
2.33 模型周辺地盤高さ計測位置図 43
2.34 S 波速度測定の概念図 45
2.35 計測手順フロー 47
2.36 模型設置データ (鉛直荷重) 48
2.37 ロードセルのゼロ補正 (その 2) 例 49
2.38 ロードセルのゼロ補正 (その 3)(計測データ全体に対して値 b を加える) 49
2.39 ロードセルのゼロ補正 (その 4)(計測データ全体に対して値 c を差し引く) 50
2.40 ロードセルのゼロ補正 (その 4)(計測データ全体に対して値 d を加える) 50
2.41 ロードセルのゼロ補正 (その 4) 後の確認 50
2.42 フィルター形状 51
2.43 加速度積分変位の確認 (振動台水平変位) 53
2.44 加速度積分変位の確認 (地盤水平変位) 54
2.45 加速度積分変位の確認 (模型天端水平変位) 55
2.46 加速度積分変位の確認 (基礎北側端部鉛直変位) 56
2.47 Case 1-Step 4 地表面加速度と地表面直下 (20 cm 下) 加速度の比較 (西側計測値) 58
2.48 Case 1-Step 4 地表面加速度と地表面直下 (20 cm 下) 加速度の比較 (東側計測値) 58
2.49 基礎変位の算出概念図 (X-Z 平面) 60
2.50 基礎回転角の算出概念図 (X-Y 平面) 61
2.51 Case 1, 標点位置 63
2.52 Case 2, 標点位置 63
2.53 Z 軸まわりの回転による X 軸方向加速度 64
2.54 画像解析と加速度 2 階積分により求められた模型天端中心位置の X 方向変位時刻歴 (Case 2-Step 2 の例) 67

3.1 オランダ式二重管コーン貫入試験結果 (Case 1) 74
3.2 オランダ式二重管コーン貫入試験結果 (Case 2) 75
3.3 加速度計位置模式図 78
3.4 振動台の X 方向の振動に対する地表面の X 方向振動の伝達関数 78
3.5 振動台の X 方向の振動に対する模型の X 方向振動の伝達関数 78
3.6 地表面の X 方向の振動に対する模型の X 方向振動の伝達関数 78
3.7 地表面の X 方向の振動に対する模型の Z 方向振動の伝達関数 78
3.8 Case 1-Step 1, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値) 80
3.9 Case 1-Step 2, 七峰橋波 (上段：設定値，下段：実測値) 80

3.10 Case 1-Step 3, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値) 80
3.11 Case 1-Step 4, 神戸波 (上段：設定値，下段：実測値) 81
3.12 Case 1-Step 5, 神戸波 (上段：設定値，下段：実測値) 81
3.13 Case 2-Step 1, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値) 81
3.14 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %) (上段：設定値，下段：実測値) 82
3.15 Case 2-Step 3, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値) 82
3.16 Case 1-Step 2, 七峰橋波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値) 83
3.17 Case 1-Step 4, 神戸波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値) 84
3.18 Case 1-Step 5, 神戸波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値) 84
3.19 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %) (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値) 85
3.20 角加速度算出方法の概念図 86
3.21 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M)，下段：基礎 (XF+025M)) 87
3.22 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M)，下段：基礎 (ZF+025M)) 87
3.23 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 角加速度時刻歴 87
3.24 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M)，下段：基礎 (XF+025M)) 88
3.25 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M)，下段：基礎 (ZF+025M)) 88
3.26 Case 1-Step 4, 神戸波, 角加速度時刻歴 88
3.27 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M)，下段：基礎 (XF+025M)) 89
3.28 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M)，下段：基礎 (ZF+025M)) 89
3.29 Case 1-Step 5, 神戸波, 角加速度時刻歴 89
3.30 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振方向加速度時刻歴 (上段:模型天端 (XF+075M)，下段：基礎 (XF+025M)) 90
3.31 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直方向加速度時刻歴 (上段:模型天端 (ZF+075M)，下段：基礎 (ZF+025M)) 90
3.32 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 角加速度時刻歴 90
3.33 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 地表面波加速度応答スペクトル 91
3.34 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 地表面波速度応答スペクトル 91
3.35 Case 1-Step 4, 神戸波, 地表面波加速度応答スペクトル 92
3.36 Case 1-Step 4, 神戸波, 地表面波速度応答スペクトル 92

3.37 Case 1-Step 5, 神戸波, 地表面波加速度応答スペクトル 92
3.38 Case 1-Step 5, 神戸波, 地表面波速度応答スペクトル 92
3.39 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 地表面波加速度応答スペクトル 92
3.40 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 地表面波速度応答スペクトル 92
3.41 加速度計位置図 93
3.42 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 最大応答加速度分布 94
3.43 Case 1-Step 4, 神戸波, 最大応答加速度分布 94
3.44 Case 1-Step 5, 神戸波, 最大応答加速度分布 95
3.45 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 最大応答加速度分布 95
3.46 基礎底面作用力算出法および符号 96
3.47 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直力 V の時刻歴 98
3.48 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平力 H の時刻歴 98
3.49 Case 1-Step 2, 七峰橋波, モーメント M の時刻歴 98
3.50 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直力 V の時刻歴 99
3.51 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平力 H の時刻歴 99
3.52 Case 1-Step 4, 神戸波, モーメント M の時刻歴 99
3.53 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直力 V の時刻歴 100
3.54 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平力 H の時刻歴 100
3.55 Case 1-Step 5, 神戸波, モーメント M の時刻歴 100
3.56 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直力 V の時刻歴 101
3.57 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平力 H の時刻歴 101
3.58 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), モーメント M の時刻歴 101
3.59 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分) 103
3.60 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分) 103
3.61 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分) 103
3.62 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分) 103
3.63 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理) 104
3.64 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理) 104
3.65 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理) 104
3.66 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理) 104
3.67 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分) 105
3.68 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分) 105
3.69 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分) 105
3.70 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Y 平面回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分) 105
3.71 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理) 106

3.72 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理) 106
3.73 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Z 平面回転角 θ の時刻歴 (画像解析処理) 106
3.74 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Y 平面回転角 θ の時刻歴 (画像解析処理) 106
3.75 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分) 107
3.76 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分) 107
3.77 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分) 107
3.78 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分) 107
3.79 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理) 108
3.80 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理) 108
3.81 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理) 108
3.82 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理) 108
3.83 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分) 109
3.84 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分) 109
3.85 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分) ... 109
3.86 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分) ... 109
3.87 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理) 110
3.88 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理) 110
3.89 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理) . 110
3.90 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Y 平面回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理) 110
3.91 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋) 112
3.92 Case 1-Step 4, 神戸波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋) 112
3.93 Case 1-Step 5, 神戸波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋) 113
3.94 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋) 113
3.95 Case 1-Step 1〜Step 3, 地盤反力度分布 114
3.96 Case 1-Step 4 および Step 5, 地盤反力度分布 114
3.97 Case 2-Step 1〜Step 3, 地盤反力度分布 114
3.98 *H-M-V* 支持力曲面概念図 116
3.99 支持力曲面上における μ, ψ の概念図 117
3.100 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値 118
3.101 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *M-V* 関係の実験値および *M-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図, 右：拡大図) 118
3.102 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *H-V* 関係の実験値および *H-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図, 右：拡大図) 118
3.103 Case 1-Step 4, 神戸波, *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値 119

3.104 Case 1-Step 4, 神戸波, M-V 関係の実験値および M-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 119
3.105 Case 1-Step 4, 神戸波, H-V 関係の実験値および H-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 119
3.106 Case 1-Step 5, 神戸波, H-M 関係の実験値および H-M 支持力曲線計算値 120
3.107 Case 1-Step 5, 神戸波, M-V 関係の実験値および M-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 120
3.108 Case 1-Step 5, 神戸波, H-V 関係の実験値および H-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 120
3.109 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), H-M 関係の実験値および H-M 支持力曲線計算値 121
3.110 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-V 関係の実験値および M-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 121
3.111 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), H-V 関係の実験値および H-V 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図) 121
3.112 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係 122
3.113 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係 122
3.114 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係 122
3.115 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係 122
3.116 Case 1-Step 2, 七峰橋波, H-u 関係 123
3.117 Case 1-Step 4, 神戸波, H-u 関係 123
3.118 Case 1-Step 5, 神戸波, H-u 関係 123
3.119 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), H-u 関係 123
3.120 Case 1-Step 2, 七峰橋波, V-v 関係 124
3.121 Case 1-Step 4, 神戸波, V-v 関係 124
3.122 Case 1-Step 5, 神戸波, V-v 関係 125
3.123 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), V-v 関係 125
3.124 Case 1-Step 2, 七峰橋波, V-v 関係拡大図 125
3.125 M-v または θ_Y-v 関係概念図 (弾性挙動) 127
3.126 M-v または θ_Y-v 関係概念図 (塑性化挙動) 127
3.127 静的載荷実験概要図 129
3.128 単調水平載荷パターン 129
3.129 交番水平載荷パターン (Type I) 129
3.130 交番水平載荷パターン (Type II) 129
3.131 静的水平載荷実験 M-v 関係 130
3.132 静的水平載荷実験 θ_Y-v 関係 130

3.133 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-v 関係 131
3.134 Case 1-Step 4, 神戸波, M-v 関係 131
3.135 Case 1-Step 5, 神戸波, M-v 関係 131
3.136 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-v 関係 131
3.137 Case 1-Step 2, 七峰橋波, H-v 関係 132
3.138 Case 1-Step 4, 神戸波, H-v 関係 132
3.139 Case 1-Step 5, 神戸波, H-v 関係 132
3.140 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), H-v 関係 132
3.141 Case 1-Step 2, 七峰橋波, θ_Y-v 関係 134
3.142 Case 1-Step 2, 七峰橋波, u-v 関係 134
3.143 Case 1-Step 2, 七峰橋波, θ_Y-u 関係 134
3.144 Case 1-Step 4, 神戸波, θ_Y-v 関係 135
3.145 Case 1-Step 4, 神戸波, u-v 関係 135
3.146 Case 1-Step 4, 神戸波, θ_Y-u 関係 135
3.147 Case 1-Step 5, 神戸波, θ_Y-v 関係 136
3.148 Case 1-Step 5, 神戸波, u-v 関係 136
3.149 Case 1-Step 5, 神戸波, θ_Y-u 関係 136
3.150 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), θ_Y-v 関係 137
3.151 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), u-v 関係 137
3.152 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), θ_Y-u 関係 137
3.153 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出) 138
3.154 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出) 139
3.155 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出) 139
3.156 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出) 139
3.157 交番載荷実験と振動台実験の地盤沈下量に関する概念図 143
3.158 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較 144
3.159 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲) 144
3.160 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近) 144
3.161 Case 1-Step 1, Sweep 波, M-θ_Y 関係の比較 144
3.162 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 145
3.163 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲) 145

3.164 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近) 145
3.165 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y(画像解析による変位) 関係の比較 (最大変位発生時付近) 145
3.166 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 146
3.167 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲) 146
3.168 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近) 146
3.169 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較 147
3.170 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲) 147
3.171 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近) 147
3.172 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係 149
3.173 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 模型変位および地盤反力度スナップショット 149
3.174 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係 150
3.175 Case 1-Step 4, 神戸波, 模型変位および地盤反力度スナップショット 150
3.176 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係 151
3.177 Case 1-Step 5, 神戸波, 模型変位および地盤反力度スナップショット 151
3.178 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係 152
3.179 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 模型変位および地盤反力度スナップショット 152
3.180 スナップショット変位算出概念図 153
3.181 最大水平変位 δ_{max}-PGA 関係 155
3.182 最大水平変位 δ_{max}-I_a 関係 155
3.183 最大水平変位 δ_{max}-S_A 関係 155
3.184 最大水平変位 δ_{max}-S_V 関係 155
3.185 エネルギー一定則概念図 157
3.186 残留鉛直変位の比較 158
3.187 残留水平変位の比較 158
3.188 残留回転角の比較 158
3.189 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前後基礎底面位置 160
3.190 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前後基礎 X-Y 平面位置 160
3.191 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前後基礎底面位置 161
3.192 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振前後基礎底面位置 163
3.193 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前後基礎底面位置 165
3.194 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前後基礎 X-Y 平面位置 165
3.195 最大回転角-残留鉛直変位関係 166
3.196 v_r-PGA 関係 167
3.197 v_r-I_a 関係 167
3.198 v_r-S_A 関係 167

3.199 v_r-S_V 関係 167
3.200 u_r-PGA 関係 168
3.201 u_r-I_a 関係 168
3.202 u_r-S_A 関係 168
3.203 u_r-S_V 関係 168
3.204 θ_{Yr}-PGA 関係 169
3.205 θ_{Yr}-I_a 関係 169
3.206 θ_{Yr}-S_A 関係 169
3.207 θ_{Yr}-S_V 関係 169
3.208 残留変位量-E_d 関係 (画像解析処理分変位使用) 171
3.209 Case 1, 加振後地盤コンタ図 172
3.210 Case 2, 加振後地盤コンタ図 172
3.211 転倒限界速度算出概念図 173
3.212 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 模型重心位置速度 174
3.213 Case 1-Step 4, 神戸波, 模型重心位置速度 174
3.214 Case 1-Step 5, 神戸波, 模型重心位置速度 174
3.215 Case 2-Step 2, 神戸波 (80 %), 模型重心位置速度 174

表目次

2.1 豊浦標準砂の物性的特性 6
2.2 D_r 算出に用いた最大・最小乾燥密度 6
2.3 模型各部材重量 13
2.4 模型重心および慣性モーメント 14
2.5 2 方向ロードセル検定結果 20
2.6 計測器一覧 23
2.6 計測器一覧 24
2.6 計測器一覧 25
2.7 データの収録周波数 27
2.8 実験ケース 28
2.9 実験手順 34
2.10 フィルター処理使用値 52
2.11 a_{x0} と a_X の比較 65
2.12 加速度積分変位と X-Z 平面画像解析処理変位の時刻差 (模型天端中心位置の X 方向変位) 69
2.13 加速度積分変位と X-Z 平面画像解析処理変位の時刻差 (模型基礎部北側端部の Z 方向変位) 70
2.14 X-Z 平面画像解析処理変位と X-Y 平面画像解析処理変位の時刻差 (模型天端中心位置の X 方向変位) 71
2.15 X-Z 平面画像と X-Y 平面画像の時刻シフト量 71

3.1 地盤作成結果 72
3.2 加振後模型周辺地盤沈下量 72
3.3 S 波速度計測結果 76
3.4 設定加速度と振動台計測加速度の最大・最小値 79
3.5 支持力曲面算出時刻および作用荷重 116
3.6 浮上りを考慮した M-θ_Y 関係計算諸元 141
3.7 回転ばね係数より算出される模型の固有振動数 141
3.8 各加振における地表面最大加速度 (PGA) 154
3.9 各加振ケースの I_a, S_A, S_V 155

3.10 エネルギー一定則により推定した応答回転角と最大回転角との比較 157
3.11 残留変位 (画像解析処理および実測値) 158
3.12 E_d, $\dot{E}_{du}$, $E_{d\theta_Y}$ 計算結果 171
3.13 限界転倒速度に用いた算出諸元 173

A.1 計測データ一覧 179
A.2 計測データファイル様式例 179
A.3 加速度の 2 階積分による変位データ一覧 180
A.4 加速度の 2 階積分による変位データファイル様式例 180
A.5 計測荷重と画像解析処理変位の同期補正データファイル一覧 181
A.6 同期補正データファイル様式例 182
A.7 スペクトルデータファイル一覧 183
A.8 スペクトルデータファイル様式例 183
A.9 S 波計測記録データファイル一覧 184
A.10 S 波計測記録データファイル様式例 184
A.11 伝達関数データファイル一覧 (1/2) 185
A.11 伝達関数データファイル一覧 (2/2) 186
A.12 伝達関数データファイル様式例 187

B.1 加速度計校正値一覧 (1/2) 189
B.1 加速度計校正値一覧 (2/2) 190
B.2 2 方向ロードセル校正値一覧 191
B.3 レーザー変位計校正値一覧 191

C.1 サウンディング試験結果 (Case 1) 193
C.2 サウンディング試験結果 (Case 2) 193

D.1 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 1)(1/2) 195
D.1 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 1) (2/2) 196
D.2 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 2) (1/2) 197
D.2 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 2) (2/2) 198

写真目次

2.1 振動台実験状況 2
2.2 実験模型 8
2.3 2方向ロードセル 17
2.4 ロードセル検定状況 (鉛直成分) 18
2.5 ロードセル検定状況 (せん断成分) 18
2.6 コテ型バイブレータ 35
2.7 振動プレート 38
2.8 地盤材料 (豊浦標準砂) 投入状況 39
2.9 地盤締固め状況 (踏固め) 39
2.10 地盤締固め状況 39
2.11 地盤締固め状況 (表面仕上げ) 39
2.12 コテ型バイブレータによる締固め状況 39
2.13 コテ型バイブレータによる締固め状況 (模型付近) 39
2.14 サウンディング状況 (南西側) 40
2.15 地盤中の加速度計固定方法 57

3.1 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前 (X-Z 平面) 159
3.2 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振後 (X-Z 平面) 159
3.3 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前 (X-Y 平面) 159
3.4 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振後 (X-Y 平面) 159
3.5 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前 (X-Z 平面) 161
3.6 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振後 (X-Z 平面) 161
3.7 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前 (X-Y 平面) 161
3.8 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振後 (X-Y 平面) 161
3.9 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振前 (X-Z 平面) 162
3.10 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振後 (X-Z 平面) 162
3.11 Case 1-Step 5 加振前 (X-Y 平面) 162
3.12 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振後 (X-Y 平面) 162
3.13 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前 (X-Z 平面) 164
3.14 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振後 (X-Z 平面) 164

3.15 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前 (X-Y 平面) 164
3.16 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振後 (X-Y 平面) 164

1. はじめに

直接基礎の耐震性能の照査において，道路橋示方書[1]に示される耐震設計上の安全性・供用性を評価するためには動的に変動する地震時荷重の影響を直接考慮して，転倒に対する安定性を照査し，さらに地震時残留変位量を直接的に評価する直接基礎の耐震設計法の確立が必要である．そこで土木研究所基礎チームでは，直接基礎模型を用いた静的な繰返し水平載荷実験[5]を行い，以下のことを確認している．

- 地震力による，わずかな回転変位に対し基礎の浮上りが生じる．
- 鉛直荷重 V が一定であっても地震力による H，M の連成により残留水平変位や残留回転角だけではなく残留鉛直変位も生じる．
- 地震時の残留鉛直変位量は地盤強度や載荷の繰返し回数に依存する．
- 残留回転角，残留水平変位は，荷重の作用方向に累積される．
- 残留変位は，V-H-M の比率に依存して変化する．

しかし，地盤・基礎ともに動的な地震荷重を受ける場合の基礎の支持力，挙動については静的な繰返し載荷実験では調べられない．そこで，本研究では，より実際の地震時に近い載荷状態での直接基礎の挙動および残留変位量を把握する目的で大型振動台を用いた加振実験を行った．

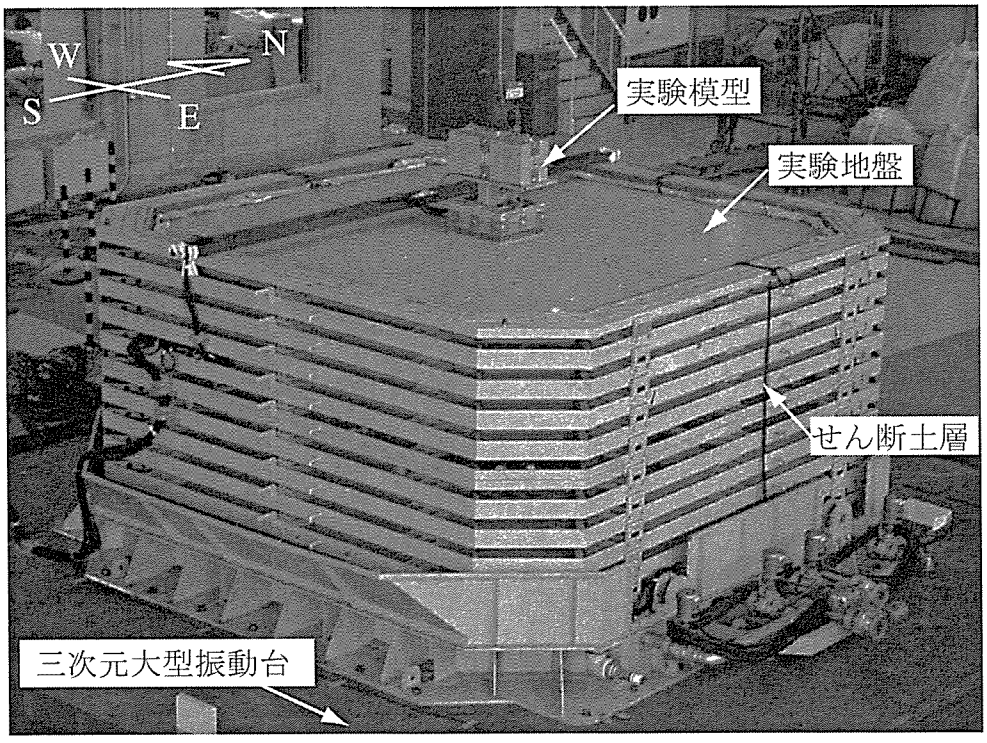
2. 実験概要

2.1 実験概要

本実験では，土木研究所振動台実験施設内の三次元大型振動台を使用した．土槽内寸法幅 4 m × 長さ 4 m × 高さ 2.1 m のせん断土槽を振動台上に設置した (写真–2.1)．せん断土槽内に厚さ 2 m の乾燥砂地盤を作成し，作成した地盤の上に，底面形状 0.5 m × 0.5 m，重心高さ 0.420 m，重量 8.385 kN の直接基礎模型を設置した．そして，振動台を加振した．振動台への入力波は，1993 年北海道南西沖地震七峰橋観測波と 1995 年兵庫県南部地震神戸気象台観測波である．振動台の加振方向は一方向で，南北方向である．

そして，加速度計記録およびビデオ画像記録を用いて地盤および基礎模型の挙動を，基礎底面のロードセルを用いて地盤の抵抗を観察した．

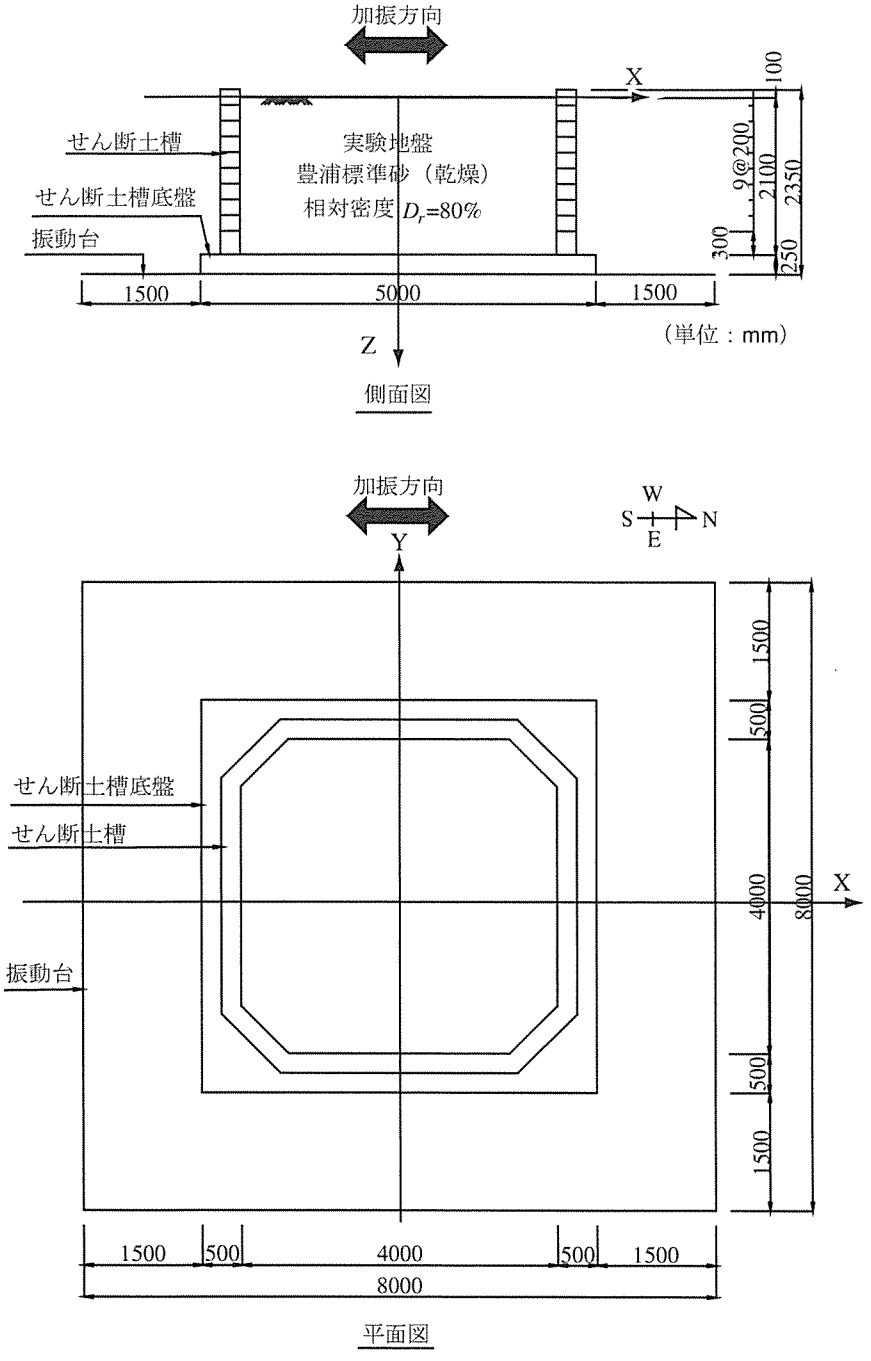
なお，重量は kg 単位で計測された値に 1 kgf = 9.807 N として N 単位に換算されたものである．その他の値についても必要に応じて重力加速度にはこの換算値を代入して求めた．



写真–2.1 振動台実験状況

2.2 三次元大型振動台およびせん断土槽

図–2.1 に，三次元大型振動台およびせん断土槽の諸元を示す．三次元大型振動台の平面寸法は 8 m × 8 m，最大搭載重量は 3000 kN である．振動台の加振能力は，最大水平加速度は 2 G，最大水平速度は 0.2 m/s，最大水平変位は 60 cm である．振動台は南北方向，東西方向，鉛直，および面内，面外の回転動の加振能力も有するが，先に述べたとおり，本実験では南北方向の一方向にのみ加振し，今回の実験ではその他の方向への加振を行っていない．せん断土槽は平面内空寸法 4 m × 4 m で，振動台上に設置したせん断土槽底盤上に，コーナー部を 0.5 m で隅切りした 8 角形の形状の鋼製フレームを積み重ねたものである．フレームは全部で 10 枚重ねられており，それぞれの高さと質量は，せん断土槽底盤と一体化したせん断土槽直上のフレームが 300 mm および 25.8 t，それ以外のフレームが 200 mm および 1.2 t であり，それらをあわせたせん断土槽の高さは 2.1 m である．せん断土槽の各フレーム間は南北，東西，鉛直方向のそれぞれにプラスマイナス 20 mm 相対変位可能な構造となっている．ここで，南から北への方向を X 方向，東から西への方向を Y 方向，鉛直方向下向きを Z 方向とし，それぞれの軸の原点は実験地盤表面と振動台及び実験地盤の中心を通る鉛直軸との交点である．なお，本実験では地盤の高さよりも最上段フレームの高さが高いので，最上段のフレームは自由振動する可能性があった．そこで，最上段のフレームとその下の段のフレーム間の相対変位が生じないように，両フレーム間を固定した．



図–2.1 三次元大型振動台およびせん断土槽概要図

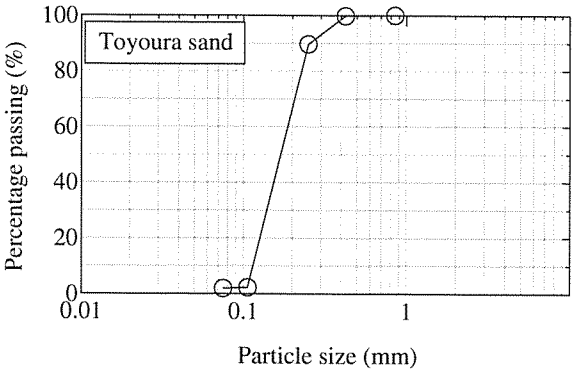
2.3 地盤材料

地盤材料は，気乾状態の豊浦標準砂である．土質試験結果を図–2.2，図–2.3 および表–2.1 に示す．これらの土質試験結果は，本実験終了後の 2005 年 3 月に行われたものである．

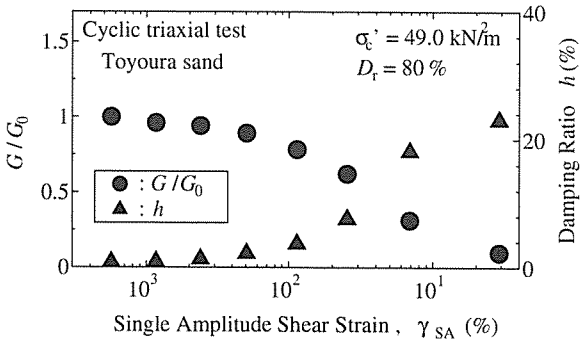
本実験における実験地盤の相対密度は，表–2.2 に示す 1999 年に行われた土質試験により得られた最大乾燥密度および最小乾燥密度を用いて算出された．相対密度 D_r=80 %に相当する地盤密度は，ρ=1.602 g/cm^3 である．また，図–2.4 より，初期弾性係数 E_0 は式 (2.1) で求められる．さらに，初期せん断弾性係数 G_0 は式 (2.2) で求められる．ここに，σ_c' (kN/m^2) は拘束圧であり，υ はポアソン比で 0.3 である．

$$E_0 = 34.915 \times \sigma_c'^{0.4436} \times 10^3 \quad \text{kN/m}^2 \tag{2.1}$$

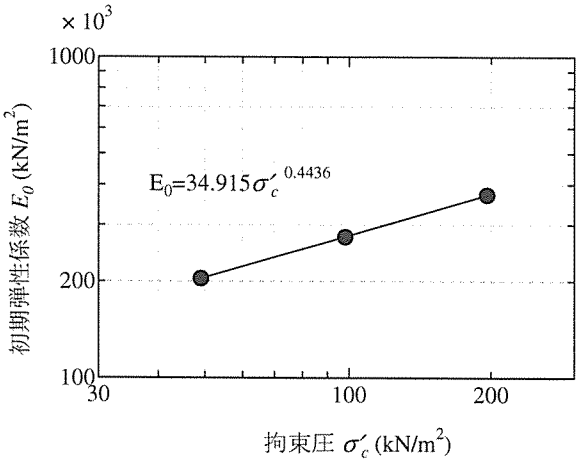
$$G_0 = E_0/2(1+\upsilon) \quad \text{kN/m}^2 \tag{2.2}$$



図–2.2 豊浦砂粒度分布



図–2.3 豊浦砂の繰返し変形特性 (D_r=80%)



図–2.4 E_0 と σ_c' との関係

表–2.1 豊浦標準砂の物性的特性

項目	記号	単位	試験値
比重	G_s	g/cm^3	2.655
最大粒径	–	mm	0.850
50%粒径	D_{50}	mm	0.170
30%粒径	D_{30}	mm	0.151
均等係数	U_c	–	1.4
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}$	g/cm^3	1.664
最小乾燥密度	$\rho_{d\min}$	g/cm^3	1.364
内部摩擦角 (D_r=80%)	ϕ	°	42.1*

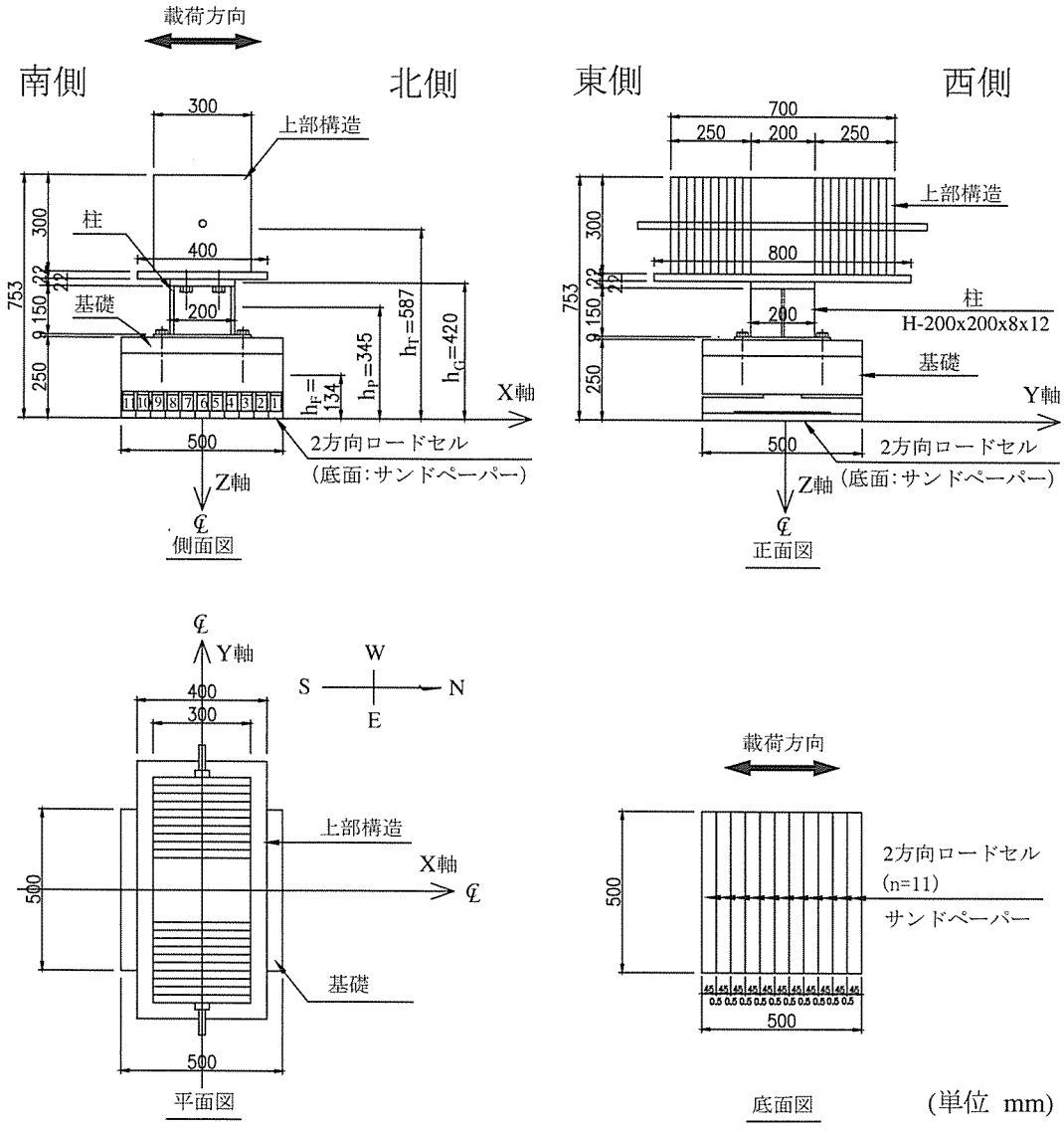
* 粘着力 c を c=0 kN/m^2 と仮定した上で求めた値.

表–2.2 D_r 算出に用いた最大・最小乾燥密度

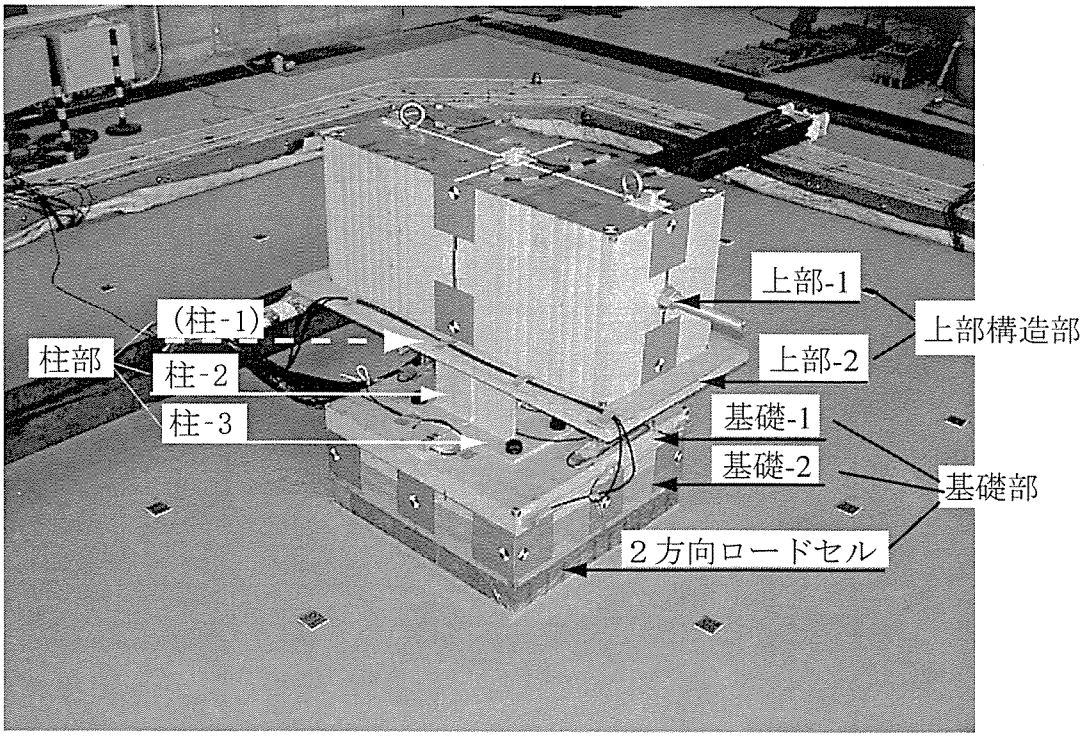
項目	記号	単位	試験値
最大乾燥密度	$\rho_{d\max}$	g/cm^3	1.671
最小乾燥密度	$\rho_{d\min}$	g/cm^3	1.376

2.4 実験模型

図–2.5，写真–2.2 に，実験に使用した模型の構造図および写真を示す．模型は鋼製で，基礎，柱，上部構造の 3 つの部位からなり，それぞれの部位は中心線に対して対称な形状をしている．基礎底面寸法は，0.5 m × 0.5 m，重心高さは 0.420 m，模型全重量は 8.385 kN である．図–2.5 に示すように，基礎下部には載荷面幅 0.5 m × 0.045 m の 2 方向ロードセルを載荷方向に 11 個並べて設置した．11 個のロードセルは，最も北側の No. 1 から最も南側の No. 11 まで順番に設置された．2 方向ロードセルの性能は「2.5 2 方向ロードセル」に後述する．2 方向ロードセルの底面 (地盤に接する面) にはサンドペーパー (60 番[2]) を貼り，地盤と基礎の境界条件が粗であるようにした．



図–2.5 実験模型構造図



写真–2.2 実験模型

(柱-1 は上部-2 の下にあるため，この写真では写っていない)

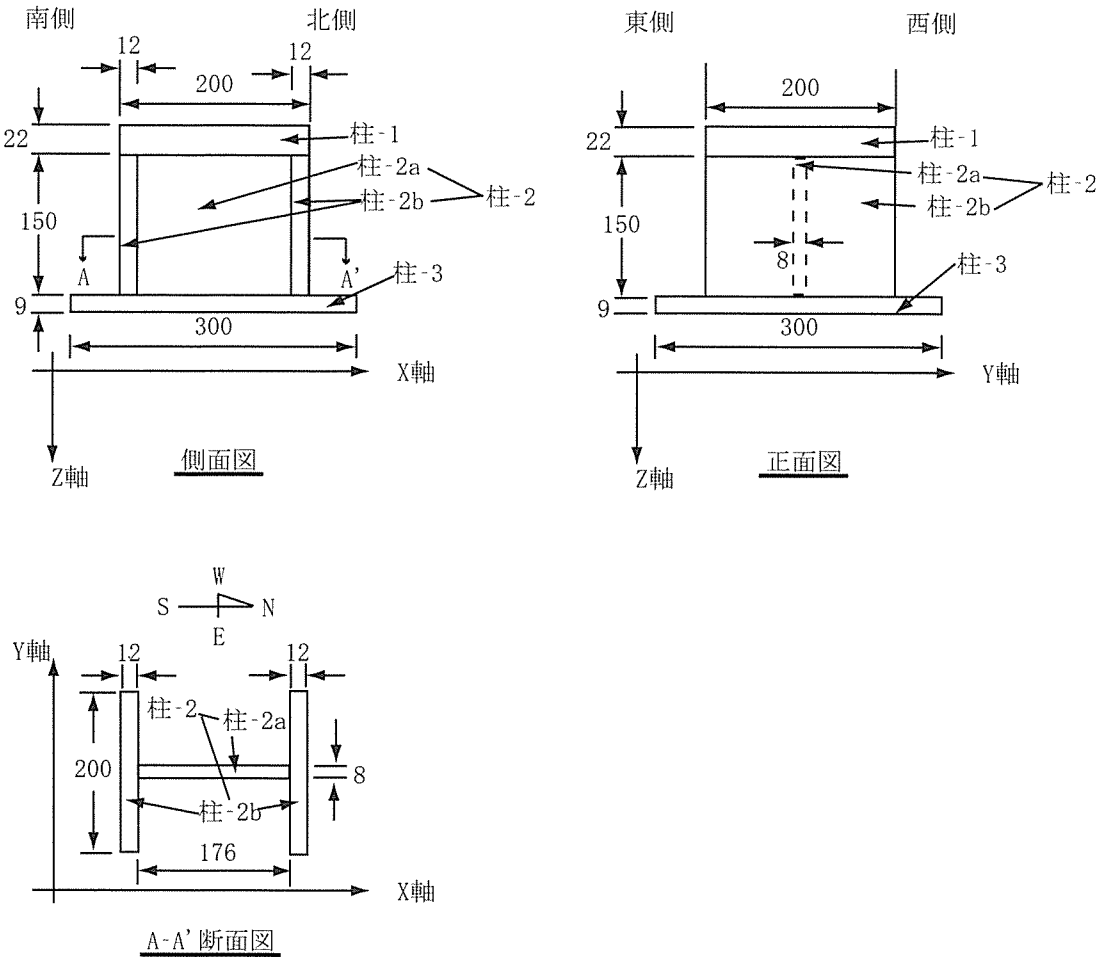
各部の重量および諸元を表–2.3，2.4 に示す．模型の重心位置および慣性モーメントの算出方法は以下の通りである．前述のように，模型は，上部構造部，柱部，基礎部 (2 方向ロードセルを含む) から構成される．さらに，表–2.3，写真–2.2 に示すように，上部構造部は重量部分 (上部-1) と重量部分を乗せるプレート部分 (上部-2) から，基礎部は厚さ 50 mm のプレート部分 (基礎-1)，中空の箱型部分 (基礎-2)，および 2 方向ロードセル部分から構成される．また，表–2.3，図–2.6 に示すように，柱部は H 型鋼部分 (柱-2) と，H 型鋼部分と上部構造部との間に設置される板部分 (柱-1)，H 型鋼部分と基礎部との間に設置される板部分 (柱-3) から構成される．分割された各部材の重心軸である y 軸まわりの回転慣性モーメント J_G は式 (2.3) により算出される．

$$J_G = \frac{m(a^2 + b^2)}{12} \tag{2.3}$$

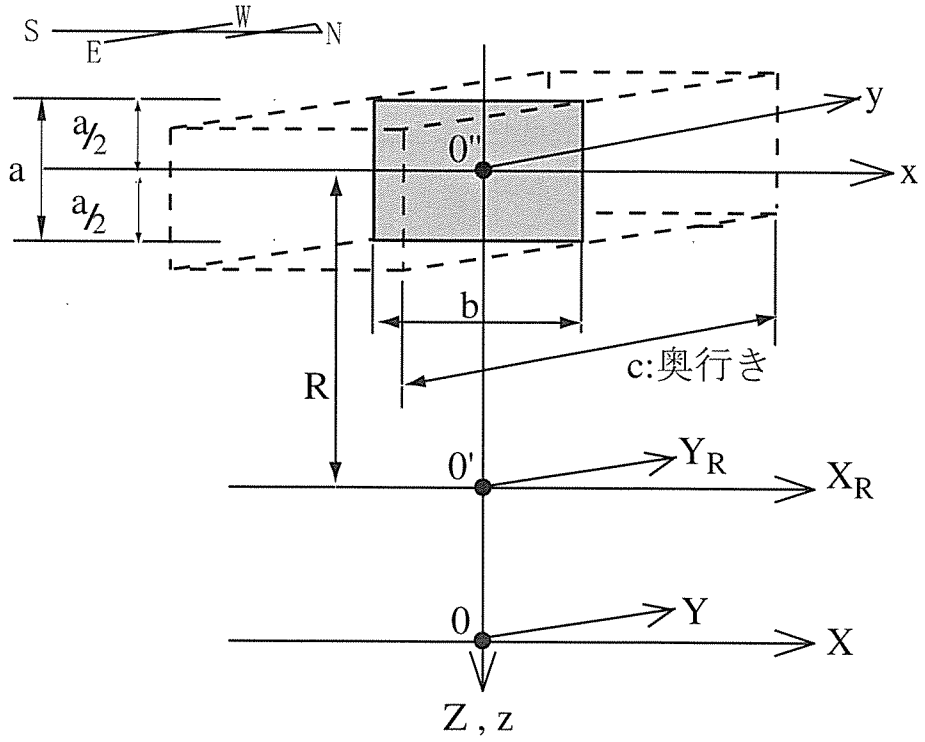
ここに，m は当該部材の質量，a および b は図–2.7 に示すように当該部材の側面 (X-Z 平面) 寸法であり，また，図–2.7 における x-y-z は，各部材重心位置に原点を有する局所座標系であり，全体座標系 X-Y-Z 座標系に平行である．J_G は次式により全体座標系の Y 軸に平行な任意の基準軸 Y_R 軸まわりの慣性モーメント J に変換される．

$$J = J_G + mR^2 \tag{2.4}$$

R は当該部材の重心 0" から Z 軸上の任意の点 0' までの距離である．


南側
北側
12
12
200
22
150
9
300
柱-1
柱-2a
柱-2b
柱-2
柱-3
A
A'
X軸
Z軸
側面図
東側
西側
200
22
150
8
9
300
柱-1
柱-2a
柱-2b
柱-2
柱-3
Y軸
Z軸
正面図
W
S
N
E
Y軸
12
12
柱-2
柱-2a
200
8
柱-2b
176
X軸
A-A' 断面図

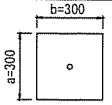
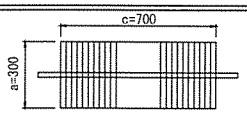
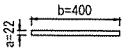
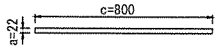
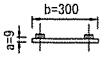
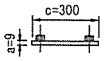
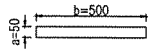
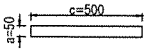
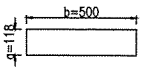
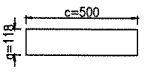
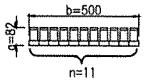
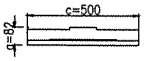
図–2.6 柱部構造図



図–2.7 慣性モーメント算出概念図

柱-2 はH型鋼部材であるため，慣性モーメントはその形状を考慮して計算する必要がある．そこで，柱-2 を2つの小部材 (柱-2a, 柱-2b) に分離してそれぞれの慣性モーメントを計算し，その和を柱-2 の慣性モーメントとした．図–2.6 に柱部の構造を示す．柱-2a は X-Z 平面に平行な厚さ 8 mm の部材であり，柱-2b は Y-Z 平面に平行な厚さ 12 mm の部材 (南側と北側にそれぞれ一つずつ) である．また，基礎-2 は中空の箱の中に補強鋼材を取り付けた構造であるため，柱-2 と同様にそれぞれの構成部材について慣性モーメントを算出し，その和を基礎-2 の慣性モーメントとした．

表–2.3 模型各部材重量

部位	部材 *1		側面図（東側面）	正面図（北側面）	重量 *2 (kN)			
上部構造	上部-1				4.688		5.227	8.385
	上部-2				0.539			
柱	柱-1				0.091		0.226	
	柱-2	柱-2a			0.016	*4 0.072		
		柱-2b			*3 0.028			
	柱-3				0.062			
基礎	基礎-1				0.961		2.932	
	基礎-2				0.863			
	2方向ロードセル				1.108			

*1: 部材の名称は写真–2.2，図–2.6 を参照.

*2: 各部材の重量は以下のように算出した.

上部-2 の重量は，体積に密度 (7850 kg/m^3) を乗じた値を単位換算した値.

上部-1 の重量は，計測した上部構造部重量より上部-2 の計算重量を差し引いた値.

柱-2a, 柱-2b，および柱-3 の重量は，それぞれの体積に密度 (7850 kg/m^3) を乗じた値を単位換算した値.

柱-1 の重量は，計測した柱部重量より柱-2a, 柱-2b，および柱-3 の計算重量を差し引いた値.

基礎-1 の重量は，体積に密度 (7850 kg/m^3) を乗じた値を単位換算した値.

2 方向ロードセルの重量は，計測した値.

基礎-2 の重量は，基礎部重量から基礎-1 および 2 方向ロードセル重量を差し引いた値.

*3: 柱-2b の 1 つあたりの重量.

*4: 柱-2a と 2 つの柱-2b の重量の和.

表–2.4 模型重心および慣性モーメント

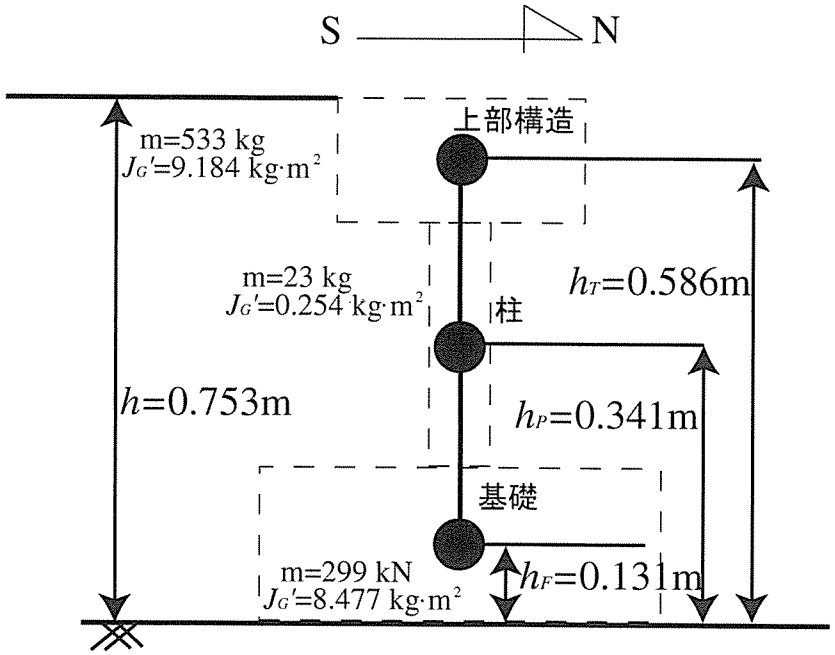
部位	部材		質量 m (kg)	形状寸法 a (m)	b (m)	c (m)	部材重心位置 (基礎底面より) (m)	部材重心軸回りの慣性モーメント J_G (kg·m^2)
上部構造	上部-1		478	0.300	0.300	0.700	0.603	7.170
	上部-2		55	0.022	0.400	0.800	0.442	0.736
柱	柱-1		9	0.022	0.200	0.200	0.420	0.031
	柱-2	柱-2a	2	0.150	0.012	0.200	0.334	0.007
		柱-2b*	3	0.181	0.200	0.200	0.334	0.005
	柱-3		6	0.181	0.200	0.200	0.255	0.048
基礎	基礎-1		98	0.050	0.500	0.500	0.225	2.062
	基礎-2		88	0.118	0.500	0.500	0.141	2.207
	2方向ロードセル		113	0.082	0.500	0.500	0.041	2.417

部位	部位重心位置 (基礎底面より) (m)	部位重心軸回りの慣性モーメント J'_G (kg·m^2)
上部構造	h_T=0.586	9.184
柱	h_P=0.341	0.254
基礎	h_F=0.131	8.477
模型全体	h_G=0.420	–

基礎重心位置から各部位重心位置までの距離 (m)	基礎重心軸回りの慣性モーメント J_0 (kg·m^2)	模型の重心軸回りの慣性モーメント J'_0 (kg·m^2)
0.456	119.843	23.864
0.210	1.266	0.400
0.000	8.477	33.569
0.279	129.585	57.833

*: 柱-2b の 1 つあたりの値.

表–2.4 より，実験模型の上部構造，柱，基礎を 3 質点系でモデル化すると図–2.8 のようになる．

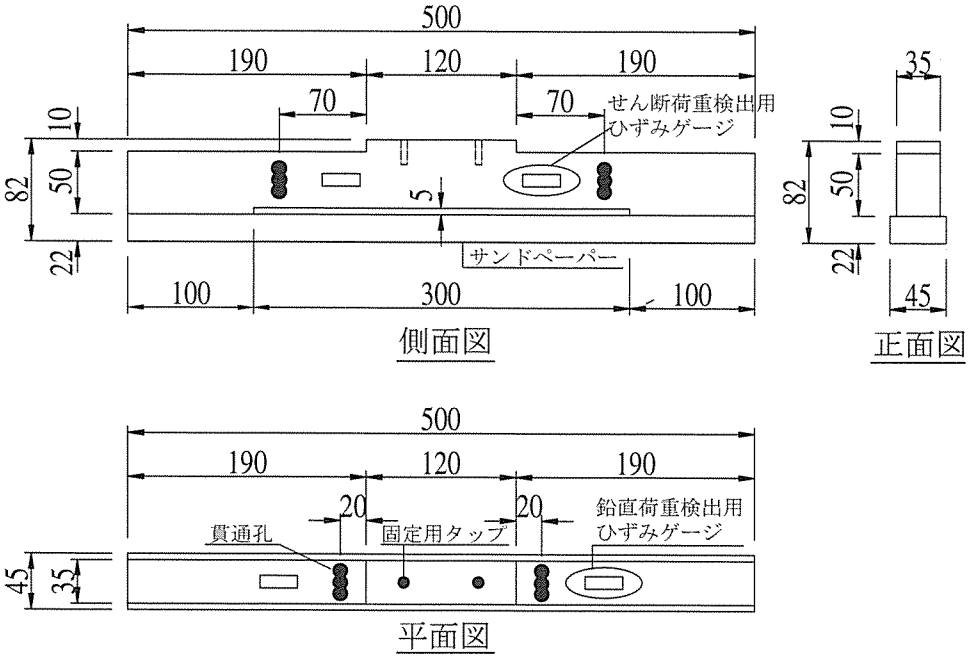


図–2.8 実験模型の質点系モデル化

2.5　2方向ロードセル

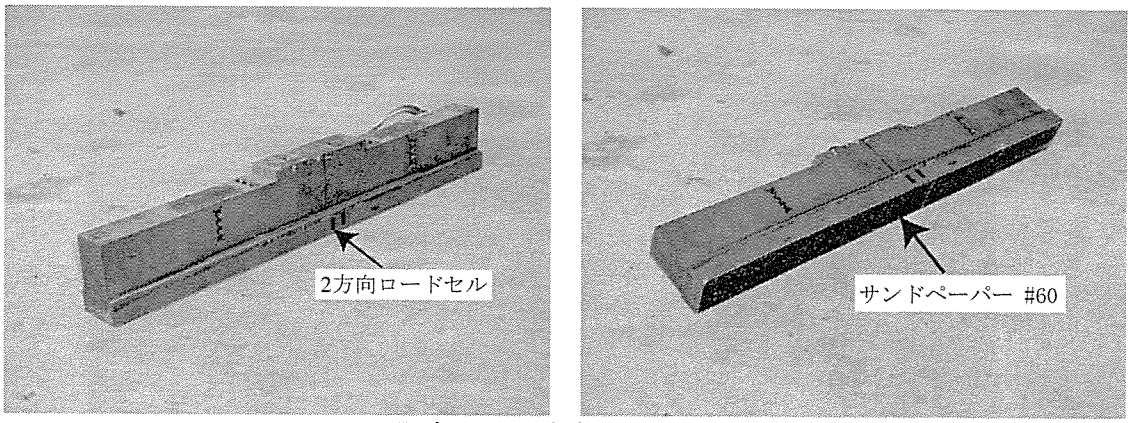
図–2.9 に基礎模型底面に設置した 2 方向ロードセルの構造図を示す．この 2 方向ロードセルには荷重の作用方向と直交する方向に貫通孔が空けられており，局所的に断面 2 次モーメントが小さくなるように設計されている．その薄肉部に集中するひずみを計測し，計測されたひずみからロードセルが受けている荷重を換算する．このロードセルは以下の特徴を有し，非常に精度のよいものである[3)4)5)]．

- 同時に 2 方向の荷重を計測できる．
- 一方の荷重が他方の荷重の計測値に与える干渉が非常に小さい．
- 繰返し荷重に対するヒステリシスがほとんどない．



図–2.9 2 方向ロードセル構造図

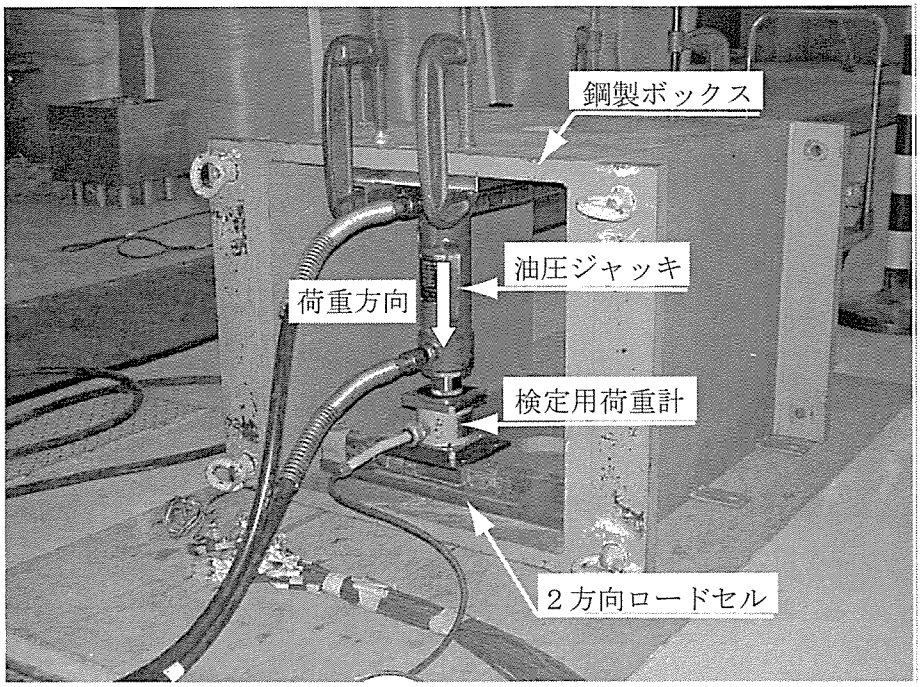
2 方向ロードセルの検定は以下の要領にて行われた．鉛直成分とせん断成分のそれぞれについて検定を行った．センサーによる計測では一般に配線ケーブルや計測装置内にて，もしくはそれらの接続点にて計測値を伝える信号が減衰することが考えられ，その減衰の影響は配線ケーブルが長いほど，大きく表れると考えられる．本実験では大型の振動台を用いているため，使用している配線ケーブルは非常に長い．そこで，検定は振動台実験に用いた配線ケーブル，計測装置などを用いて実験時と同じ状況で行われた．なお，2 方向ロードセルで計測されるひずみから換算される荷重の単位は kgf 単位であるが，本節以降に示す荷重計測値は 1 kgf = 9.80665 N として単位換算したものである．



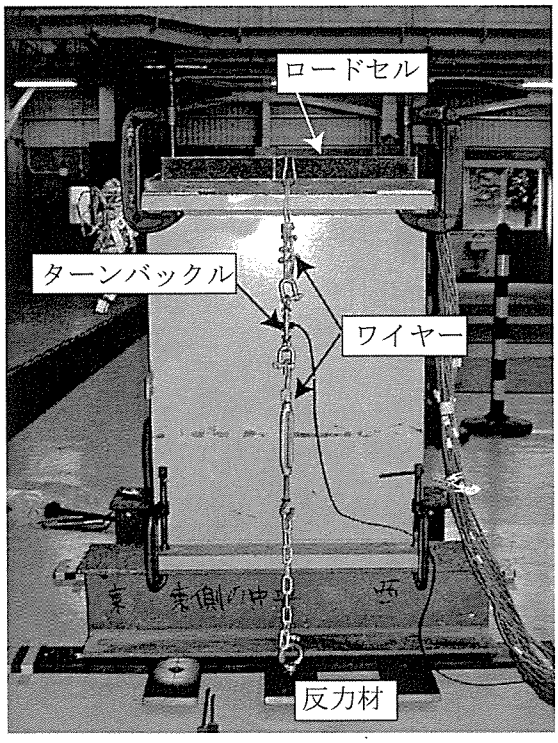
写真–2.3 2方向ロードセル

鉛直荷重に関するロードセルの検定状況を写真–2.4に示す．2方向ロードセルを水平面に設置し，油圧ジャッキを用いてロードセルを加圧する．1つのロードセルに関して2サイクルの載荷・除荷過程を与える．載荷過程では，最大9.807 kNまで圧縮荷重を与える．荷重が1.961 kNまでは0.245 kNピッチ，3.923 kNになるまで0.490 kNピッチ，その後最大9.807 kNになるまで1.961 kNピッチで圧縮荷重を増した．除荷過程では，載荷と逆の過程で0になるまで荷重を減じた．そして，2サイクルの間に収録された全データを1次式で回帰し，その勾配を校正値とした．

せん断荷重に関するロードセルの検定状況を写真–2.5に示す．重力方向の荷重が2方向ロードセルへのせん断荷重となるような向きに2方向ロードセルを固定した．そして鉛直下向きに2方向ロードセルへ荷重を載荷した．ロードセルと下方の反力材とを2本のワイヤーとターンバックルでつなぎ，2本のワイヤー間に設置されたターンバックルを締める，もしくは，解放することにより荷重を制御した．ロードセルの一方の側面を下向きにした状態で載荷・除荷過程を2サイクル，もう一方の側面を下向きにした状態で2サイクルの合計4サイクルの載荷・除荷を行った．載荷過程では，最大1.961 kNまでせん断荷重を与える．最大荷重に達するまで0.196 kNピッチで荷重を増した．除荷過程では，載荷と逆の過程で0になるまで荷重を減じた．そして，4サイクルの間に収録された全データを1次式で回帰し，その勾配を校正値とした．

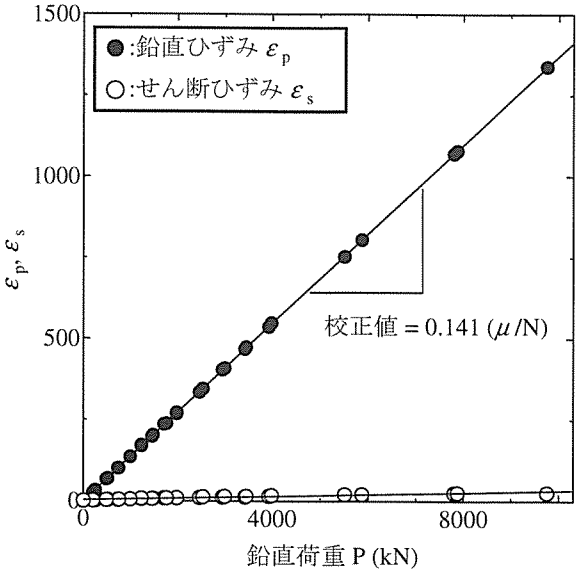


写真–2.4 ロードセル検定状況 (鉛直成分)

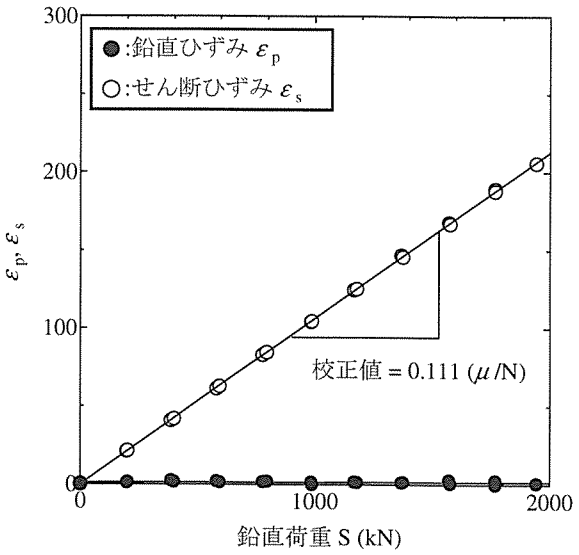


写真–2.5 ロードセル検定状況 (せん断成分)

図–2.10，2.11 にロードセル No. 1 の鉛直およびせん断荷重に関する検定結果を示す．表–2.5 に全ロードセルの検定結果の一覧を示す．ここで，P は鉛直成分検定時の鉛直荷重，S はせん断成分検定時のせん断荷重である．一方，$\varepsilon_p, \varepsilon_s$ は，鉛直成分のひずみ，せん断成分のひずみである．鉛直荷重，せん断荷重のいずれに関しても，繰返し載荷中に得られたデータは直線上に分布しており，ヒステリシスを描かない．また，鉛直・せん断ひずみの相互干渉 $(\varepsilon_s/\varepsilon_p, \varepsilon_p/\varepsilon_s)$ は無視できる程度であることがわかる．



図–2.10 No.1 ロードセル鉛直成分検定結果



図–2.11 No.1 ロードセルせん断成分検定結果

表–2.5 2方向ロードセル検定結果

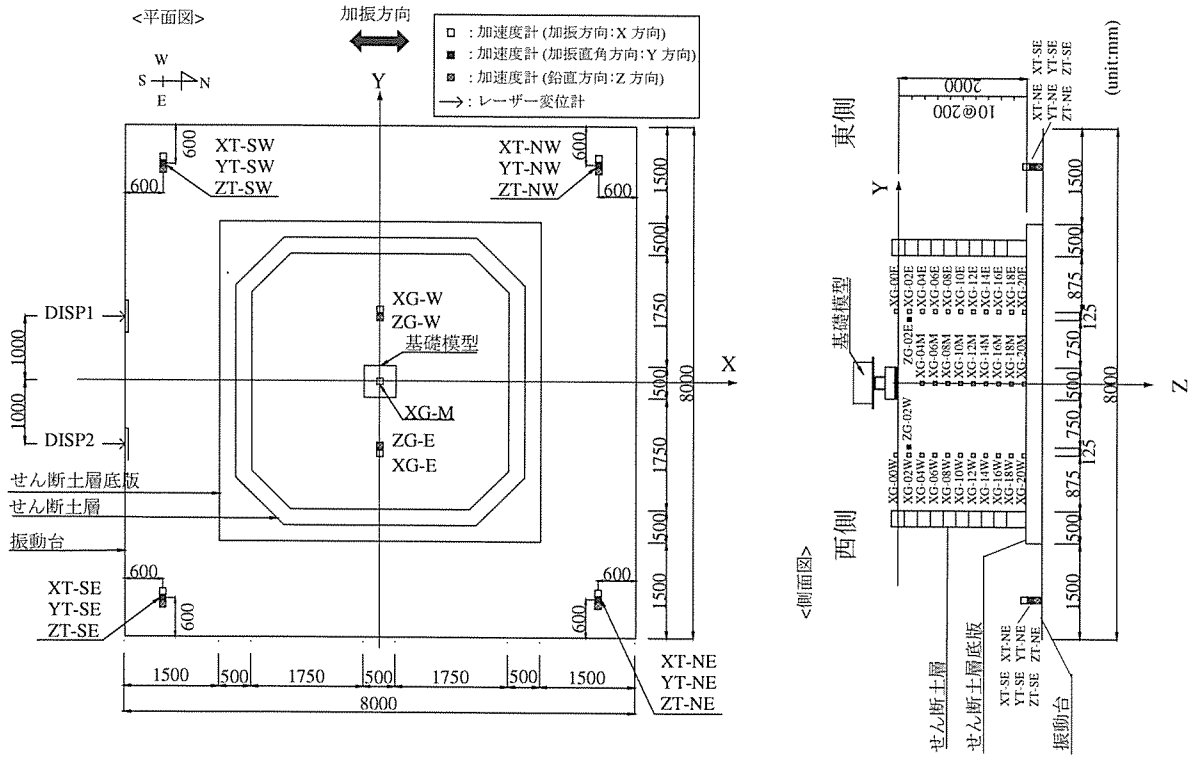
No	鉛直載荷			せん断載荷		
	ε_p/P (μ/N)	ε_s/P (μ/N)	鉛直荷重載荷時における $\varepsilon_s/\varepsilon_p$ (%)	ε_s/S (μ/N)	ε_p/S (μ/N)	せん断荷重載荷時における $\varepsilon_p/\varepsilon_s$ (%)
1	0.141	-5.204×10^{-3}	−3.691	0.111	2.152×10^{-3}	1.939
2	0.144	0.917×10^{-3}	0.637	0.108	6.367×10^{-3}	5.895
3	0.142	-1.806×10^{-3}	−1.272	0.113	2.373×10^{-3}	2.100
4	0.142	-2.143×10^{-3}	−1.509	0.110	2.012×10^{-3}	1.829
5	0.142	-1.010×10^{-3}	−0.711	0.108	2.653×10^{-3}	2.456
6	0.144	1.302×10^{-3}	9.068	0.110	3.980×10^{-3}	3.618
7	0.138	3.466×10^{-3}	2.512	0.116	3.154×10^{-3}	2.719
8	0.141	-1.111×10^{-3}	−0.788	0.112	3.715×10^{-3}	3.317
9	0.144	1.095×10^{-3}	0.760	0.110	3.328×10^{-3}	3.025
10	0.141	1.033×10^{-3}	0.733	0.111	2.631×10^{-3}	2.370
11	0.141	1.918×10^{-3}	1.360	0.108	2.987×10^{-3}	2.766

2.6 計測項目

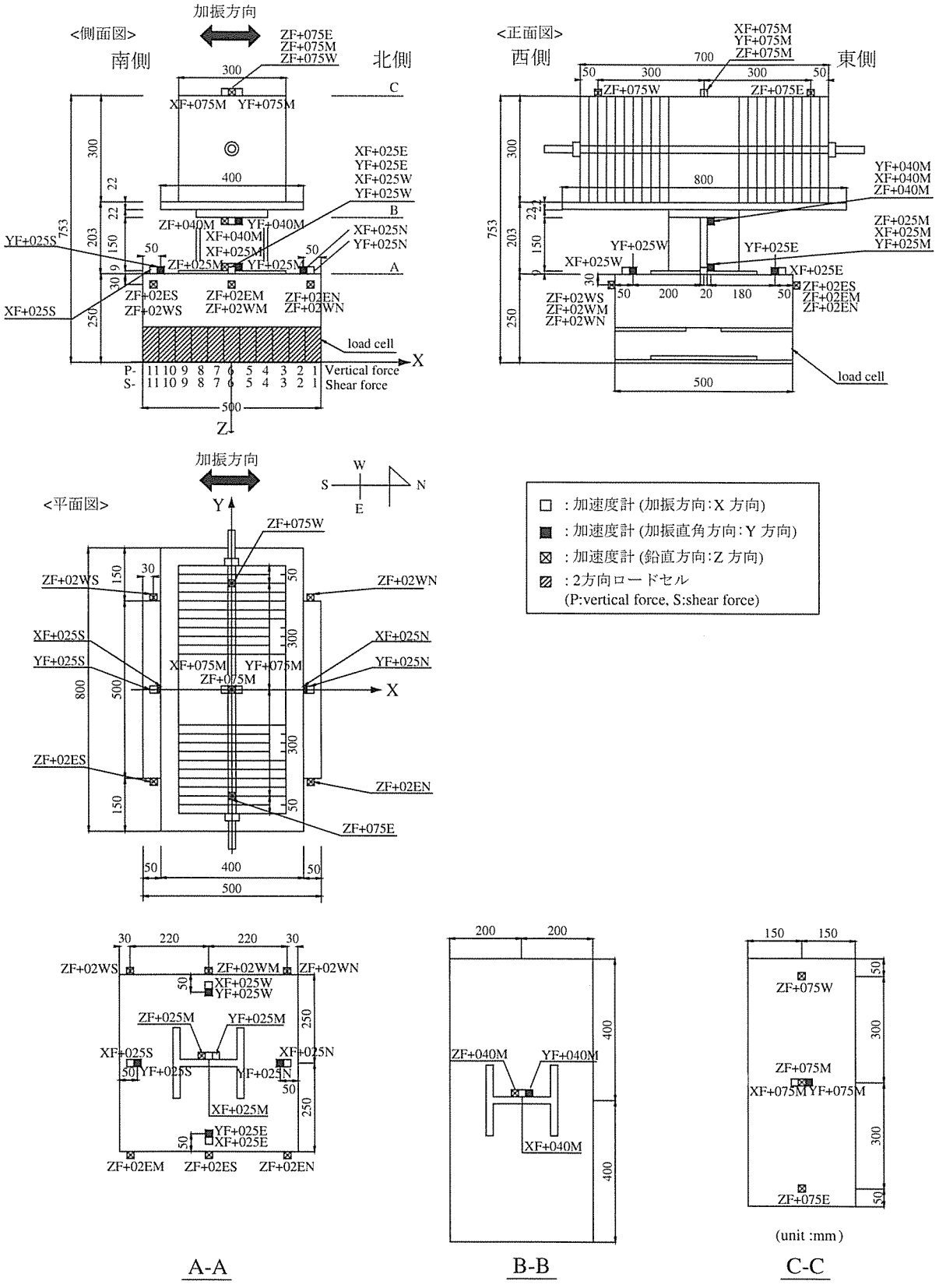
図–2.12 に振動台および地盤内に設置した計測器の位置を示す．図–2.13 に基礎模型に設置した計測器の位置を示す．図–2.12，2.13 の原点は，せん断土槽および模型の中心軸 (Z 軸) 上にあり，X-Y 平面は初期における地表面および模型基礎底面に一致する．

表–2.6 には計測項目と計測器の一覧を示す．ただし，「2.8 実験手順」に示すように，Case 1-Step 5 (Case, Step の定義は「2.7 実験ケースと振動台への入力波」 参照) においてのみ模型設置位置がその他の加振ケースとは異なっており，かつ模型設置位置直下の地盤中に設置していた Ch13 の XG-00W は撤去された．表–2.6 に示す計測器設置位置の X, Y, Z 座標は原点に対するそれらの相対位置を示す．

データ収録は三次元大型振動台実験施設内に付属する計測システムにより行った．サンプリング周波数とデータ計測継続時間は表–2.7 に示す通りである．加振直前に全ての計測器の設定をゼロクリアーし，計測を開始している．なお，計測手順の詳細については「2.11 計測手順およびロードセルのデータ補正方法」に後述する．



図–2.12 振動台および地盤内計測器設置位置図



図–2.13 実験模型計測器設置位置図

表–2.6 計測器一覧

Ch	計測器名	計測対象	計測項目	計測方向	計測器設置位置			正符号
					X (m)	Y (m)	Z (m)	
1	XT-NW	振動台	加速度	X 方向	3.440	3.440	2.000	北方向
2	XT-NE	振動台	加速度	X 方向	3.440	−3.440	2.000	北方向
3	XT-SW	振動台	加速度	X 方向	−3.440	3.440	2.000	北方向
4	XT-SE	振動台	加速度	X 方向	−3.440	−3.440	2.000	北方向
5	YT-NW	振動台	加速度	Y 方向	3.440	3.440	2.000	東方向
6	YT-NE	振動台	加速度	Y 方向	3.440	−3.440	2.000	東方向
7	YT-SW	振動台	加速度	Y 方向	−3.440	3.440	2.000	東方向
8	YT-SE	振動台	加速度	Y 方向	−3.440	−3.440	2.000	東方向
9	ZT-NW	振動台	加速度	Z 方向	3.440	3.440	2.000	下方向
10	ZT-NE	振動台	加速度	Z 方向	3.440	−3.440	2.000	下方向
11	ZT-SW	振動台	加速度	Z 方向	−3.440	3.440	2.000	下方向
12	ZT-SE	振動台	加速度	Z 方向	−3.440	−3.440	2.000	下方向
13	XG-00W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	0.000	北方向
14	XG-02W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	0.200	北方向
15	XG-04W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	0.400	北方向
16	XG-06W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	0.600	北方向
17	XG-08W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	0.800	北方向
18	XG-10W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	1.000	北方向
19	XG-12W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	1.200	北方向
20	XG-14W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	1.400	北方向
21	XG-16W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	1.600	北方向
22	XG-18W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	1.800	北方向
23	XG-20W	地盤	加速度	X 方向	0.000	1.125	2.000	北方向
24	XG-00E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	0.000	北方向
25	XG-02E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	0.200	北方向
26	XG-04E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	0.400	北方向
27	XG-06E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	0.600	北方向
28	XG-08E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	0.800	北方向
29	XG-10E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	1.000	北方向
30	XG-12E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	1.200	北方向
31	XG-14E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	1.400	北方向
32	XG-16E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	1.600	北方向

表–2.6 計測器一覧

Ch	計測器名	計測対象	計測項目	計測方向	計測器設置位置			正符号
					X (m)	Y (m)	Z (m)	
33	XG-18E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	1.800	北方向
34	XG-20E	地盤	加速度	X 方向	0.000	−1.125	2.000	北方向
35	XG-04M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	0.400	北方向
36	XG-06M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	0.600	北方向
37	XG-08M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	0.800	北方向
38	XG-10M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	1.000	北方向
39	XG-12M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	1.200	北方向
40	XG-14M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	1.400	北方向
41	XG-16M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	1.600	北方向
42	XG-18M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	1.800	北方向
43	XG-20M	地盤	加速度	X 方向	0.000	0.000	2.000	北方向
44	ZG-02W	地盤	加速度	Z 方向	0.000	−1.125	0.200	下方向
45	ZG-02E	地盤	加速度	Z 方向	0.000	1.125	0.200	下方向
46	XF+075M	基礎模型	加速度	X 方向	0.000	0.000	−0.753	北方向
47	XF+040M	基礎模型	加速度	X 方向	0.000	0.000	−0.409	北方向
48	XF+025M	基礎模型	加速度	X 方向	0.000	0.000	−0.250	北方向
49	XF+025N	基礎模型	加速度	X 方向	0.220	0.000	−0.250	北方向
50	XF+025S	基礎模型	加速度	X 方向	−0.220	0.000	−0.250	北方向
51	XF+025W	基礎模型	加速度	X 方向	0.000	0.200	−0.250	北方向
52	XF+025E	基礎模型	加速度	X 方向	0.000	−0.200	−0.250	北方向
53	YF+075M	基礎模型	加速度	Y 方向	0.000	0.000	−0.753	東方向
54	YF+040M	基礎模型	加速度	Y 方向	0.000	0.000	−0.409	東方向
55	YF+025M	基礎模型	加速度	Y 方向	0.000	0.000	−0.250	東方向
56	YF+025N	基礎模型	加速度	Y 方向	0.200	0.000	−0.250	東方向
57	YF+025S	基礎模型	加速度	Y 方向	−0.200	0.000	−0.250	東方向
58	YF+025W	基礎模型	加速度	Y 方向	0.000	0.200	−0.250	東方向
59	YF+025E	基礎模型	加速度	Y 方向	0.000	−0.200	−0.250	東方向
60	ZF+075M	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	0.000	−0.753	下方向
61	ZF+040M	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	0.000	−0.409	下方向
62	ZF+025M	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	0.000	−0.250	下方向
63	ZF+02WN	基礎模型	加速度	Z 方向	0.220	0.250	−0.250	下方向
64	ZF+02WM	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	0.250	−0.250	下方向

表–2.6 計測器一覧

Ch	計測器名	計測対象	計測項目	計測方向	計測器設置位置			正符号
					X (m)	Y (m)	Z (m)	
65	ZF+02WS	基礎模型	加速度	Z 方向	−0.200	0.250	−0.250	下方向
66	ZF+02EN	基礎模型	加速度	Z 方向	0.220	−0.250	−0.250	下方向
67	ZF+02EM	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	−0.250	−0.250	下方向
68	ZF+02ES	基礎模型	加速度	Z 方向	−0.220	−0.250	−0.250	下方向
69	ZF+075W	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	0.300	−0.753	下方向
70	ZF+075E	基礎模型	加速度	Z 方向	0.000	−0.300	−0.753	下方向
72	P-01	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.2275	0.000	0.000	圧縮
73	P-02	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.1820	0.000	0.000	圧縮
74	P-03	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.1365	0.000	0.000	圧縮
75	P-04	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.0910	0.000	0.000	圧縮
76	P-05	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.0455	0.000	0.000	圧縮
77	P-06	基礎底面	鉛直力	Z 方向	0.000	0.000	0.000	圧縮
78	P-07	基礎底面	鉛直力	Z 方向	−0.0455	0.000	0.000	圧縮
79	P-08	基礎底面	鉛直力	Z 方向	−0.0910	0.000	0.000	圧縮
80	P-09	基礎底面	鉛直力	Z 方向	−0.1365	0.000	0.000	圧縮
81	P-10	基礎底面	鉛直力	Z 方向	−0.1820	0.000	0.000	圧縮
82	P-11	基礎底面	鉛直力	Z 方向	−0.2275	0.000	0.000	圧縮
83	S-01	基礎底面	せん断力	X 方向	0.2275	0.000	0.000	北向き *
84	S-02	基礎底面	せん断力	X 方向	0.1820	0.000	0.000	北向き *
85	S-03	基礎底面	せん断力	X 方向	0.1365	0.000	0.000	北向き *
86	S-04	基礎底面	せん断力	X 方向	0.0910	0.000	0.000	北向き *
87	S-05	基礎底面	せん断力	X 方向	0.0455	0.000	0.000	北向き *
88	S-06	基礎底面	せん断力	X 方向	0.000	0.000	0.000	北向き *
89	S-07	基礎底面	せん断力	X 方向	−0.0455	0.000	0.000	北向き *
90	S-08	基礎底面	せん断力	X 方向	−0.0910	0.000	0.000	北向き *
91	S-09	基礎底面	せん断力	X 方向	−0.1365	0.000	0.000	北向き *
92	S-10	基礎底面	せん断力	X 方向	−0.1820	0.000	0.000	北向き *
93	S-11	基礎底面	せん断力	X 方向	−0.2275	0.000	0.000	北向き *
244	DISP1	振動台	変位	X 方向	−4.000	1.000	2.000	北向き
245	DISP2	振動台	変位	X 方向	−4.000	−1.000	2.000	北向き

*: ロードセルのせん断力は，ロードセルと地盤との間に働く力が北向きの時を正とする．

表–2.7 データの収録周波数

Case	Step	加振波	データ収録周波数 (Hz)	計測継続時間 (sec)
Case 1	Step 1	スウィープ波	1000	50
	Step 2	七峰橋波	500	120
	Step 3	スウィープ波	1000	50
	Step 4	神戸波	1000	50
	Step 5	神戸波	1000	50
Case 2	Step 1	スウィープ波	1000	50
	Step 2	神戸波 (振幅 80 %)	1000	50
	Step 3	スウィープ波	1000	50

2.7 実験ケースと振動台への入力波

表–2.8 に実験ケースを示す．Case 1 と Case 2 は，それぞれ同一作成地盤における実験であることを示す．Step は入力地震動などの実験条件の違いを示しており，Step 番号の順に加振を行った．Case 1-Step 2 では 1993 年北海道南西沖地震において七峰橋周辺地盤上で観測された加速度記録 (以降,「七峰橋波」と呼ぶ) を入力地震動とした．この七峰橋波は道路橋示方書[6]に示される Type I 地震動に分類される．Type I 地震動は，大きな振幅が長時間繰返して作用する地震動である．

Case 1-Step 4, Case 1-Step 5 では，1995 年兵庫県南部地震において神戸気象台 (JMA-kobe) 地盤上で観測された N-S 方向の加速度記録 (以降,「神戸波」と呼ぶ) を入力地震動とした．神戸波は Type II 地震動に分類される．Type II 地震動の特徴は，継続時間は短く，繰返し回数は少ないが，極めて大きな強度を有する地震動である．Case 1-Step 4 と Case 1-Step 5 は同じ入力地震動が与えられているが，Case 1-Step 4 では模型を地盤に 50 mm 根入れさせている．ここで，Case 1-Step 4 および Case 1-Step 5 の加振前にはそれぞれ地盤表面を整形し，再度締固め直した．詳細については「2.8 実験手順」に示す．

Case 2-Step 2 では，神戸波の加速度振幅を 80 %に低減した波 (以降,「神戸波 (振幅 80%)」と呼ぶ) を入力地震動とした．また，模型を地盤に 10 mm 根入れさせている．

Case 1-Step 2 の七峰橋波および Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅 80 %) の加振前と加振後に，スウィープ波による加振を行った．スウィープ波は，50 gal の加速度で 1 Hz/s の割合で 1 Hz から 30 Hz まで振動数を漸増させた波である．スウィープ波による加振を七峰橋波または神戸波の前後に行うことにより，各加振ステップごとの模型の振動特性の変化を調べることができる．

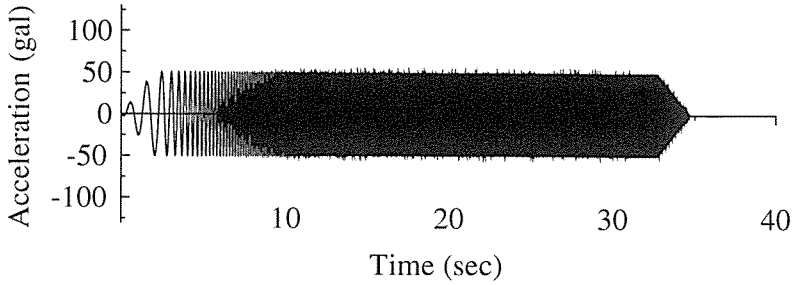
表–2.8 実験ケース

実験ケース		入力地震動	最大加速度 *1 (gal)		地震	根入れ	地盤相対密度
			設定入力値	実測値 *2	タイプ	(mm)	D_r (%)
Case 1	Step 1	スウィープ波	50	109	–	–	80
	Step 2	七峰橋波	386	601	Type I	–	
	Step 3	スウィープ波	50	106	–	–	
	Step 4	神戸波	812	712	Type II	50	
	Step 5	神戸波	812	726	Type II	–	
Case 2	Step 1	スウィープ波	50	110	–	10	
	Step 2	神戸波 (振幅 80 %)	650	557	Type II	10	
	Step 3	スウィープ波	50	113	–	10	

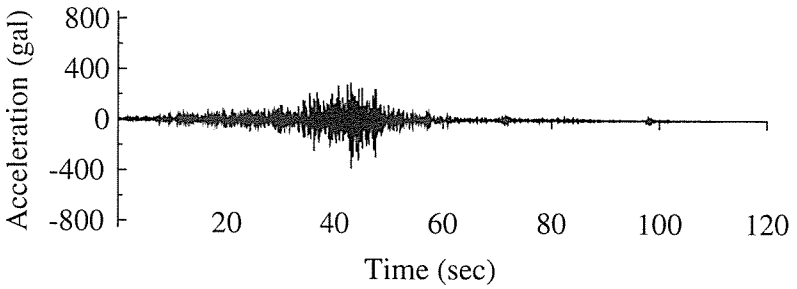
*1: ここに示す最大加速度は，絶対値の最も大きな加速度を正で表した値．

*2: ここに示す実測値は，振動台で計測された 4 点 (XT-NW, NE, SW, SE) の加速度記録の平均を各時刻ごとに取ったものを振動台の加速度記録であるものとしたときの値．

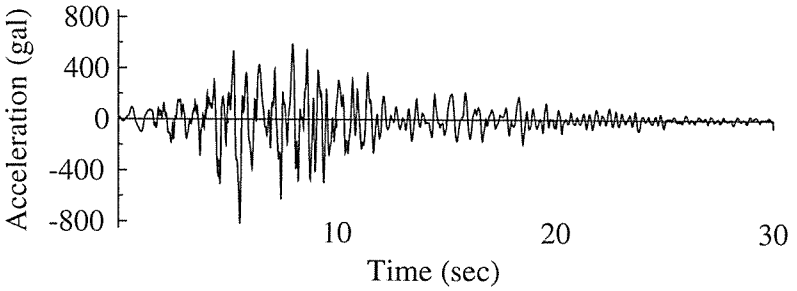
図–2.14～2.17 に実験に用いた入力地震動の加速度波形を示す．また，図–2.18～2.26 には，入力地震動のフーリエスペクトル，速度応答スペクトル，加速度応答スペクトルを示す．ここで，計算に用いた減衰定数 h は 2%, 5%, 10%, 20%である．しかし，「3.6 加速度計測結果」で詳述するように，実際に振動台で計測された加速度波形は入力信号通りの加速度波形とはならなかった．



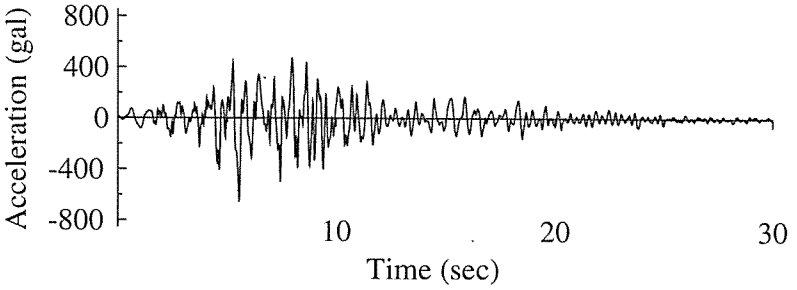
図–2.14 スウィープ波 加速度波形



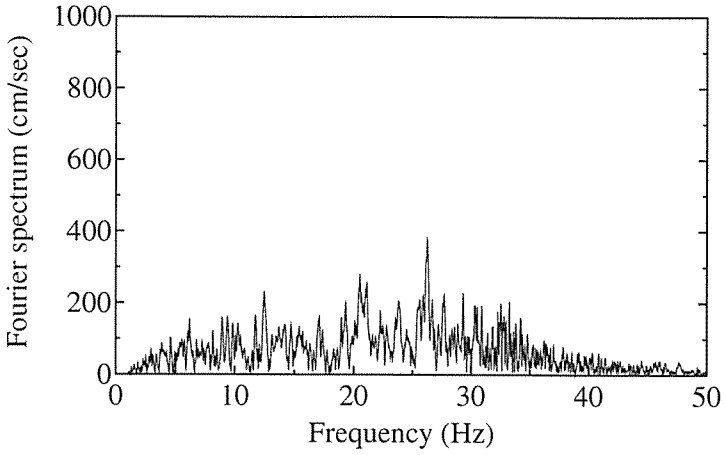
図–2.15 七峰橋波 (Type I 地震動) 加速度波形



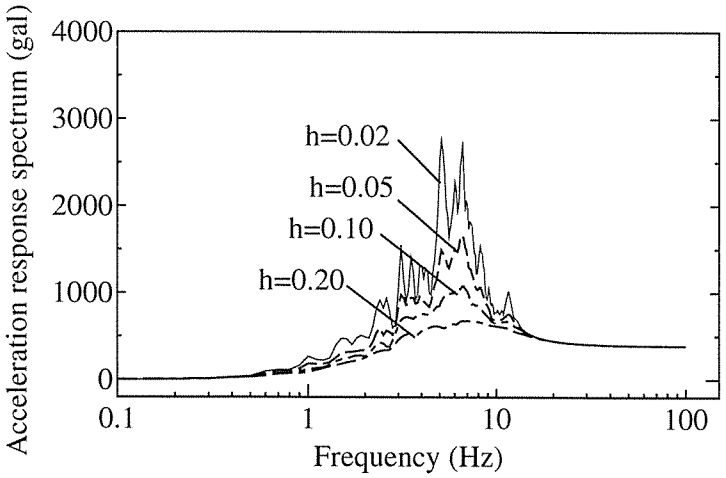
図–2.16 神戸波 (Type II 地震動) 加速度波形



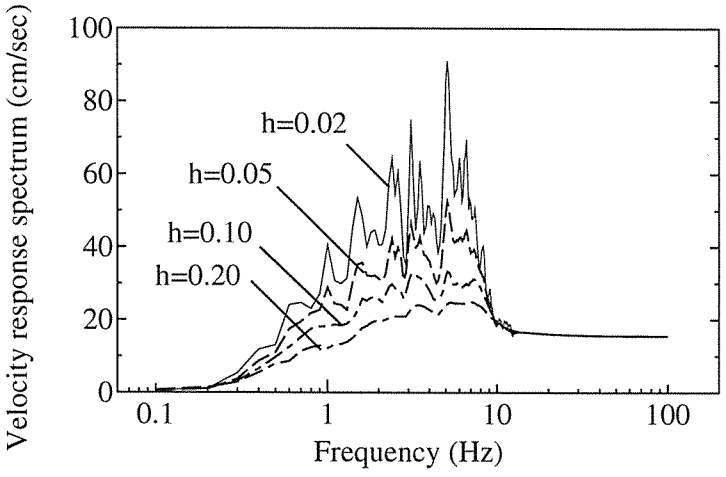
図–2.17 神戸波 (振幅 80%) (Type II 地震動) 加速度波形



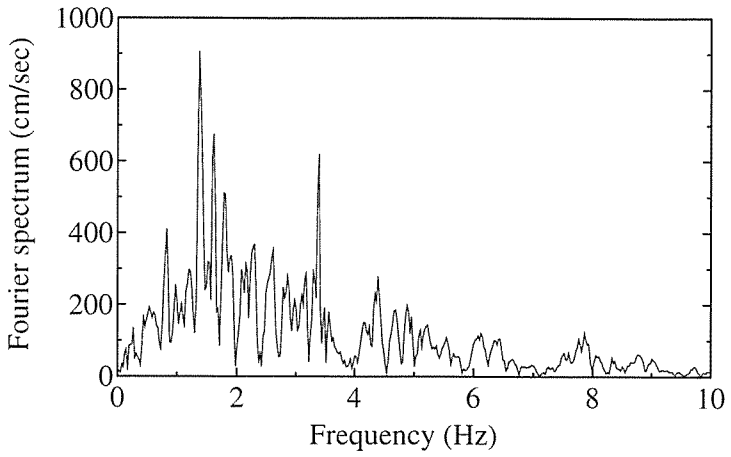
図–2.18 七峰橋波 フーリエスペクトル



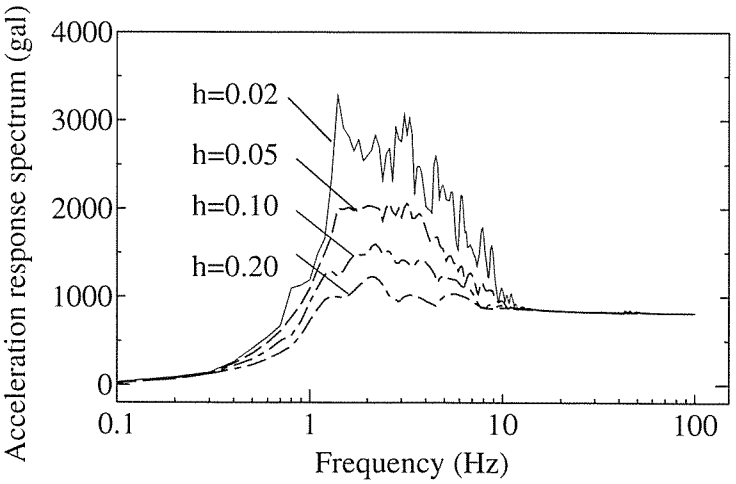
図–2.19 七峰橋波 加速度応答スペクトル



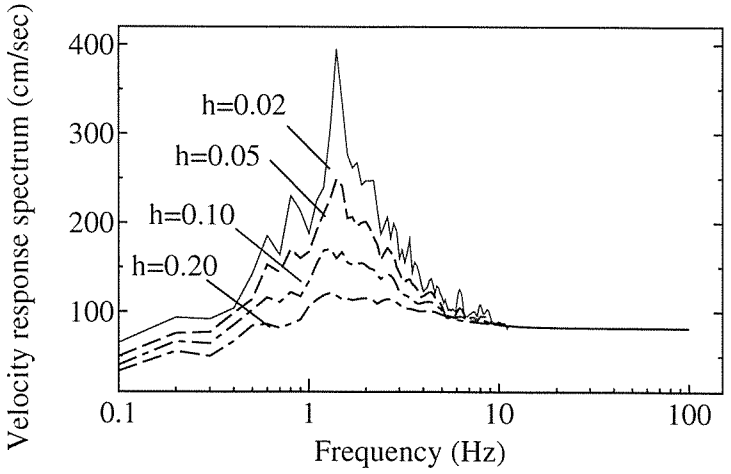
図–2.20 七峰橋波 速度応答スペクトル



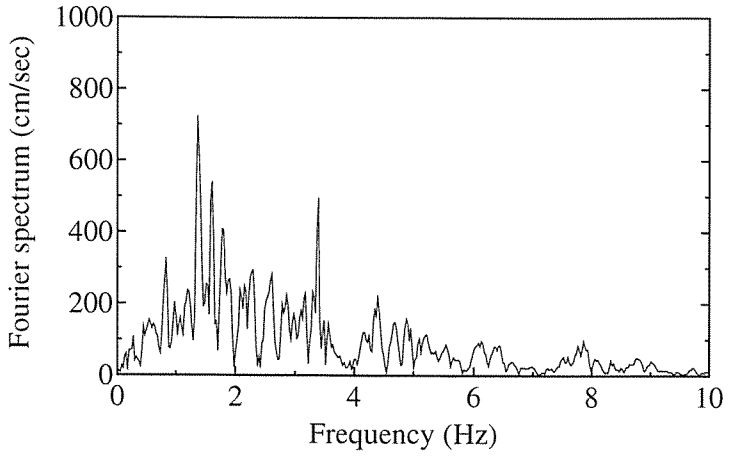
図–2.21 神戸波 フーリエスペクトル



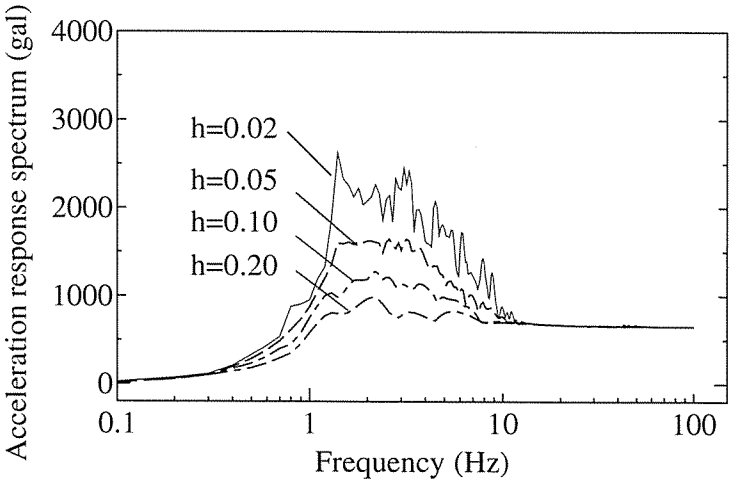
図–2.22 神戸波 加速度応答スペクトル



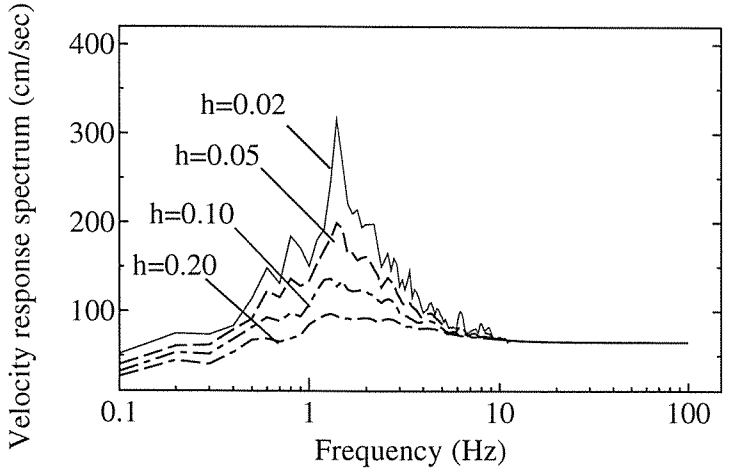
図–2.23 神戸波 速度応答スペクトル



図–2.24 神戸波 (振幅 80%) フーリエスペクトル



図–2.25 神戸波 (振幅 80%) 加速度応答スペクトル



図–2.26 神戸波 (振幅 80%) 速度応答スペクトル

2.8 実験手順

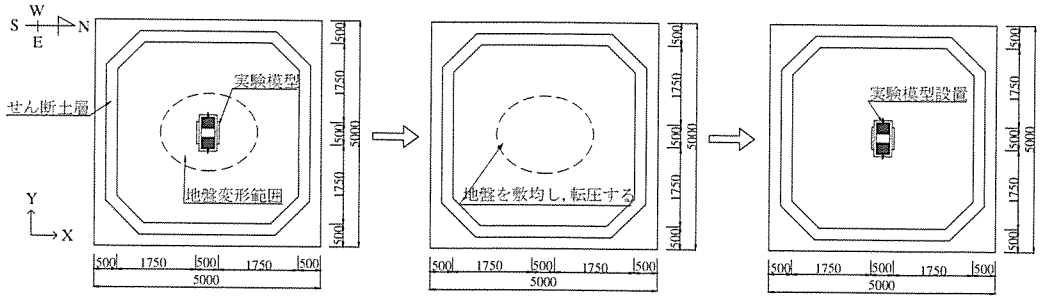
表–2.9 に実験手順を示す．表の上から下に向かって時系列に沿って実験手順が示されている．実験に関連する項目は，地盤作成，サウンディング試験，地表面高さの計測，S 波測定である．これらの個々については，次節以降に詳述する．

表–2.9 実験手順

Case	Step 入力波	実験地盤	サウンディング試験	地表面高さ計測	S波計測
Case 1		実験地盤作成	加振前サウンディング(2箇所)	加振前地表面全高さ計測	加振前S波計測
	Step 1 スウィープ波			地表面標点(48点)高さ計測	加振後S波計測
	Step 2 七峰橋観測波			地表面標点(48点)高さ計測	加振後S波計測
	Step 3 スウィープ波		加振後サウンディング(4箇所)	加振後地表面全高さ計測	
	Step 4 神戸波	基礎設置部地盤作成			
	Step 5 神戸波	基礎設置位置移動 実験地盤撤去			
Case 2		実験地盤作成	加振前サウンディング(2箇所)	加振前地表面全高さ計測	加振前S波計測
	Step 1 スウィープ波			地表面標点(48点)高さ計測	
	Step 2 神戸波(振幅80 %)			地表面標点(48点)高さ計測	加振後S波計測
	Step 3 スウィープ波	実験地盤撤去	加振後サウンディング(4箇所)	加振後地表面全高さ計測	

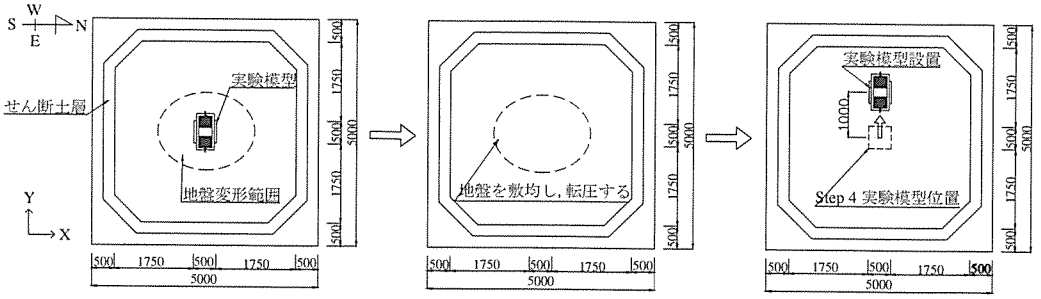
Case 1-Step 3 の加振終了後，図–2.27 に示すように，模型を一旦撤去し，塑性変形した地盤表面をならし，ベニア板 (厚さ 12 mm) を敷いた上からコテ型バイブレータ (写真–2.6) を用いて入念に締固め，水平な地盤を作成した (次節の写真–2.12 と同様の作業)．その後，模型を土槽中央に設置し直し，Case 1-Step 4 の実験を行った．

Case 1-Step 4 の加振終了後，図–2.28 に示すように，模型を再度撤去し，上記と同様の手順で締固めを行って，水平な地盤を作成した．さらに，模型を土槽中央から西側に 1 m 離れた位置に設置し，Case 1-Step 4 において地盤の変形が大きかった位置に模型を設置することを避けた．その際，模型設置位置が地表面加速度計 XG-00W 設置位置と重なったため XG-00W は撤去した．Case 1 終了後，地盤は撤去される．そして，Case 2 のために再度，最初から作成し直された．



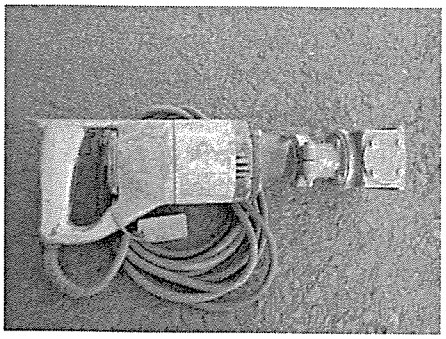
a. Step 3 加振終了　　b. 変形地盤敷均し，転圧　　c. 実験模型設置

図–2.27 Case 1-Step 4 実験手順



d. Step 4 加振終了　　e. 変形地盤敷均し，転圧　　f. 実験模型設置

図–2.28 Case 1-Step 5 実験手順



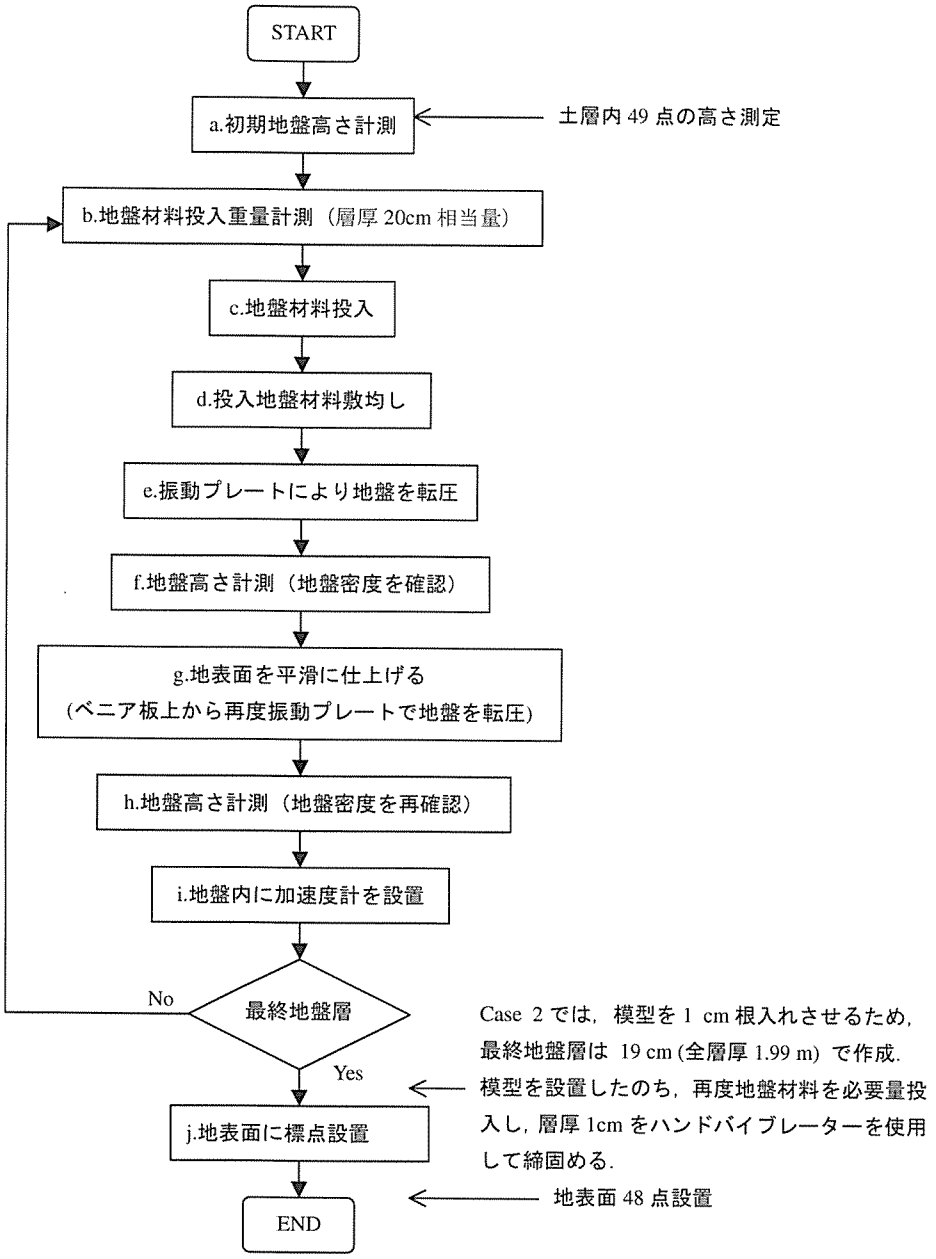
写真–2.6 コテ型バイブレータ

2.9 地盤作成方法

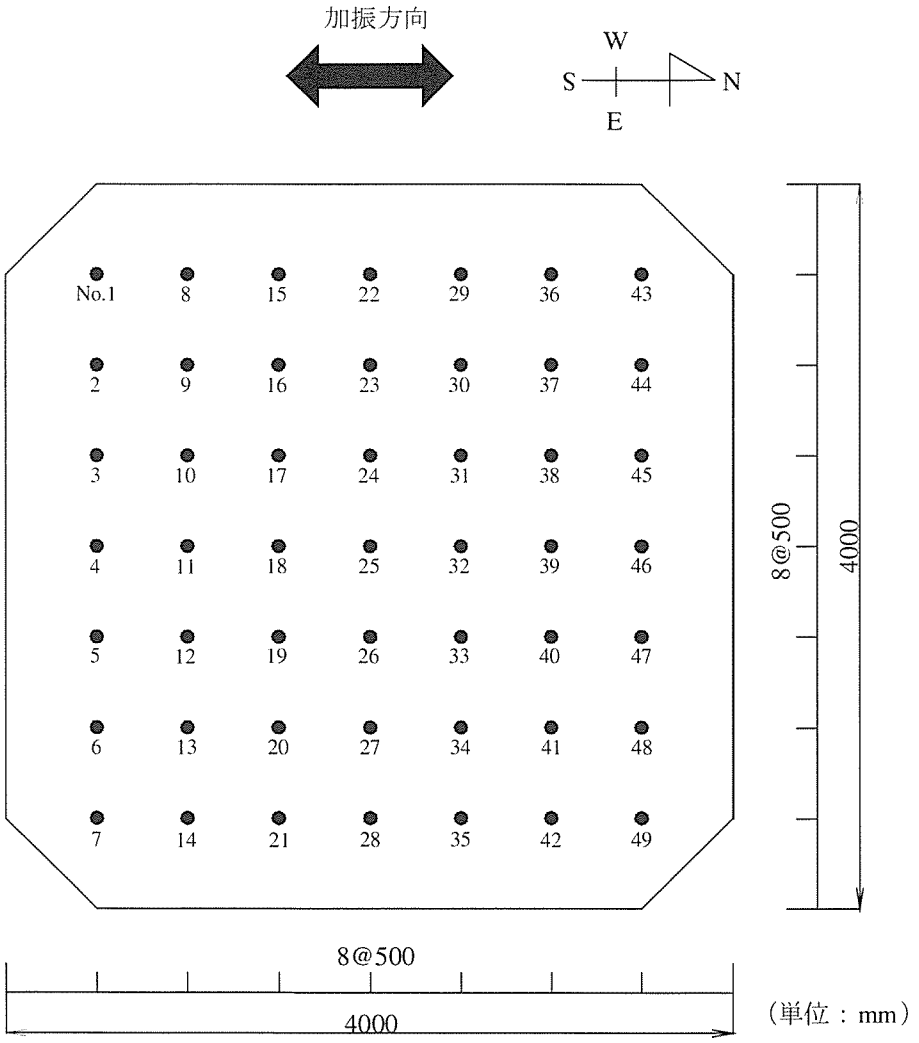
図–2.29 に示す地盤作成フローにしたがって，1 層 20 cm ごとに地盤作成がなされ，Case 1 および Case 2 のいずれも深さ 2 m，相対密度 80 %の地盤を作成した．目標としている相対密度 80 %になるような重量の砂を投入し，ならし，振動プレート (写真–2.7) で締固める作業を繰返す．フロー内の a〜j の各ステップの作業は以下の通りである．

a. 作成した地盤厚を逐時見積もることができるよう，現地表面から基準点 (土槽天端) までの高さを計測する．
b. 層厚 20 cm の地盤を相対密度 80 %で作成するために必要な砂の重量を計量する．
c. 計量した砂を砂袋により土槽内に投入する (写真–2.8)．
d. 投入した砂の高さがほぼ均一になるように敷均し，軽く足で踏み締固める (写真–2.9)．
e. 振動プレートでの締固め時に，振動により砂が飛散しないよう地表面全体にビニールシートを敷き，ビニールシート上から振動プレートを用いて地盤を締固める (写真–2.10)．
f. 地表面に敷いたビニールシートを取り除き，図–2.30 に示す 49 点の地表面高さを計測する．計測した地表面高さと前地盤表面高さ (1 層目においては土槽底部からの高さ) との差より作成した地盤体積を算出する．そして，算出した地盤体積と投入砂重量より作成された層の地盤の密度を求める．
g. 地盤がほぼ所定の密度まで締め固められたら，地表面を平滑にするために，ベニア板 (t=12 mm) を地表面全体に敷き，その上から再度振動プレートで転圧する (写真–2.11)．
h. 平滑に仕上がった地盤高さを再度計測し，作成地盤体積と投入砂重量より所定の密度となっていることを確認する．
i. 所定の位置に加速度計を設置する．
j. 最終地盤層 (実験地盤表面) に，加振による地盤の変状を計測するための標点を設置する (図–2.32)．

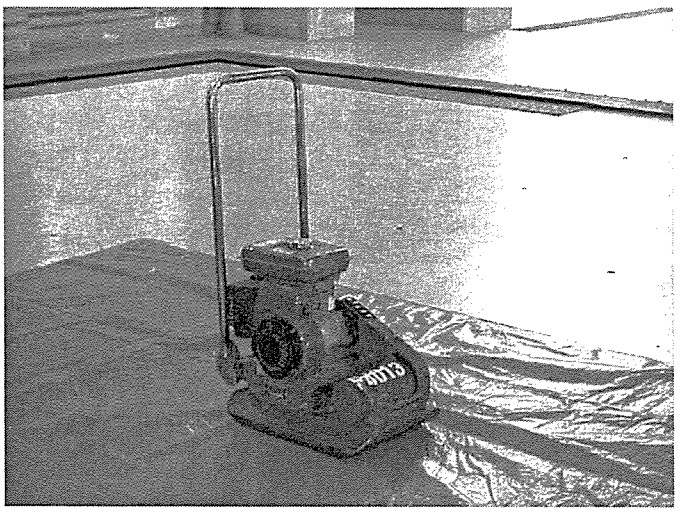
なお，Case 1-Step 4, Case 2-Step 1〜Case 2-Step 3 では，模型をそれぞれ 5 cm および 1 cm 根入れさせる．そこで，最終地盤層については，まず根入れ部分を除く地盤を作成し，その上に模型を設置したのちに，厚さ 5 cm または 1 cm の根入れ層を作成した．根入れ層は，ベニア板を敷いた上からコテ型バイブレータを用いて入念に締固めて作成した (写真–2.12，2.13)．



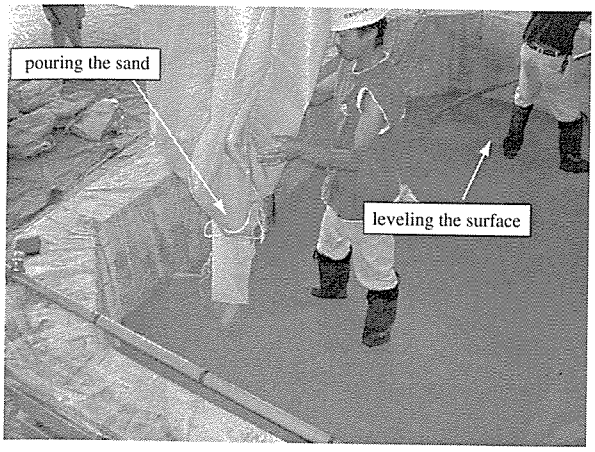
図–2.29 地盤作成フロー図



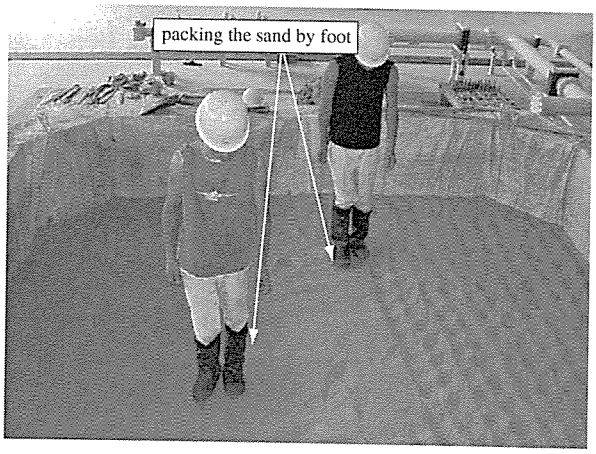
図–2.30 地盤高さ計測点位置 (地盤作成時)



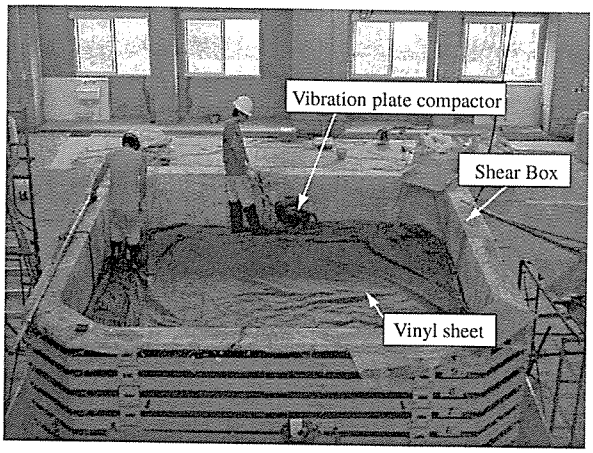
写真–2.7 振動プレート



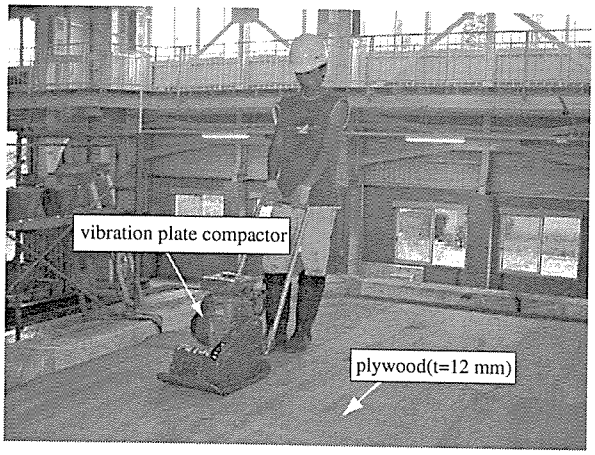
写真–2.8 地盤材料 (豊浦標準砂) 投入状況



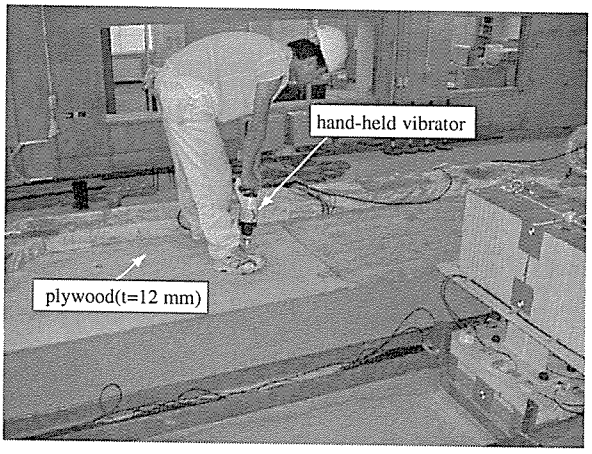
写真–2.9 地盤締固め状況 (踏固め)



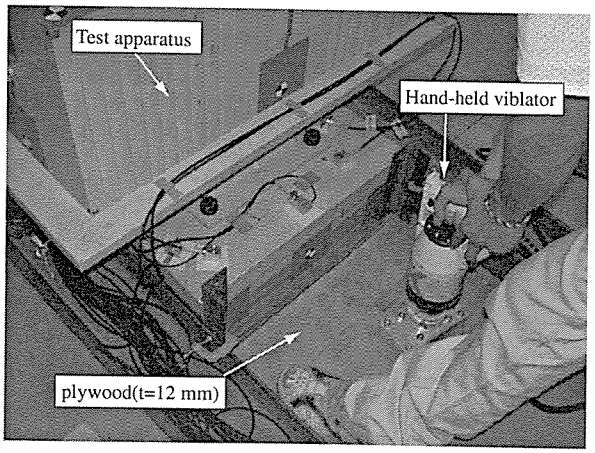
写真–2.10 地盤締固め状況



写真–2.11 地盤締固め状況 (表面仕上げ)



写真–2.12 コテ型バイブレータによる締固め状況



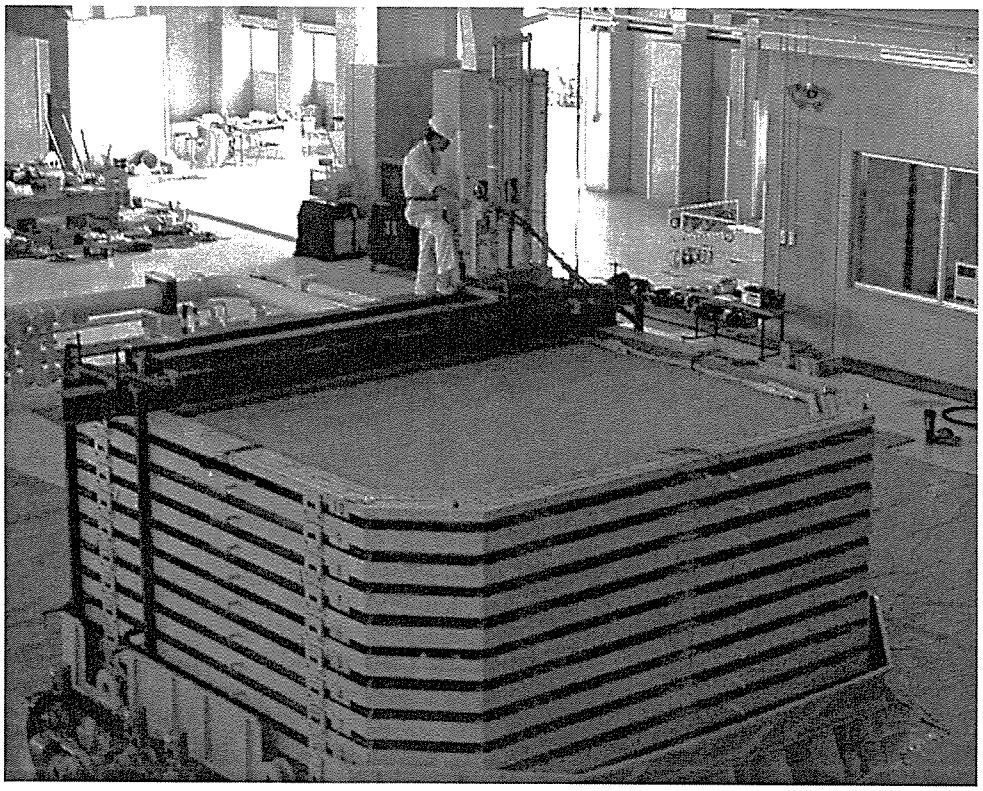
写真–2.13 コテ型バイブレータによる締固め状況 (模型付近)

2.10 原位置での地盤調査

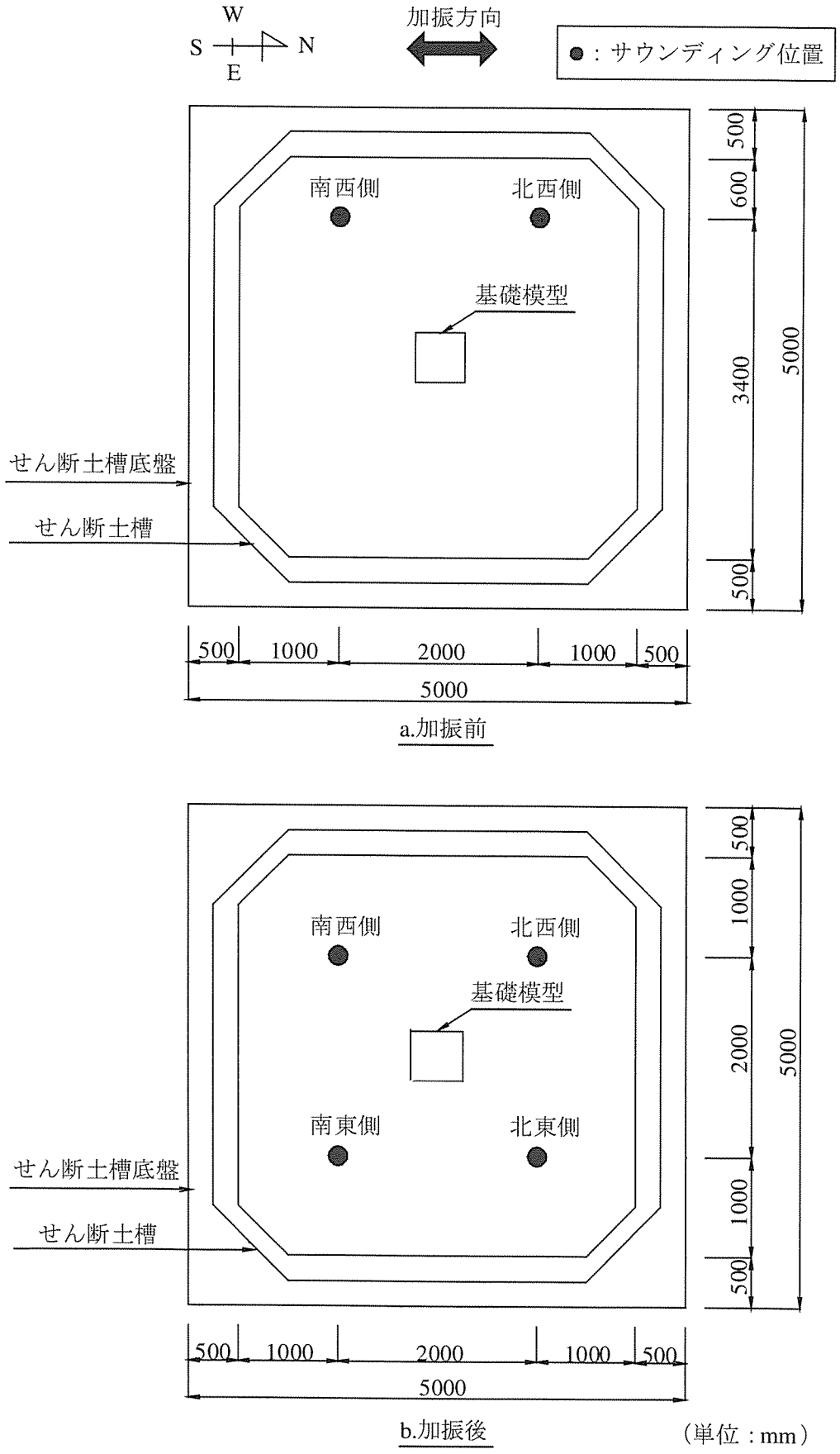
2.10.1 サウンディング

実験地盤の強度を確認するために，実験地盤作成後と加振実験終了後にサウンディングを実施した．用いられたサウンディングは，JIS A 1220 に準じたオランダ式二重管コーン貫入試験である (写真–2.14)．せん断土槽上端にサウンディング試験装置を固定した．

サウンディング位置を，図–2.31 に示す．加振前には，地盤中に埋設した加速度計位置を避けた 2 箇所で実施した．サウンディング実施箇所は，地表面を敷均して復旧した．一方，加振後は 4 箇所でサウンディングを実施した．



写真–2.14 サウンディング状況 (南西側)

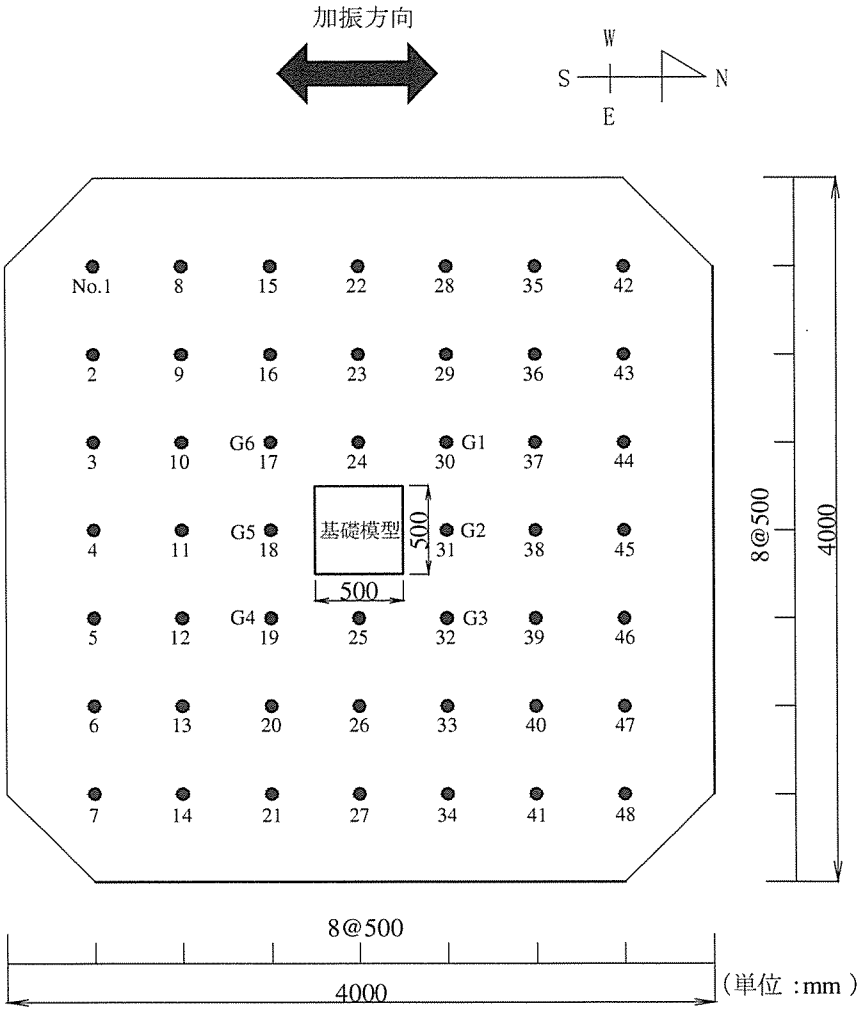


図–2.31 サウンディング位置図

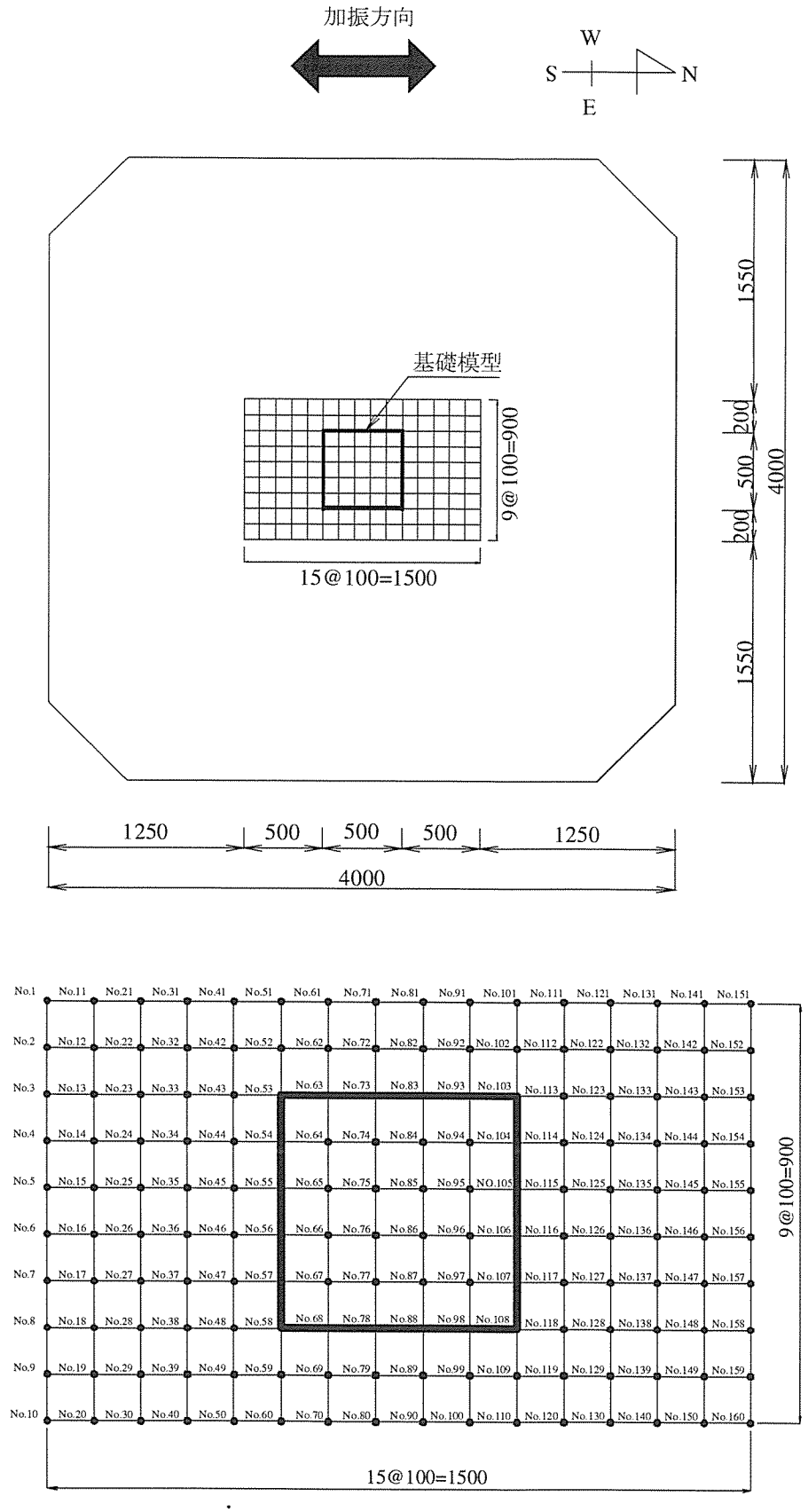
2.10.2　地表面高さの計測方法

加振中の地盤の変形量を把握するため，加振前と加振後の地表面高さの計測を行った．図–2.32に地表面高さの計測位置を示す．計測点数は，土槽全体に対して 48 点であり，せん断土槽の天端高さを基準として，そこからの高低差を計測した．地盤の変形量は，加振前と加振後の計測値の差とする．

さらに，加振時の基礎模型の挙動により引き起こされた地盤変形を把握するために，模型周辺についてはさらに密に計測点を設定した．図–2.33 に模型周辺の高さ計測点を示す．計測点は，模型設置位置を中心に 160 点である．



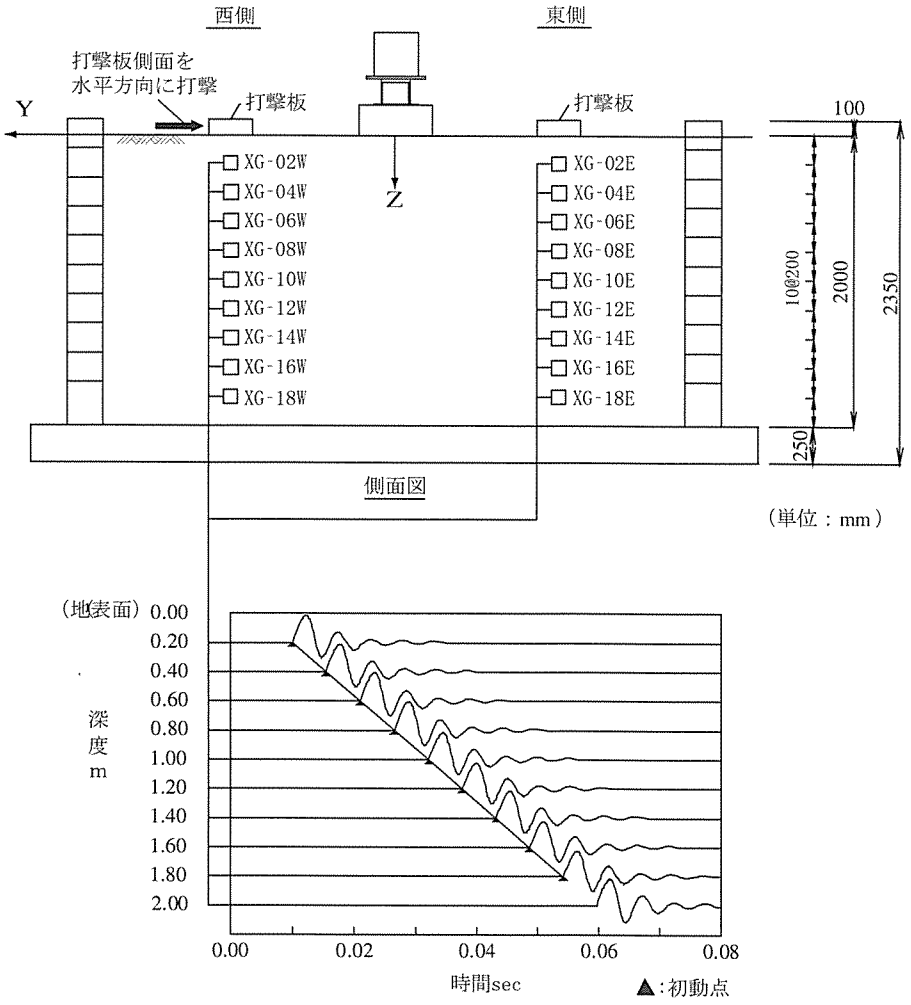
図–2.32 土槽全体地盤高さ計測位置図



図–2.33 模型周辺地盤高さ計測位置図

2.10.3 S 波速度測定方法

地盤の S 波速度の測定を加振前と加振終了後に実施した．S 波速度の測定は，図–2.34 に示す，土槽西側 (計測器 XG-02W～XG-18W 位置) と土槽東側 (計測器 XG-02E～XG-18E 位置) の地盤中加速度計埋設位置上で行われた．S 波の起振は板たたき法である．地盤表層に打撃板を載せ，それを上から押さえつける．その状態にてハンマーを用いて打撃板側面を水平方向に打撃する．地表で発生した S 波は，地盤内を伝播し，地中に設置した各深度の加速度計でその振動が受信される．ここで，西側位置での計測では加速度計 XG-02W～XG-18W，東側位置での計測では加速度計 XG-02E～XG-18E で受信したものを用いており，それぞれ実験地盤表面及びせん断土槽底面に設置した加速度計 (XG-00E, XG-00W, XG-20E, XG-20W) で受信したものは用いてない．図–2.34 に示すように，各深度で計測された加速度波形における S 波の初動時刻に近似する直線の勾配 (伝播時間を加速度計間の距離で除した値) から S 波速度を求めた．このとき，計測記録において初動時刻が必ずしも明確に現れないため，目視により各深度の初動時刻を思われる点を結んだ直線を用いた．この試験中の加速度計測のサンプリング周波数は 2000 Hz とした．



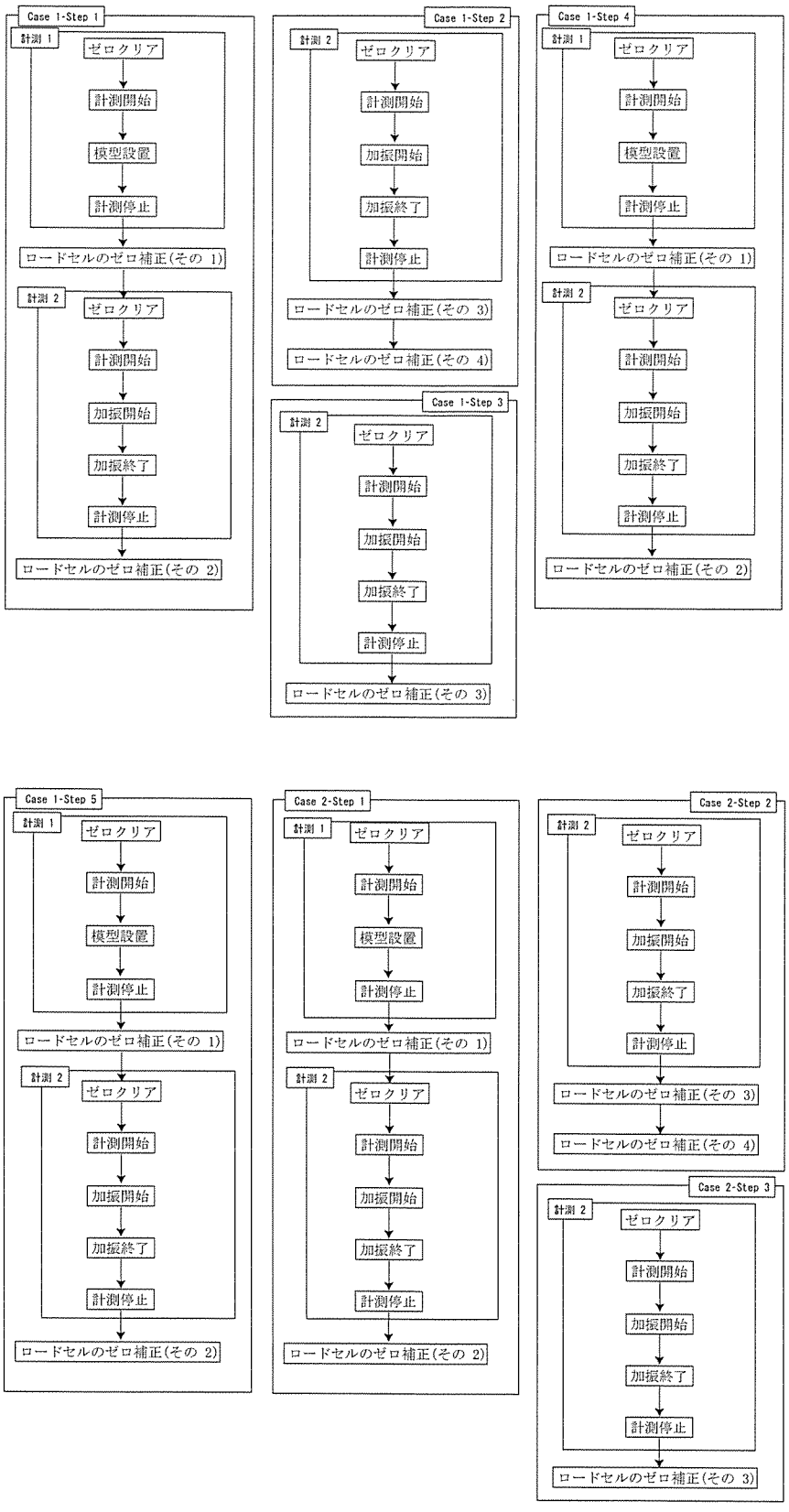
図–2.34 S 波速度測定の概念図

2.11 計測手順およびロードセルのデータ補正方法

図–2.35 に計測手順のフロー図を示す．同図に示されるように，本実験で行われる計測には，計測 1 と計測 2 の 2 種類がある．

計測 1 は模型設置時に 2 方向ロードセルにより模型設置時の荷重を計測するプロセスであり，加振前に模型を設置するまたは設置し直すケース (Case 1-Step 1, Case 1-Step 4, Case 1-Step 5, Case 2-Step 1) の加振前に行われた．その手順は次の通りである．まず，模型が空中にある状態で 2 方向ロードセルのゼロクリアを行う．そして計測を開始し，模型を設置し，しばらく計測を継続した後計測を終了する．

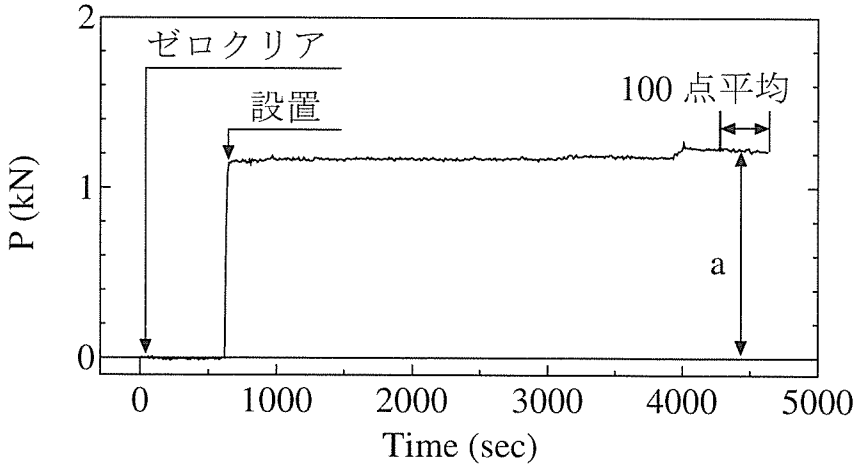
計測 2 は全ての実験ケースにおいて加振時の加速度，変位量，地盤反力および地盤せん断力をそれぞれの計測器で計測するプロセスである．計測 2 は，表–2.6 に示す全ての計測器を用いて行われる．ただし，前述のように Case 1-Step 5 においては Ch 13 の XG–00W は撤去されたため，計測されていない．計測 2 の手順は以下のとおりである．まず，ロードセルのゼロクリアを行う．その後計測，加振を順に開始し，加振が終了した後計測を停止する．



図–2.35 計測手順フロー

図–2.35 に示したように，それぞれの計測の最初に，計測器は全てゼロクリアされている．しかし，基礎底面が受ける反力については模型自重や直前に行われた加振後の残留値の影響を考慮する必要があるため，初期値がゼロのままでは正しい情報が得られない．従って，以下に示す要領で図–2.35 に示したフロー図中のロードセルのゼロ補正 (その 1)～ロードセルのゼロ補正 (その 4) を行った．

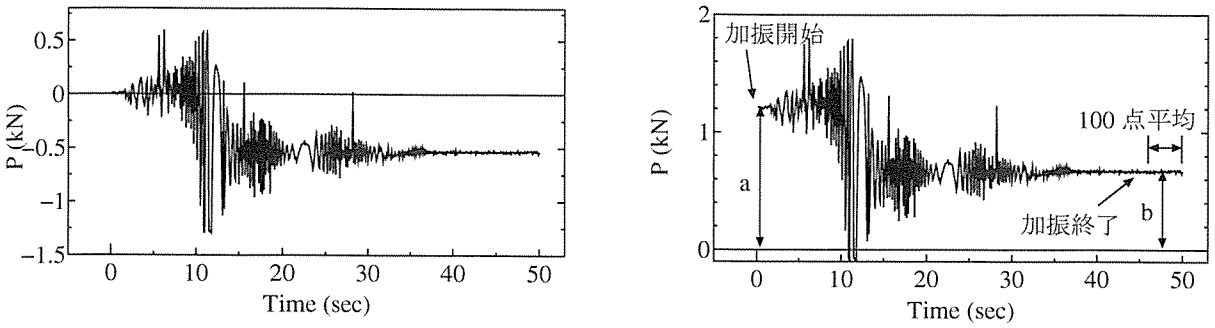
ロードセルのゼロ補正 (その 1)　ロードセルのゼロ補正 (その 1) は，計測 1 の計測停止後に行われる処理である．その処理内容は，計測 1 で計測された各ロードセルの鉛直荷重，せん断荷重の計測値のうち，計測終了時を含む前 100 点のデータの平均値を計算するものである．図–2.36 に例を示す．同図中に示す「a」が計算された平均値であり，以後，鉛直荷重の場合の「a」を初期地盤反力，せん断荷重の場合の「a」を初期せん断力という．



図–2.36 模型設置データ (鉛直荷重)

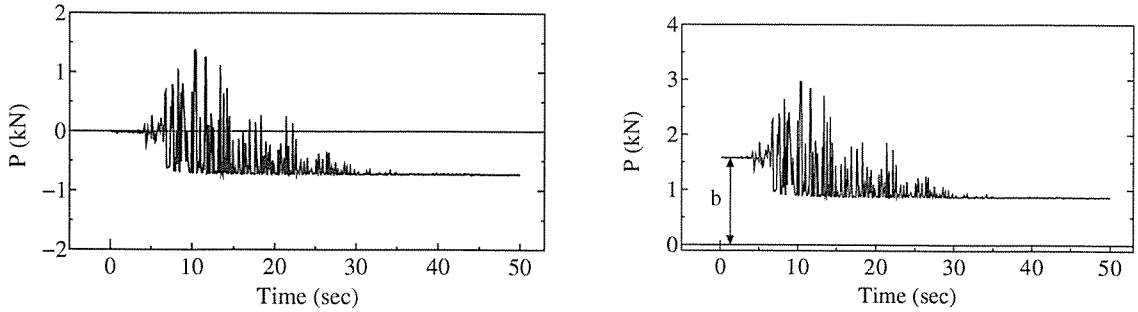
ロードセルのゼロ補正 (その 2)　ロードセルのゼロ補正 (その 2) は，計測 1 を行った実験ケース (Case 1-Step 1, Case 1-Step 4, Case 1-Step 5, Case 2-Step 1) において計測 2 の終了後に行う処理である．すなわち，計測 2 で計測された計測値全体にロードセルのゼロ補正 (その 1) で計算した初期地盤反力もしくは初期地盤せん断力を足し合わせる処理を行うものである．図–2.37 に例を示す．図–2.37(b) 中に示す「a」が，図–2.36 中の「a」に対応している．

ロードセルのゼロ補正 (その 3)　ロードセルのゼロ補正 (その 3) は，計測 1 を行わない実験ケース (Case 1-Step 2, Case 1-Step 3, Case 2-Step 2, Case 2-Step 3) において，計測 2 の終了後に行う処理である．まず，補正を行うケースの直前に行われたケースの補正完了時のデータ (鉛直荷重・せん断荷重の両方) について，計測終了時点のデータを含む前 100 点の計測値の平均値を計算する．ここに，補正を行うケースの直前に行われたケースとは，補正を行うケースを Case *i*-Step *j* とすると，



(a) 補正前　　(b) 補正後

図–2.37 ロードセルのゼロ補正 (その 2) 例

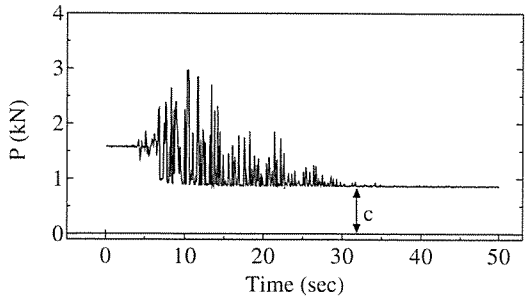


(a) ロードセルのゼロ補正 (その 3) 補正前　　(b) ロードセルのゼロ補正 (その 3) 完了時

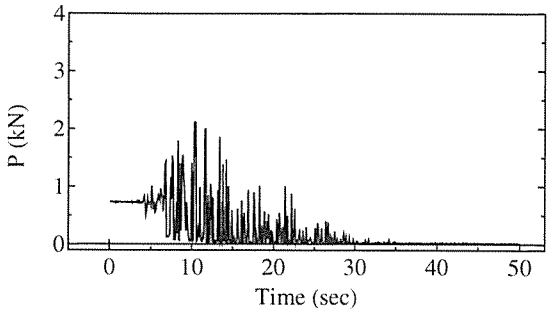
図–2.38 ロードセルのゼロ補正 (その 3)(計測データ全体に対して値 b を加える)

Case i-Step $(j-1)$ をいう (ただし，$j \neq 1, 4$ or 5)．以後，このようにして算出された値を補正値 b とする (図–2.37(b) 中の b)．そして，補正値 b を補正を行う計測データ (Case i-Step j, 図–2.38(a)) に足し合わせる．鉛直荷重に対して補正値 b を足し合わせた例を図–2.38(b) に示す．

ロードセルのゼロ補正 (その 4)　Case 1-Step 2, Case 2-Step 2 の場合はロードセルのゼロ補正 (その 3) を行った後，ロードセルのゼロ補正 (その 4) を行う．これは，浮上りに対して行う補正であり，鉛直荷重のみについて行われた．図–2.39(a) を見ると地震波の入力後と思われる時間帯にも正の鉛直力 c が計測されていることから，浮上りの影響があると考えられる．このような場合，最小値を全体の計測値から差し引く．この補正を行った結果を図–2.39(b) に示す．また，図–2.40(a) の場合は，地震波の入力後と思われる時間帯に負の鉛直力が計測されている．このような場合は，最小値の絶対値を全体のデータに足し合わせる．この補正を行った結果を図–2.40(b) に示す．そして，これらの処理が完了した後，11 個のロードセルの補正後の鉛直荷重の計測値の合計が模型の自重相当になっていることを確認する (図–2.41).

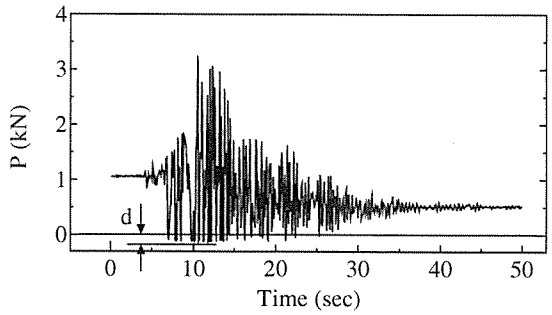


(a) ロードセルのゼロ補正 (その 3) 完了時

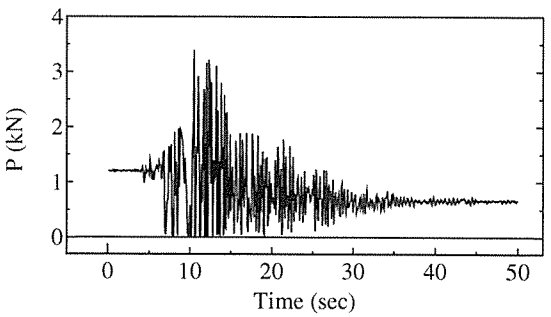


(b) ロードセルのゼロ補正 (その 4) 完了時

図–2.39 ロードセルのゼロ補正 (その 4)(計測データ全体に対して値 c を差し引く)

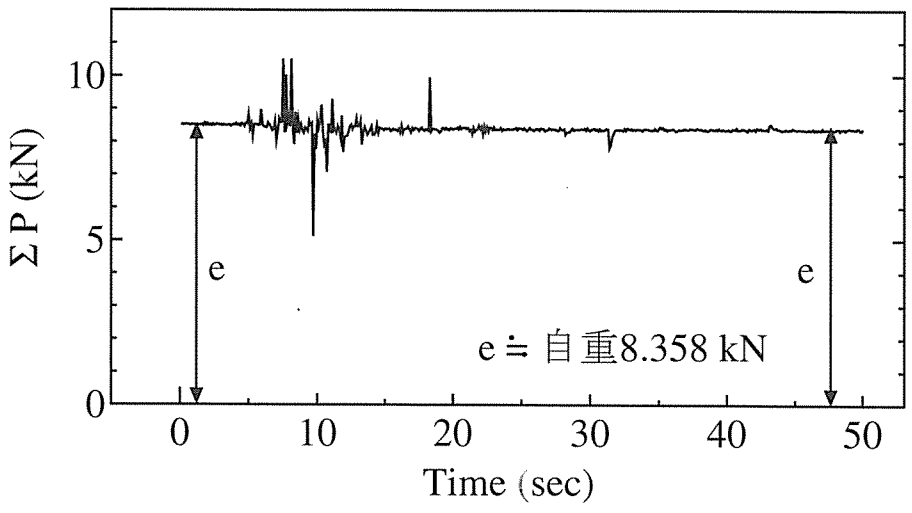


(a) ロードセルのゼロ補正 (その 3) 完了時



(b) ロードセルのゼロ補正 (その 4) 完了時

図–2.40 ロードセルのゼロ補正 (その 4)(計測データ全体に対して値 d を加える)



図–2.41 ロードセルのゼロ補正 (その 4) 後の確認

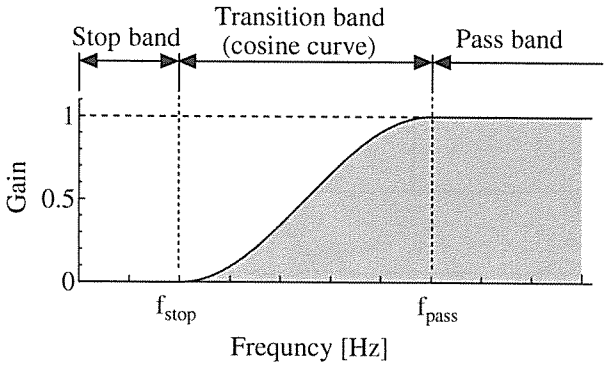
2.12 変位の評価

2.12.1 加速度計測記録からの変位の評価

加振により模型にロッキングや，鉛直，水平方向への変位，さらにはX-Y平面上で回転などが生じる．そのため，模型の定点変位を変位計にて計測することができない．そこで，模型に設置した加速度計の記録を時間軸上で2階積分することにより変位を算出することとした．加速度記録を2階積分することにより変位を評価する方法を以下に示す．一般に，加速度計測記録には，長周期成分が誤差として含まれる．この誤差として記録された長周期成分を積分すると積分値が発散してしまうことがある．そこで，図–2.42に示すローパスフィルタを用いて，次式により長周期成分をカットする処理を行った．

$$\bar{a}(f) = H(f) \cdot a(f) \tag{2.5}$$

ここに，$a(f)$: 計測加速度を周波数領域に変換したもの，$H(f)$: フィルタ，$\bar{a}(f)$: フィルタ処理後の加速度記録で周波数の関数である．$\bar{a}(f)$ を時間領域に変換することにより，フィルタ処理後の加速度時刻歴が求まる．そして，$\bar{a}(f)$ を2階積分することで変位を算出した．



図–2.42 フィルター形状

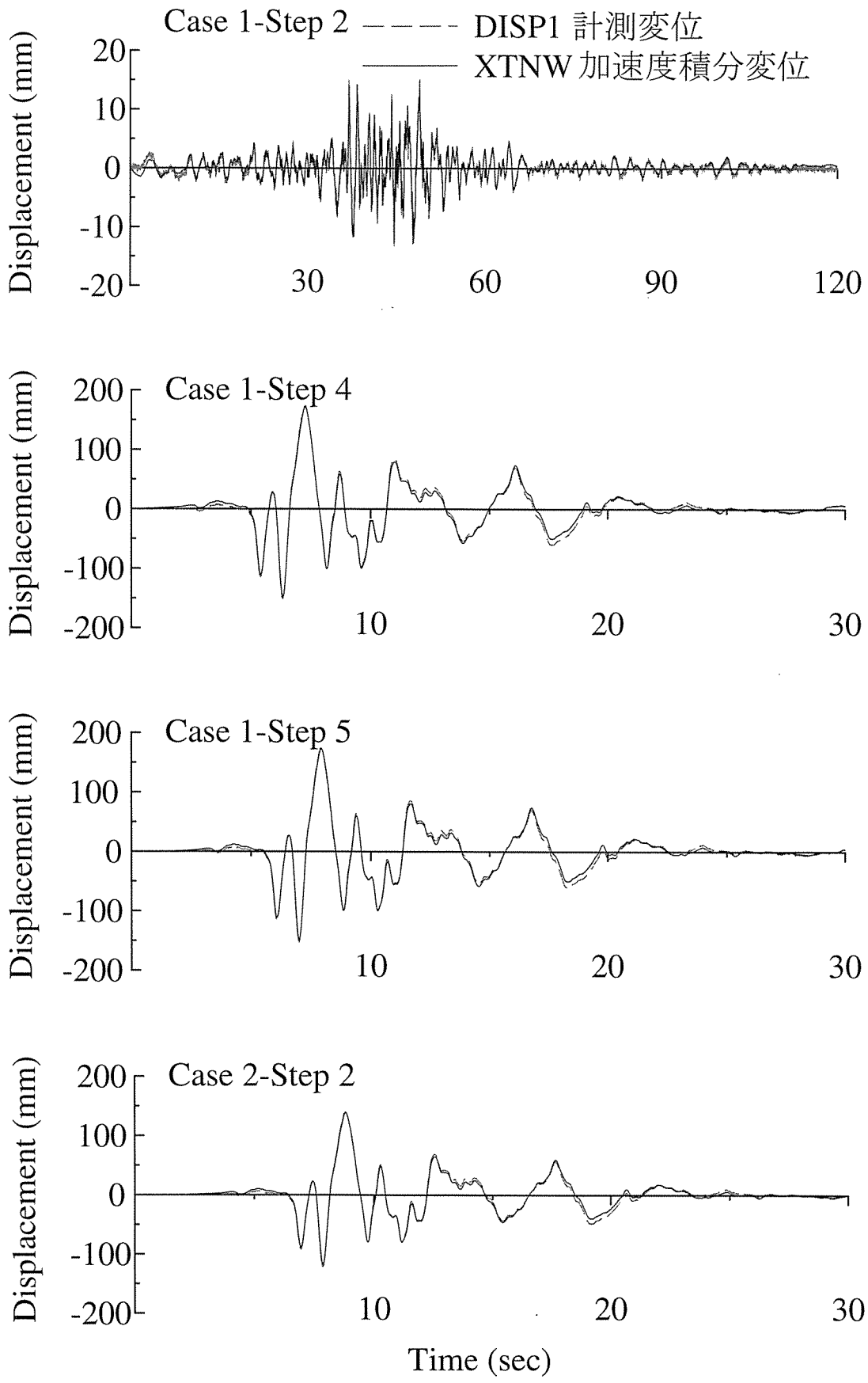
ローパスフィルタのStop bandとPass bandを規定するしきい値 f_{stop}，f_{pass} は $\bar{a}(f)$ を2階積分して得られる変位の精度が確保されるように試行錯誤的に決定された．振動台X方向変位はレーザー変位計 (DISP1, DISP2) で計測されており，地盤のX方向変位および模型のX方向，Z方向変位は，後述するように加振中に撮影したビデオ画像を画像解析処理して評価可能である．そこでこれらの変位データを目標に f_{stop} と f_{pass} の値を調整した．最終的に設定した f_{stop} (Stop band) と f_{pass} (Pass band) の値を表–2.10に示す．ここで，振動台のY, Z方向変位，地盤のZ方向変位は，比較する変位データがなかったため，X方向と同じフィルタを用いて算出した．模型のY方向変位も，変位がわずかであり比較できなかったためX方向と同じフィルタを用いて算出した．

各加振に対して加速度積分から求めた変位と変位計または画像解析処理から求めた変位の時刻

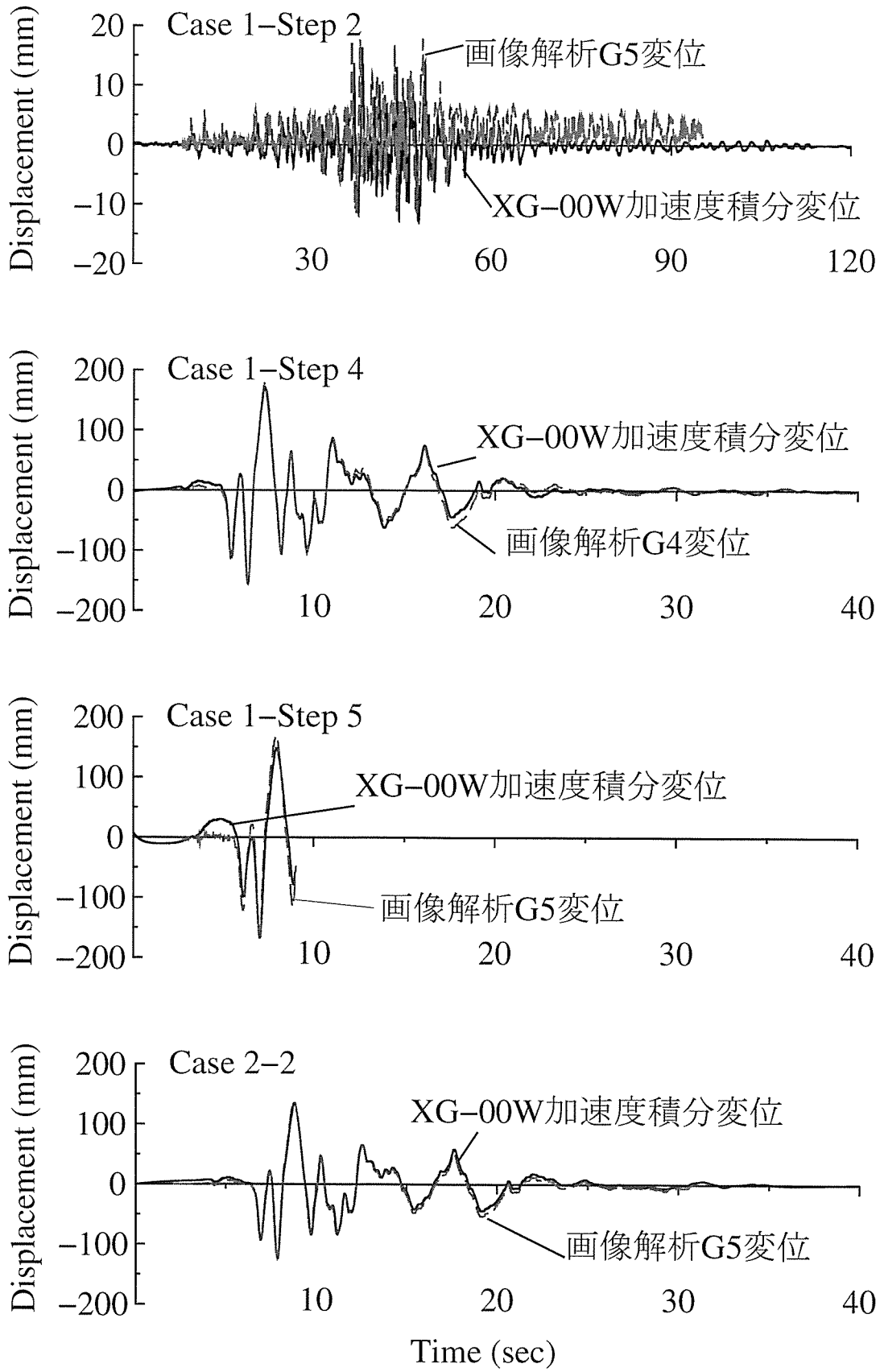
歴を比較したものを図–2.43～2.46 に示す．本実験では，図–2.45，2.46 に示されるように，加振途中，模型に残留変位が生じる．一方，フィルタを用いることで誤差として含まれる長周期成分とともに変位のトレンド成分 (一方向への変位の累積成分) が除去されてしまう．したがって，加速度記録の積分により得られた変位は，トレンド成分が除去された，振動成分のみが再現されるように処理された値と見なされる．そこでトレンド成分については，「3.8 基礎変位の時刻歴」に示すように，ビデオ画像を画像解析することにより得られる変位データを用いて評価する．

表–2.10 フィルター処理使用値

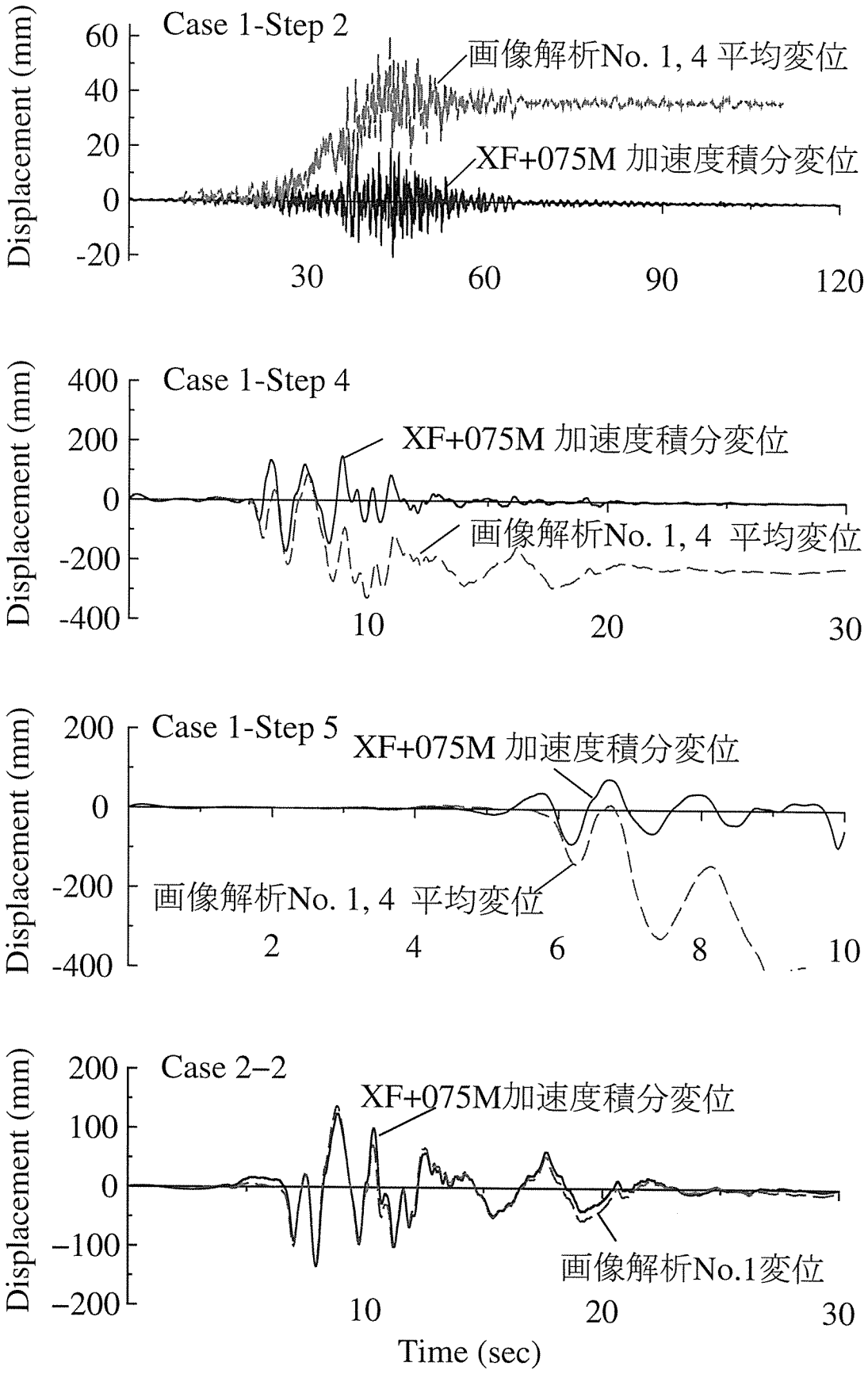
変位を評価する実験ケース	加速度位置	加速度方向	Stop band f_{stop} (Hz)	Pass band f_{pass} (Hz)
Case 1-Step 2	振動台	X, Y, Z	0.01	0.20
	地盤	X, Z	0.30	0.40
	模型	X, Y, Z	0.05	0.50
Case 1-Step 4	振動台	X, Y, Z	0.02	0.20
	地盤	X, Z	0.10	0.20
	模型	X, Y, Z	0.20	0.70
Case 1-Step 5	振動台	X, Y, Z	0.02	0.20
	地盤	X, Z	0.15	0.25
	模型	X, Y, Z	0.50	1.00
Case 2-Step 2	振動台	X, Y, Z	0.02	0.20
	地盤	X, Z	0.05	0.10
	模型	X, Y	0.10	0.20
		Z	0.50	1.00



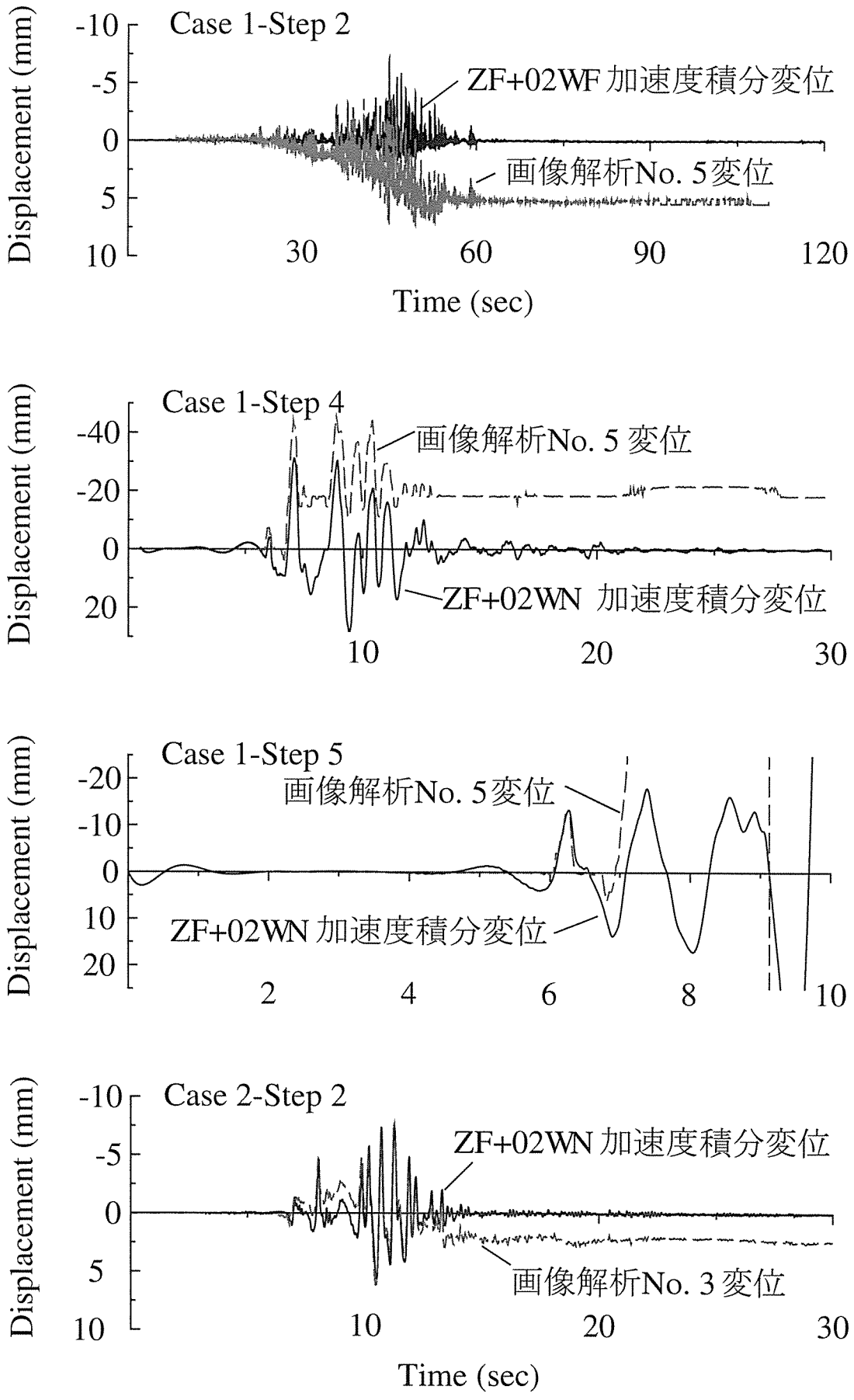
図–2.43 加速度積分変位の確認 (振動台水平変位)



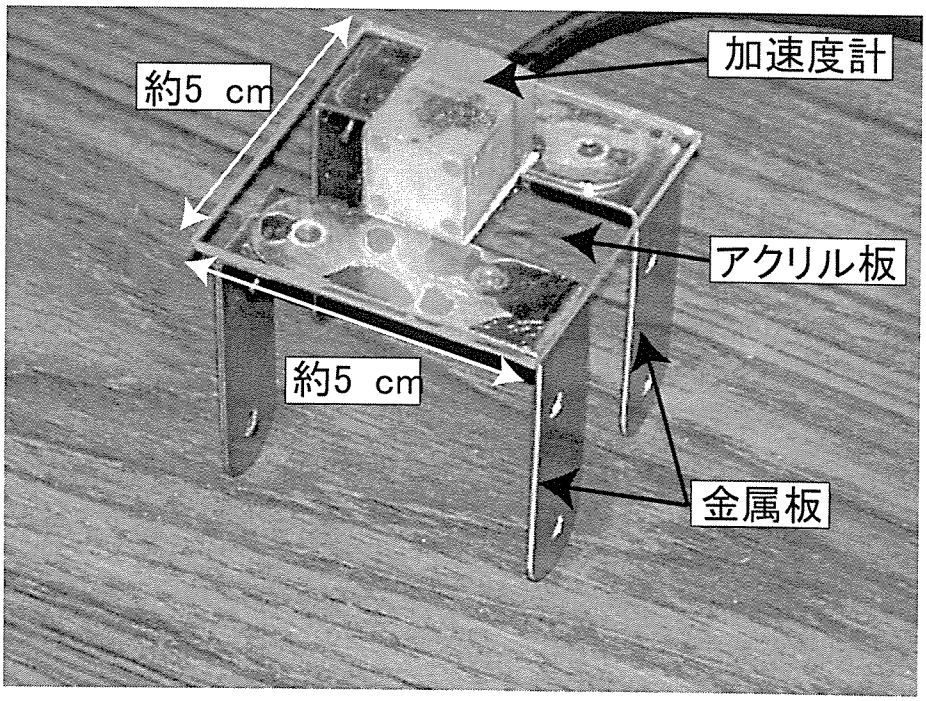
図–2.44 加速度積分変位の確認 (地盤水平変位)



図–2.45 加速度積分変位の確認 (模型天端水平変位)

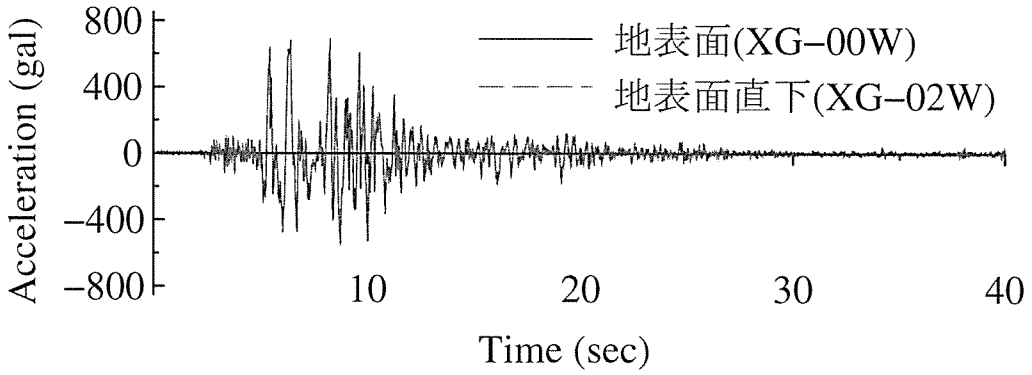


図–2.46 加速度積分変位の確認 (基礎北側端部鉛直変位)

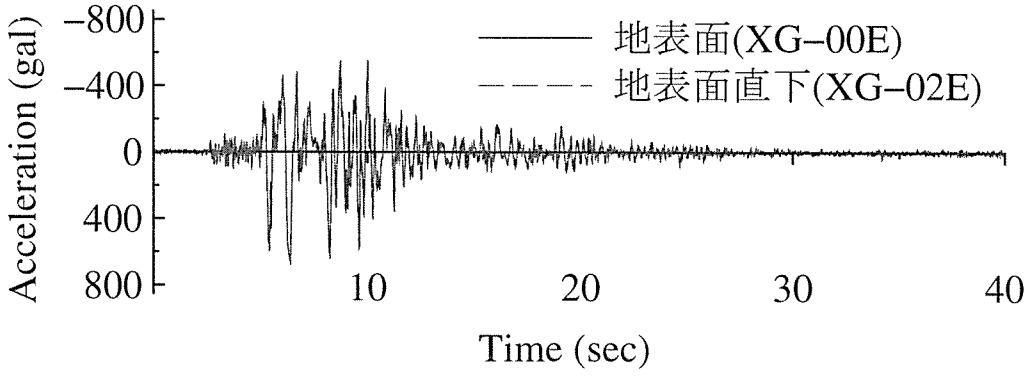


写真–2.15 地盤中の加速度計固定方法

地表面に設置した加速度計は加振中に傾斜することが懸念された．一方，地表面より 20 cm 以深に設置した加速度計は，まわりに地盤があるので傾斜した可能性は小さいと考えられる．そこで，地表面加速度が最大であった Case 1-Step 4 の実験結果における，地表面に設置した加速度計と地表面直下 (地表面より 20 cm 下) に設置した加速度計による加速度記録を比較する．なお，地盤中に設置される加速度計は写真–2.15 に示すようにアクリル板，金属板からなる固定装置に取り付けられた上で地盤中に設置された．この固定装置によって地盤と加速度計が一体となって挙動し，かつ傾斜が生じないようにされている．図–2.47，2.48 にそれぞれ西側に設置した地表面加速度計 (XG-00W) と地表面直下の加速度計 (XG-02W) の加速度記録と，東側に設置した地表面加速度計 (XG-00E) と地表面直下の加速度計 (XG-02E) の加速度記録の比較を示す．もし，地表面に設置した加速度計が加振途中で傾いたとすれば，その瞬間から二つの波形がずれることが予想されるが，どちらも加振開始から加振終了までよく一致した．また，地表面加速度と地表面直下加速度記録の最大値を比較してみると，西側，東側ともに地表面加速度記録の方が大きかった．一般に，地表面に向かうにつれて加速度は増幅されるとすれば，その傾向が再現されているといえる．以上の結果から，地表面加速度計の傾斜の可能性はほとんどなく，地表面加速度記録は信頼できるものと考えられる．



図−2.47 Case 1-Step 4 地表面加速度と地表面直下 (20 cm 下) 加速度の比較 (西側計測値)



図−2.48 Case 1-Step 4 地表面加速度と地表面直下 (20 cm 下) 加速度の比較 (東側計測値)

図–2.49 に概念図を示すように，基礎底面中心位置 b の水平変位 u, 鉛直変位 v, X-Z 平面上の回転角 θ_Y は以下のようにして算出した．基準点 A $(x_A(t), z_A(t))$ および B $(x_B(t), z_B(t))$ の座標は，それぞれの加速度計設置位置に対応する．本実験では A 点の X 方向加速度計は XF+025S，Z 方向の加速度計は ZF+02ES および ZF+02WS，B 点の X 方向加速度計は XF+025N, Z 方向の加速度計は ZF+02EN および ZF+02WN である．加振により変位が生じたときの座標は，初期の座標に各方向の変位量を加えることで算出できる．

この基準点となる A および B 点から，模型中心線と直線 AB の交点 a の座標 $(x_a(t), z_a(t))$ を式 (2.6) を用いて算出する．

$$x_a(t) = (x_A(t) + x_B(t))/2, \quad z_a(t) = (z_A(t) + z_B(t))/2 \tag{2.6}$$

基礎の回転角 $\theta_Y(t)$ は基準点 A, B 点の Z 座標および加速度計 XF+025S, XF+025N 間の距離 L(=440 mm) より，式 (2.7) を用いて算出する．

$$\theta_Y(t) = \tan^{-1}\left(\frac{z_B(t) - z_A(t)}{L}\right) \tag{2.7}$$

なお，模型は Z 軸まわりに回転するため，加振中の加速度計 XF+025S, XF+025N 間の距離は厳密には 440 mm ではない．しかし，「2.12.3 Z 軸周りの回転が水平挙動に与える影響の評価」に後述するように，Z 軸まわりの回転角 θ_Z は微小であるため，θ_Y の算出には初期の加速度計間の距離を用いた．また，符号は，それぞれ鉛直変位 v は下向き方向を正，水平変位 u は北側方向の変位を正，回転角 θ_Y は模型が北側へ傾斜する方向 (X-Z 平面上で時計まわり) を正とする．

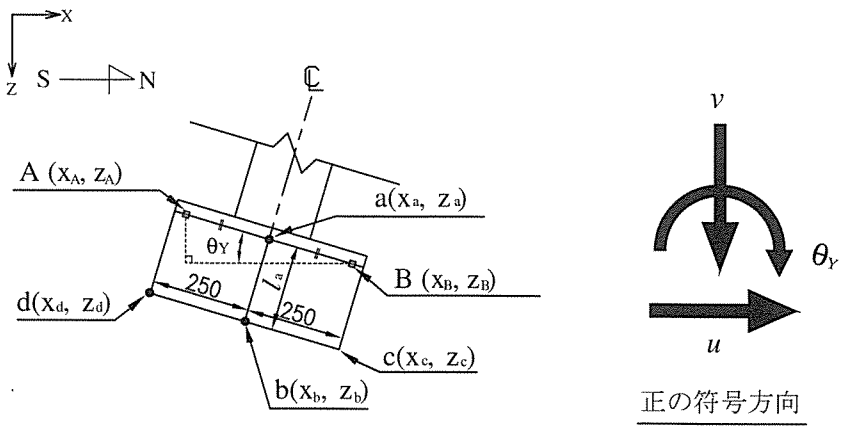
a 点の座標と回転角 θ_Y より，基礎底面中心位置の b 点は次式で求めることができる．

$$x_b(t) = x_a(t) - l_a \sin\theta_Y(t), \quad z_b(t) = z_a(t) + l_a \cos\theta_Y(t) \tag{2.8}$$

ここに，l_a は点 a, b 間の距離である．加振前の b 点の座標を原点とすれば

$$u(t) = x_b(t), \quad v(t) = z_b(t), \quad \theta_Y(t) = \theta_Y(t) \tag{2.9}$$

となる．

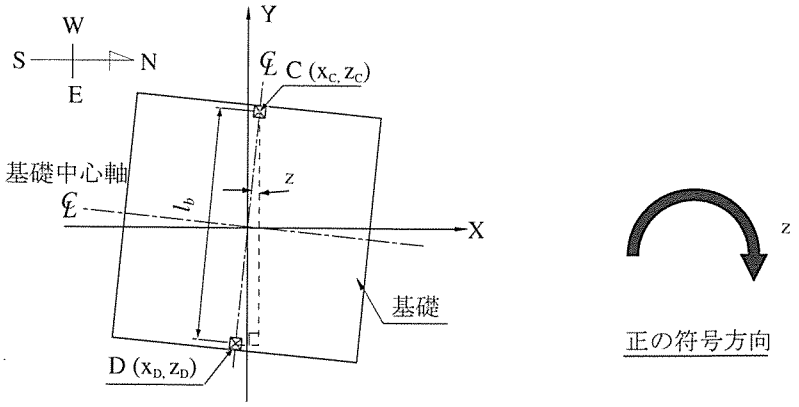


図–2.49 基礎変位の算出概念図 (X-Z 平面)

また，X-Y 平面上の回転角 θ_Z については以下のように算出した．この基準点となる C 点および D 点の X 座標から回転角は次式で求めることができる．

$$\theta_Z(t) = \sin^{-1}\{(x_C(t) - x_D(t))/l_B\} \tag{2.10}$$

ここに，C 点の X 座標は XF+025W で計測された加速度を，D 点の X 座標は XF+025E で計測された加速度を用いて算出された値であり，l_B はこれら二つの計測器間の距離で 400 mm である．また，回転角 θ_Z の符号は X-Y 平面上で時計まわりする方向が正である．



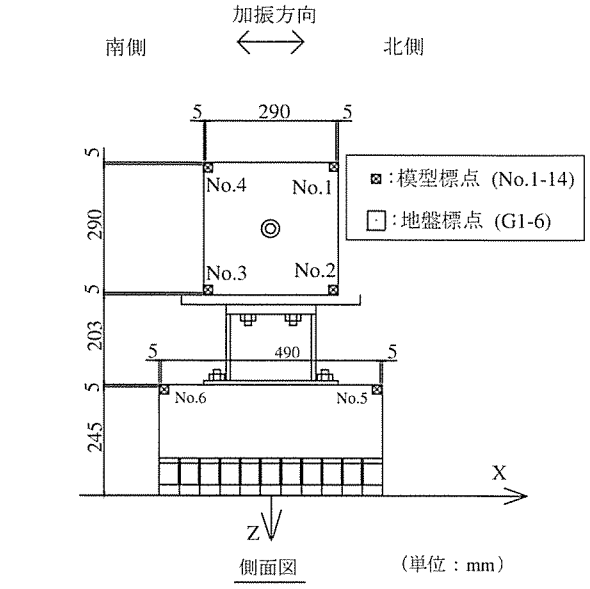
図–2.50 基礎回転角の算出概念図 (X-Y 平面)

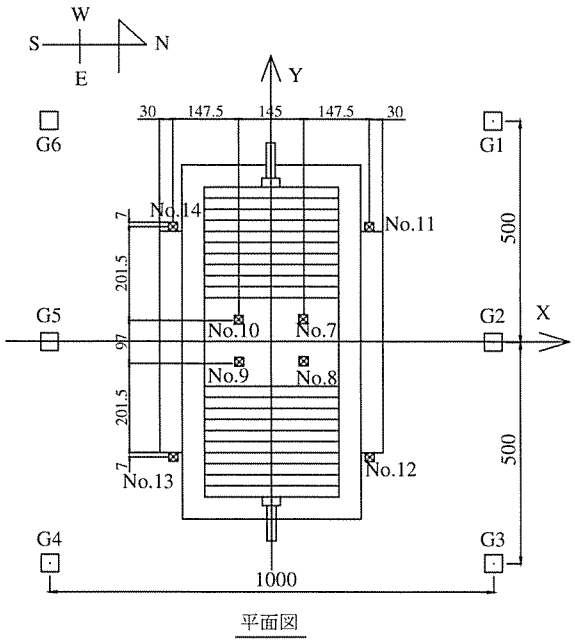
2.12.2 画像解析による変位の評価

前述のように，フィルタ処理後の加速度記録を2階積分して求まる変位は，積分時のフィルタの値に依存する．特に，徐々に累積される残留変位は，長周期成分とともに除去されてしまう．そこで，実験中に模型および地盤をデジタルビデオカメラにより撮影し，その画像を解析することからも変位記録を求めた．デジタルカメラは模型の東側からX-Z平面を撮影するもの(Didital Handycom DCR-PC100: SONY製)と，模型の上空からX-Y平面を撮影するもの(振動台実験施設の天井に備え付けのもの，CCDカラーカメラIK-642: TOSHIBA製)の2つを用いた．画像解析では，模型の側面および上面に設置した標点を追尾することで変位量が求まる．図–2.51，2.52に各ケースにおいて設置した標点位置を示す．X-Z平面，X-Y平面画像の画像解析におけるサンプリング周波数は使用したデジタルビデオカメラの性能に依存しており，30 Hzである．

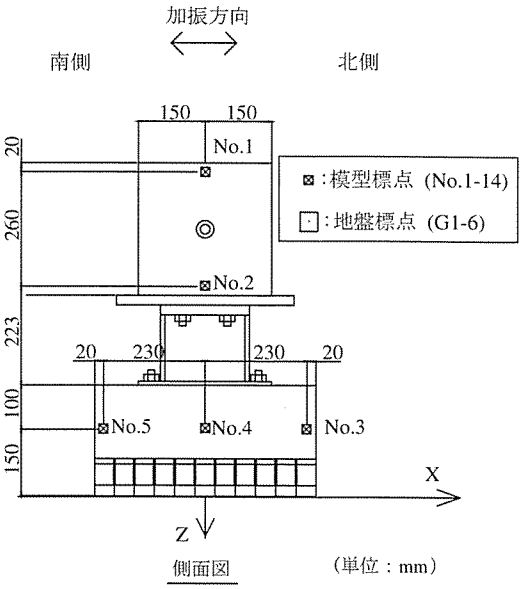
基礎底面中心位置での鉛直変位 v，水平変位 u，X-Z平面上の回転角 θ_Y は，東側から撮影した画像の解析結果を用いて式(2.6)〜式(2.9)で算出した．その際，図–2.49におけるAおよびB点をCase 1ではNo. 6およびNo. 5の標点と読み替え，Case 2ではNo. 5およびNo. 3の標点と読み替えた．また，X-Y平面上の回転角 θ_Z については，模型を上方から撮影した画像の解析結果を用いて式(2.10)で算出した．その際，図–2.50におけるC点は，Case 1ではNo. 11とNo. 14を，Case 2ではNo. 10とNo. 13をそれぞれ平均化した座標位置と読み替えた．一方，D点は，Case 1ではNo. 12とNo. 13を，Case 2ではNo. 11とNo. 12をそれぞれ平均化した座標位置と読み替えた．

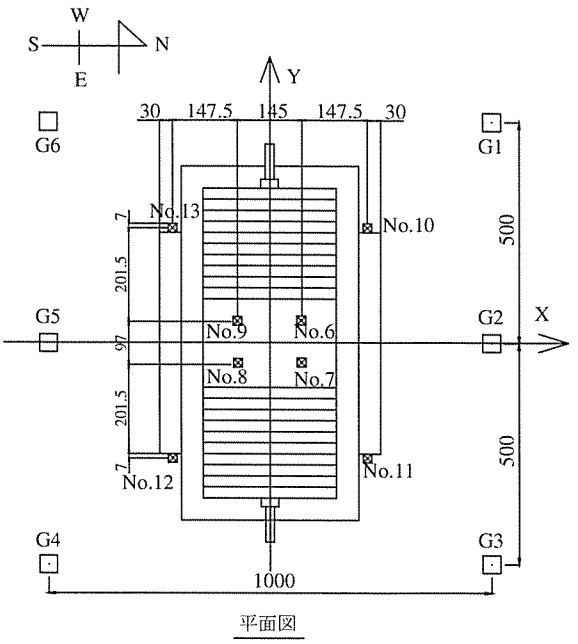
ただし，Case 1-Step 2では，z軸まわりの回転が見られたため，側面画像から水平変位 u を正確に算出することが出来ない．そこで，X-Y平面を撮影(上空から撮影)した画像から基礎四隅の標点(No. 11, 12, 13, 14)のX方向変位の平均値を基礎上面中心位置での変位とし，式(2.8)より基礎底面中心位置の水平変位 u を求めた．以上の手順で画像解析により求めた各変位時刻歴はt=0で変位がゼロではない．そこで，t=0のときの変位を全時刻から減じたものを以て，最終的に用いる時刻歴とした．





図–2.51 Case 1, 標点位置





図–2.52 Case 2, 標点位置

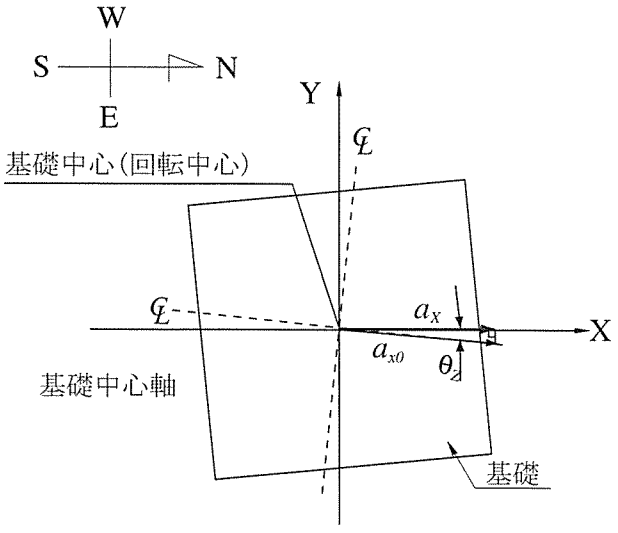
2.12.3 Z 軸周りの回転が水平挙動に与える影響の評価

今回の加振は一方向 (X 方向) であるが，基礎はあらゆる方向への変位が可能である．たとえば，図–3.66 に示すように Case 1 の七峰橋波の加振では基礎底面が X-Y 平面上で反時計まわりに回転挙動を起こした．そのため，側面画像から X 方向の水平変位 u を正確に算出することができない可能性がある．そこで，以下の検討を行った．

Z 軸まわりの回転挙動が X 方向の加速度に与える影響の概念図を図–2.53 に示す．X 軸方向の加速度 a_X は，X-Y 平面上の模型すなわち加速度計の回転角 (Z 軸まわりの回転角) θ_Z と，加速度計で計測された加速度 a_{x0} を用いて式 (2.11) で計算される．

$$a_X = a_{x0} \times \cos\theta_Z \tag{2.11}$$

表–2.11 に各加振について求めた a_{x0} と a_X を比較する．ここでは便宜的に，加振中に生じた X-Y 平面上の最大回転を θ_Z とし，X 方向として計測された加速度は加振中に生じた最大加速度を代入して計算した．また，X-Y 平面上の回転角 θ_Z は画像解析処理による変位から求めたものである．X 方向として計測された加速度 a_{x0} と X 軸方向に換算される加速度 a_X の誤差 $((a_{x0} - a_X)/a_X)$ は，最も X-Y 平面上の回転角が大きくなった Case 1-Step 2 の加振でも 0.7 % とわずかであり，いずれのケースにおいてもその誤差は無視できる程度の値である．したがって，本資料では X 方向加速度については計測値 a_{x0} をそのまま用いることにしている．



a_X ：X方向加速度
a_{x0} ：X方向として計測される加速度

図–2.53 Z 軸まわりの回転による X 軸方向加速度

表–2.11 a_{x0} と a_X の比較

Case	Step	X-Y 平面上の回転角 (Z 軸まわりの回転角) θ_Z (rad)	X 方向として計測された加速度 (XF+075M) a_{x0} (gal)	X 軸方向に換算した加速度 a_X (gal)	誤差 %
Case 1	Step 2	−0.116	858.7	852.9	0.7
Case 1	Step 4	−0.007	858.1	858.1	0.0
Case 1	Step 5	−0.055	619.7	618.8	0.2
Case 2	Step 2	0.000	708.2	708.2	0.0

2.13 画像解析データとその他の計測データとの同期

ビデオはその他の計測器の計測システムから独立しているので，ビデオで撮影された画像の画像解析により求めた変位とその他の計測器による計測値との同期はそのままではとれていない．また，ビデオのサンプリングタイムは 0.033 秒 (1 秒間に 30 回撮影) であるのに対して，ビデオ以外の計測器のサンプリングタイムは，七峰橋波を入力した加振ケースで 0.002 秒，その他の加振ケースで 0.001 秒である．したがって，画像解析により得られる変位とその他の計測器による計測値の関係を調べるときには，画像データとビデオ以外の計測器で計測されたデータとの同期をとる必要がある．そこで，画像データの時刻を一定量シフトさせることで画像データと画像データ以外の計測値の同期をとった．前述のように，本実験では X-Z 平面と X-Y 平面の 2 つの平面の撮影が行われた．これらの画像の同期補正は，まず X-Z 平面画像のデータを加速度計記録に合うように補正した後，X-Y 平面画像のデータを同期補正済みの X-Z 平面画像に合うように補正するという手順で行われた．以下に X-Z 平面画像の補正方法，X-Y 平面の補正方法の詳細を記す．なお，画像データの時刻シフト量の算出には変位の時刻歴を用いた．

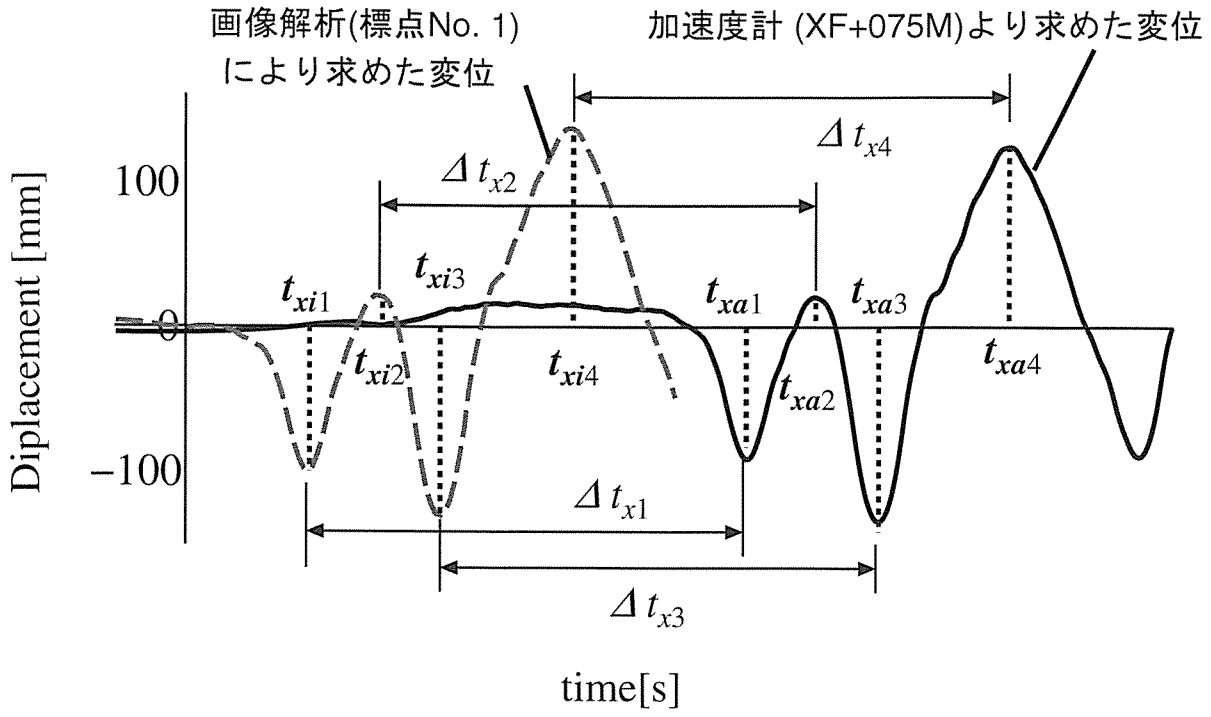
1. X-Z 平面画像

X-Z 平面画像のデータと加速度計記録の同期補正は，画像解析および加速度の 2 階積分により求めた模型天端中心位置の X 方向変位時刻歴および基礎部北端の Z 方向変位時刻歴を用いて，以下に示す手順で行われた．

1-(1) まず，模型の東側から撮影された X-Z 平面画像の画像解析により，模型天端中心位置の X 方向変位の時刻歴を求める．画像解析による模型天端中心位置の X 方向変位は，Case 1 の場合は標点 No. 1 と標点 No. 4 の X 方向変位の平均とし，Case 2 の場合は標点 No. 1 の X 方向変位とした．次に，模型天端中心に設置した加速度計の計測値を 2 階積分することにより，模型天端中心位置の X 方向変位の時刻歴を求める．加速度の 2 階積分により X 方向変位の時刻歴を求める際には，Case 1, 2 とも，XF+075M によって計測された加速度を用いた．Case 2-Step 2 の場合に上述の方法で求められた模型天端中心位置の X 方向変位の時刻歴を図–2.54 に示す．図中の点線および実線で示す波形は，それぞれ画像解析および加速度の 2 階積分により求めた模型天端中心位置の X 方向変位の時刻歴である．

1-(2) このようにして求められた画像解析および加速度 2 階積分による模型天端中心位置の X 方向変位の時刻歴のそれぞれについて，最大の振幅が生じる時刻 (図–2.54 中の t_{xi4}, t_{xa4}) と，その直前の 3 つの振幅のピークが発生する時刻 (図–2.54 中の t_{xi1}〜t_{xi3}, t_{xa1}〜t_{xa3}) を求める．

1-(3) 上記 1-(1), 1-(2) の方法で得られた画像解析により求めた変位時刻歴の 4 つのピーク点 (t_{xi1}, t_{xi2}, t_{xi3}, t_{xi4}) と，加速度計の記録を 2 階積分して求めた変位時刻歴の 4 つのピーク点 (t_{xa1}, t_{xa2}, t_{xa3}, t_{xa4}) について，対応する点同士の時刻差 (図–2.54 中の Δt_{x1}, Δt_{x2}, Δt_{x3}, Δt_{x4}) を求める．それぞれの実験ケースにおいて求められた模型天端中心位置の X 方向



図–2.54 画像解析と加速度2階積分により求められた模型天端中心位置のX方向変位時刻歴 (Case 2-Step 2の例)

変位の8つのピーク点と，対応する点同士の時刻差を表–2.12に示す.

1-(4) 模型基礎部分の北側端部のZ方向変位についても画像解析と加速度2階積分により変位時刻歴を求め，上記の1-(2)〜1-(3)と同様の処理を行う．画像解析によりZ方向変位時刻歴を算出する際は，Case 1の場合は標点No. 5，Case 2の場合はNo. 3のデータを用いた．また，加速度の2階積分によりZ方向変位を算出する際は，Case 1, 2ともにZF+02WNによって計測された加速度を用いた．ただし，Case 1-Step 2については，基礎北端部のZ方向変位時刻歴の波形が細かすぎてピーク値の判別ができなかった．Case 1-Step 2以外の実験ケースにおいて求められた基礎北側端部のZ方向変位の8つのピーク点と，対応する点同士の時刻差を表–2.13に示す.

1-(5) 最後に，1-(3)で求められたX方向変位時刻歴の4つの時刻差と，1-(4)で求められたZ方向変位時刻歴の4つの時刻差を用いて，同期補正に用いる時刻のシフト量を求める．まず，それぞれのケースにおいて，X方向変位時刻歴より求めた4つの時刻差 (Δt_{x1}〜Δt_{x4}) の平均値，Z方向変位時刻歴より求められた4つの時刻差 (Δt_{z1}〜Δt_{z4}) の平均値をそれぞれ計算する．また，それらのデータの精度を確認するため，標準偏差を計算する．求められたX方向，Z方向変位のピーク点の時刻差の平均値と標準偏差を，それ

ぞれ表–2.12, 2.13 にあわせて示す．そして，それぞれのケースについて X 方向変位時刻歴より求めた時刻差の平均値と Z 方向変位時刻歴より求めた時刻差の平均値についてさらに平均をとり，これを時刻シフト量とする．求められた X-Z 平面画像の時刻シフト量を，後述する X-Y 平面画像の時刻シフト量とともに表–2.15 に示す．ただし，前述のように Case 1-Step 2 は Z 方向変位時刻歴のピーク値の算出できなかったので，X 方向変位時刻歴より求めた 4 つの時刻差の平均値を時刻シフト量とした．また，Case 1-Step 5 は，X 方向変位時刻歴の標準偏差が他のケースと比べて著しく大きかったこと，Z 方向変位時刻歴の Δt_{z3}, Δt_{z4} は転倒直前のデータであり，画像解析と加速度 2 階積分により求めた変位時刻歴の波形が著しく異なっていたことからこれらのデータは用いず，Z 方向変位時刻歴の Δt_{z1}, Δt_{z2} の平均値を時刻シフト量とした．以後，X-Z 平面画像の画像解析より求めた変位時刻差として，それぞれの画像について表–2.15 に示すシフト分だけ時間方向にシフトさせ，加速度積分より求めた変位時刻差と同期をとった値を用いる．

2. X-Y 平面画像

X-Y 平面画像の同期補正は，上述の補正で用いた X-Z 平面画像の画像解析より求めた模型天端中心位置の X 方向変位時刻歴を同期補正したデータに，X-Y 平面画像の画像解析より求めた模型天端中心位置の X 方向変位時刻歴をあわせることで行われた．

2-(1) まず，X-Y 平面画像の画像解析により，模型天端中心位置の X 方向変位を求める．各時刻の変位は，Case 1 の場合は標点 No. 7, 8, 9, 10 の，Case 2 の場合は標点 No. 6, 7, 8, 9 の X 方向変位の値の平均とした．そして，前述の 1-(2) で X-Z 平面画像に対して行った処理と同じように，最大の振幅が生じる点の時刻と，その直前の 3 つの振幅のピーク点の時刻を求める．

2-(2) 上記 2-(1) で求められた X-Y 平面画像の模型天端中心位置の X 方向変位の 4 つのピーク値と，前述の 1-(2) で求められた X-Z 平面画像の模型天端中心位置の X 方向変位の 4 つのピーク値に対して同期補正を行った値について，前述の 1-(3) で示した要領で対応する点同士の時刻差を求める．このようにして求められたそれぞれのピーク点の時刻，対応する点同士の時刻差，それらの時刻差の平均値および標準偏差を表–2.14 に示す．

2-(3) X-Y 平面画像の場合は X-Z 平面画像と異なり，標準偏差が著しく大きいものや，データとして不適切なものが無かったので，求められた時刻差の平均値を時刻シフト量とした．最終的に求められた X-Y 平面画像の時刻シフト量を表–2.15 に示す．以後，X-Z 平面画像の画像解析より求めた変位時刻差として，それぞれの画像について表–2.15 に示すシフト分だけ時間方向にシフトさせた値を用いることとする．

本節の冒頭や，上述の 1-(5), 2-(3) に示したように，画像データは 1 秒間に 30 回撮影 (0.033… 秒に 1 回) される．一方，その他のセンサーのデータは七峰橋波で 0.002 秒ピッチ，その他のケース

で0.001秒ピッチのデータである．そこで，画像解析で求めた変位と他のセンサーの計測変位の関係を図化する際には，画像解析で得たデータについては各時間ステップの間に値は線形に変化するものとして，処理した．

以上の手順で画像解析により求めた各変位時刻歴はt=0で変位がゼロではない．そこで，t=0のときの変位を全時刻から減じたものを以て，最終的に用いる時刻歴とした．

表–2.12 加速度積分変位とX-Z平面画像解析処理変位の時刻差 (模型天端中心位置のX方向変位)

実験ケース		比較時刻	X方向		
Case	Step		加速度積分変位ピーク点発生時刻 t_{xa} (sec)	X-Z平面画像解析変位ピーク点発生時刻 t_{xi} (sec)	対応するピーク点同士の時刻差 Δt_x(sec)
Case 1	Step 2	1	36.972	28.767	8.206
		2	38.328	30.133	8.195
		3	42.148	33.933	8.215
		4	44.136	35.933	8.203
		4つの時刻差 (Δt_{x1}, Δt_{x2}, Δt_{x3}, Δt_{x4}) の平均			8.204
		標準偏差			0.007
Case 1	Step 4	1	5.419	4.367	1.052
		2	5.918	4.867	1.051
		3	6.529	5.400	1.129
		4	7.317	6.233	1.084
		4つの時刻差 (Δt_{x1}, Δt_{x2}, Δt_{x3}, Δt_{x4}) の平均			1.079
		標準偏差			0.032
Case 1	Step 5	1	5.100	4.233	0.867
		2	5.777	4.733	1.044
		3	6.176	5.433	0.743
		4	6.706	6.133	0.573
		4つの時刻差 (Δt_{x1}, Δt_{x2}, Δt_{x3}, Δt_{x4}) の平均			0.806
		標準偏差			0.172
Case 2	Step 2	1	6.975	3.867	3.108
		2	7.457	4.333	3.124
		3	7.911	4.800	3.111
		4	8.849	5.733	3.116
		4つの時刻差 (Δt_{x1}, Δt_{x2}, Δt_{x3}, Δt_{x4}) の平均			3.115
		標準偏差			0.006

表–2.13 加速度積分変位と X-Z 平面画像解析処理変位の時刻差 (模型基礎部北側端部の Z 方向変位)

実験ケース		比較時刻	Z 方向		
Case	Step		加速度積分変位ピーク点発生時刻 t_{za} (sec)	X-Z 平面画像解析変位ピーク点発生時刻 t_{zi} (sec)	対応するピーク点同士の時刻差 Δt_z (sec)
Case 1	Step 4	1	6.578	5.533	1.045
		2	8.413	7.367	1.046
		3	9.315	8.267	1.048
		4	9.918	8.900	1.018
		4 つの時刻差 (Δt_{z1}, Δt_{z2}, Δt_{z3}, Δt_{z4}) の平均			1.039
		標準偏差			0.012
Case 1	Step 5	1	6.269	4.333	1.936
		2	6.895	4.933	1.962
		3	7.392	5.500	1.892
		4	8.039	6.233	1.806
		4 つの時刻差 (Δt_{z1}, Δt_{z2}, Δt_{z3}, Δt_{z4}) の平均			1.899
		標準偏差			0.059
Case 2	Step 2	1	10.496	7.333	3.163
		2	10.693	7.567	3.126
		3	11.077	7.967	3.110
		4	11.244	8.133	3.111
		4 つの時刻差 (Δt_{z1}, Δt_{z2}, Δt_{z3}, Δt_{z4}) の平均			3.128
		標準偏差			0.021

表–2.14 X-Z 平面画像解析処理変位と X-Y 平面画像解析処理変位の時刻差 (模型天端中心位置の X 方向変位)

実験ケース		比較時刻	X 方向		
Case	Step		X-Z 平面画像解析変位ピーク点発生時刻 (sec)	X-Y 平面画像解析変位ピーク点発生時刻 (sec)	対応するピーク点の時刻差 (sec)
Case 1	Step 2	1	28.767	28.400	0.367
		2	30.133	29.767	0.367
		3	33.933	33.567	0.367
		4	35.933	35.567	0.367
		4 つの時刻差の平均			0.367
		標準偏差			0.000
Case 1	Step 4	1	4.367	3.867	0.500
		2	4.867	4.333	0.533
		3	5.400	4.900	0.500
		4	6.233	5.700	0.533
		4 つの時刻差の平均			0.517
		標準偏差			0.017
Case 1	Step 5	1	4.233	3.433	0.800
		2	4.733	3.900	0.833
		3	5.433	4.600	0.833
		4	6.133	5.300	0.833
		4 つの時刻差の平均			0.825
		標準偏差			0.029
Case 2	Step 2	1	3.867	4.867	−1.000
		2	4.333	5.367	−1.033
		3	4.800	5.800	−1.000
		4	5.733	6.733	−1.000
		4 つの時刻差の平均			−1.008
		標準偏差			0.014

表–2.15 X-Z 平面画像と X-Y 平面画像の時刻シフト量

実験ケース	時刻シフト量 (sec)	
	X-Z 平面画像	X-Y 平面画像
Case 1-Step 2	8.204	0.367
Case 1-Step 4	1.059	0.517
Case 1-Step 5	1.949	0.825
Case 2-Step 2	3.128	−1.008

3. 実験結果

3.1 地盤作成結果

表–3.1 に，各実験ケースにおける作成地盤の密度 ρ および相対密度 D_r を示す．各ケースで D_r=80 %を目標に地盤を作成した．その結果，Case 1, Case 2 ともに目標とする相対密度 D_r=80 %の地盤を作成することができた．

表–3.1 地盤作成結果

Case	地盤密度 ρ (g/cm^3)											相対密度
	1 層	2 層	3 層	4 層	5 層	6 層	7 層	8 層	9 層	10 層	全層	D_r (%)
Case 1	1.604	1.611	1.610	1.604	1.601	1.601	1.602	1.604	1.609	1.605	1.605	81
Case 2	1.606	1.607	1.601	1.601	1.601	1.601	1.603	1.605	1.602	1.609	1.603	80

3.2 加振後の模型周辺地盤沈下量

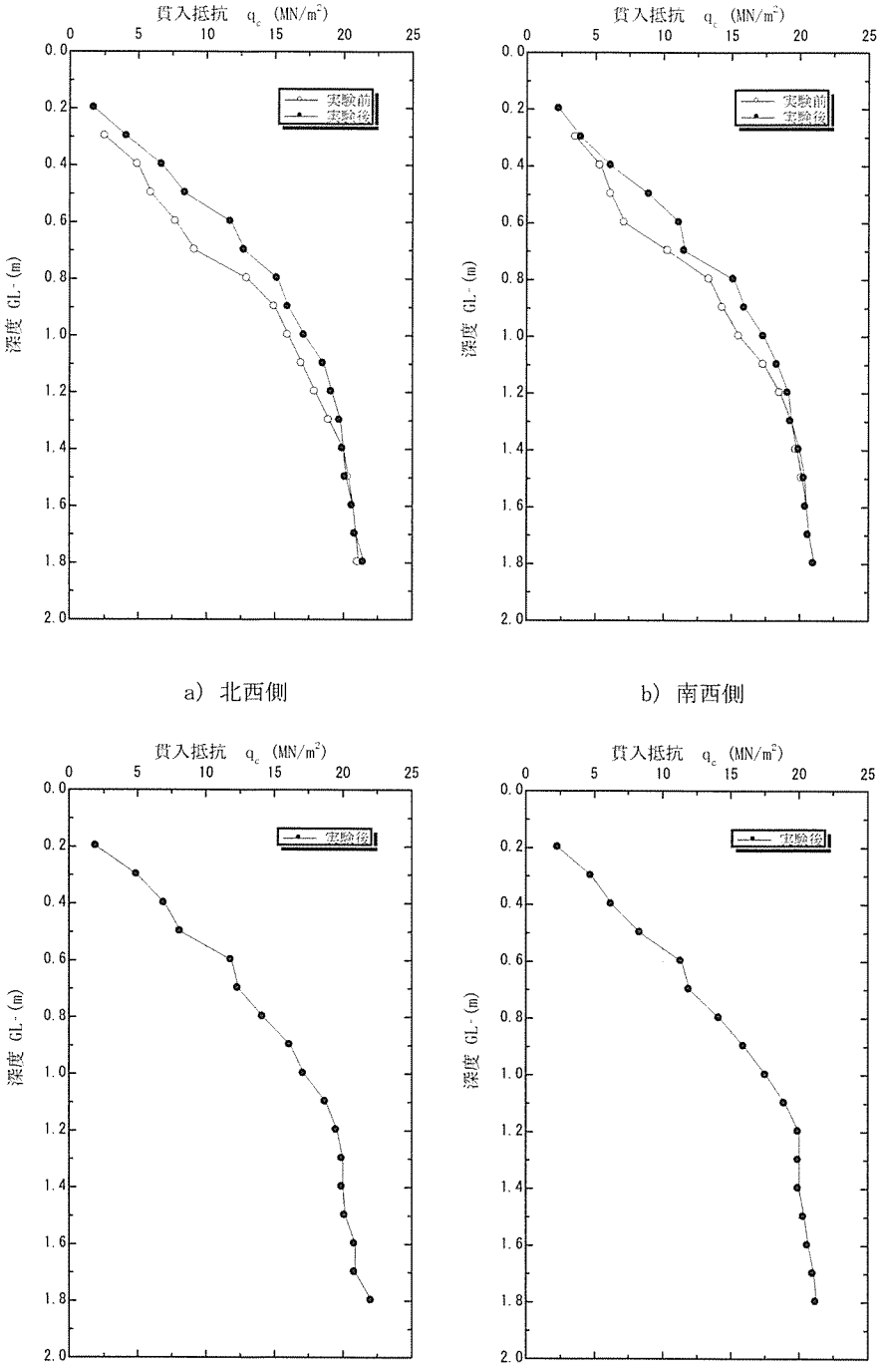
表–3.2 に，Case 1-Step 2 の七峰橋波および Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅を 80 %にして入力した場合) 加振後の模型周辺地盤沈下量を示す．模型周辺地盤の沈下量は，図–2.32 に示す 48 点における実験前と実験後の地表面高さの差を平均した値である．周辺地盤の沈下量は，七峰橋波で −1 mm (標準偏差 σ=3.6)，神戸波 (振幅を 80 %にして入力した場合) では 0 mm (標準偏差 σ=1.8) であった．厳密には模型の残留変位量は周辺地盤との相対変位量として評価するべきであるが，以上の結果から周辺地盤の沈下量は無視することとする．

表–3.2 加振後模型周辺地盤沈下量

実験ケース Case i-Step j	加振波	周辺地盤沈下量 (mm)	標準偏差 σ
Case 1-Step 2	七峰橋波	−1	3.6
Case 2-Step 2	神戸波 (振幅 80 %)	0	1.8

3.3 サウンディング結果

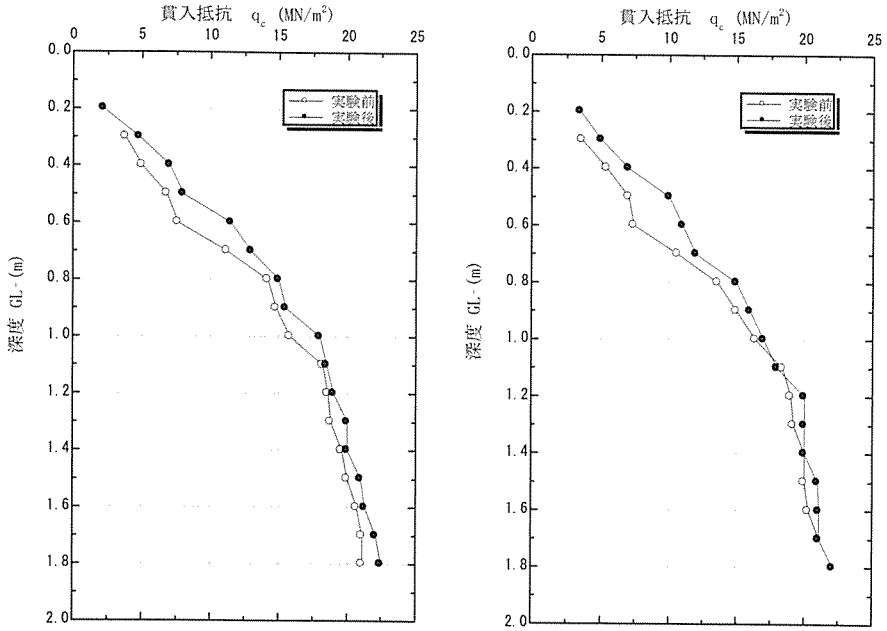
図–3.1, 3.2 に，実験地盤のサウンディング結果を示す．サウンディング方法およびサウンディング位置は，「2.10.1 サウンディング」に示す通りである．Case 1, Case 2 ともに，実験終了後に計測された貫入抵抗値 q_c (MN/m^2) は，実験開始前に計測された値に比べて若干大きくなる傾向が見られた．



a) 北西側　　b) 南西側

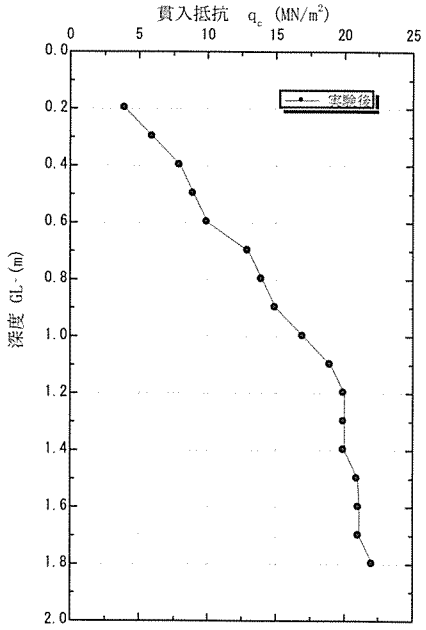
c) 北東側　　d) 南東側

図–3.1 オランダ式二重管コーン貫入試験結果 (Case 1)

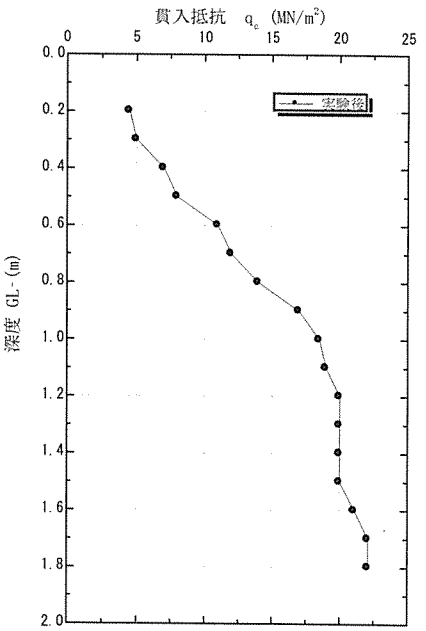


a) 北西側

b) 南西側



c) 北東側



d) 南東側

図–3.2 オランダ式二重管コーン貫入試験結果 (Case 2)

3.4 S 波速度計測結果

表–3.3 に，S 波速度の計測結果を示す．また，S 波速度 (V_s) から求めたせん断弾性係数 G を示す．せん断弾性係数の算出において使用した S 波速度は，西側 (加速度計 XG-02W～XG-20W で計測) と東側 (加速度計 XG-02E～XG-20E で計測) のそれぞれで測定した S 波速度を平均化した値である．せん断弾性係数の算出は式 (3.1) を用いた．ここで，ρ は地盤の密度であり，各ケースにおける地盤作成時の結果を用いた (表–3.1 参照)．

$$G = \rho V_s^2 \tag{3.1}$$

表–3.3 S 波速度計測結果

Case	計測時期	S 波速度 V_s (m/s)			地盤密度 ρ (kg/m^3)	せん断弾性係数 G (MN/m^2)
		西側 (XG-W)	東側 (XG-E)	平均値		
Case 1	実験前	227	233	230	1605	85
	Step 1 スウィープ波加振後	245	236	241	1605	93
	Step 2 七峰橋波加振後	248	241	245	1605	96
Case 2	実験前	231	226	229	1603	84
	Step 2 神戸波 (振幅 80 %) 加振後	248	241	245	1603	99

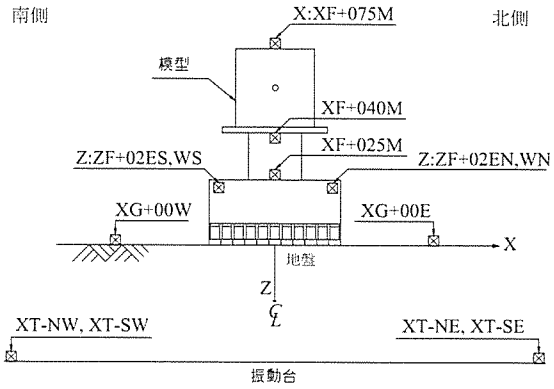
3.5 共振実験結果

スウィープ波(「2.7 実験ケース」参照)を振動台に入力し，共振実験を行った．伝達関数を振動台，地表面，模型の振動のパワースペクトルの比として算出した．振動台のX方向振動に関するパワースペクトルは，図–3.3に示すXT-NW, XT-NE, XT-SW, XT-SEの4点それぞれの加速度時刻歴を用いて求めたパワースペクトルを各振動数で平均化したものである．また，地表面のX方向振動に関するパワースペクトルは，GX-00W, GX-00Eの2点それぞれの加速度時刻歴を用いて求めたパワースペクトルを各振動数で平均化したものである．模型のX方向振動に関するパワースペクトルは，天端・柱・基礎の模型中心軸上の点のX方向(XF+075M, XF+040M, XF+025M)それぞれの加速度時刻歴を用いて求めた．さらに，模型基礎部のZ方向振動に関するパワースペクトルは，基礎北側端部についてはZF+02EN, ZF+02WNの2点，基礎南側端部についてはZF+02ES, ZF+02WS 2点のそれぞれのZ方向加速度時刻歴を用いて求めたパワースペクトルを各振動数で平均化したものである．

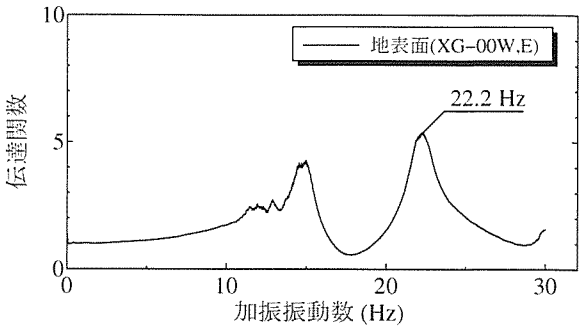
Case 1-Step 1の共振実験の結果を図–3.4～3.7に示す．図–3.4は振動台のX方向振動に対する地表面のX方向振動の伝達関数を示す．共振振動数は22.2 Hzであり，これが地盤の固有振動数と考えられる．この振動数は基礎のスウェイ挙動に関する共振振動数と考えられる．一方，地盤の固有振動数f_gは「3.4 S波速度計測結果」において算出したCase 1実験前のV_s (=230 m/s)と地盤高さh (=2 m)を式(3.2)に代入することでも計算でき，その値は28.8 Hzとなる．両者の地盤固有振動数は近い値となった．

$$f_g = \frac{V_s}{4h} \tag{3.2}$$

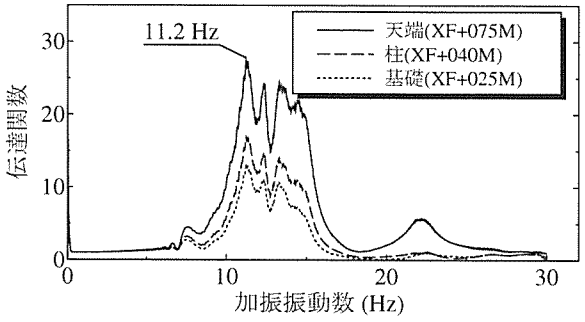
図–3.5は振動台のX方向振動に対する模型各位置のX方向振動の伝達関数，図–3.6は地表面のX方向振動に対する模型のX方向振動の伝達関数である．いずれも模型の伝達関数は11.2 Hz付近で最大となった．一方，図–3.7には，地表面のX方向振動に対する基礎端部のZ方向振動の伝達関数を示す．伝達関数は17.5 Hz付近で最大となった．この振動数は基礎のロッキング挙動に関する共振振動数と考えられる．以上より，模型の共振振動数はスウェイモードが11.2 Hz，ロッキングモードが17.5 Hzであると推測される．



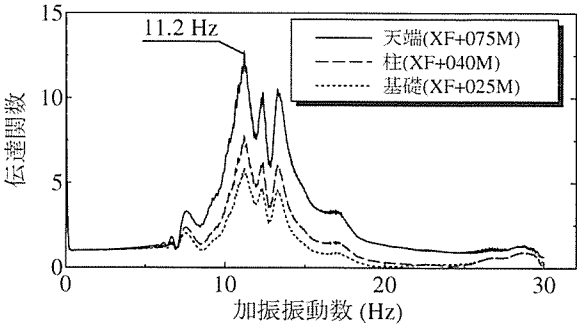
図–3.3 加速度計位置模式図



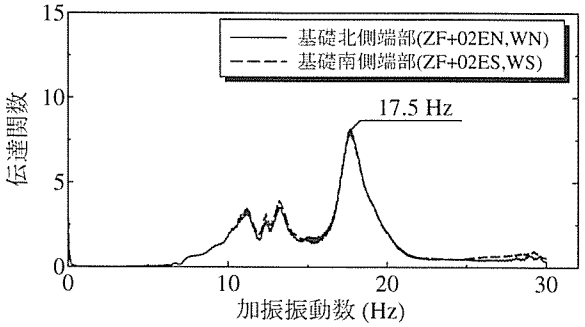
図–3.4 振動台の X 方向の振動に対する地表面の X 方向振動の伝達関数



図–3.5 振動台の X 方向の振動に対する模型の X 方向振動の伝達関数



図–3.6 地表面の X 方向の振動に対する模型の X 方向振動の伝達関数



図–3.7 地表面の X 方向の振動に対する模型の Z 方向振動の伝達関数

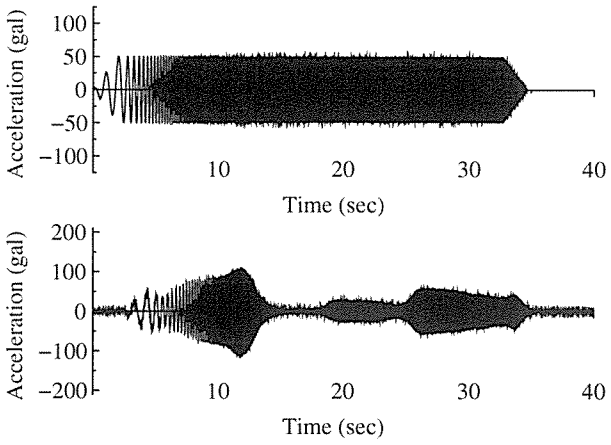
3.6 加速度計測結果

3.6.1 振動台加速度時刻歴

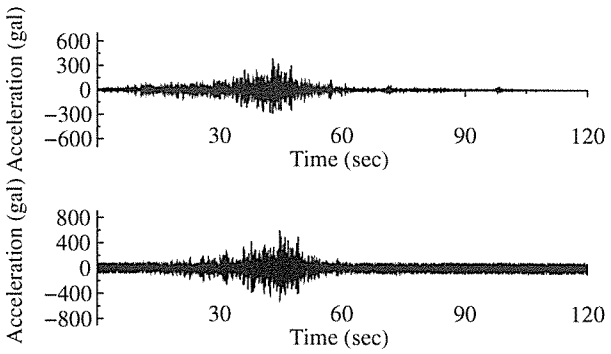
図–3.8～3.15 に振動台で計測された加速度時刻歴を示す．Step ごとに上側に振動台への入力値として設定した加速度波形を，下側に振動台にて出力された実測加速度波形を並べて示した．ここで，実測加速度は，振動台四隅 (XT-NW, XT-NE, XT-SW, XT-SE) で計測された加振方向 (X 方向) の加速度を各時刻において平均した値である．これらの図より，設定入力加速度と，実際に振動台で計測された加速度は異なることがわかる．表–3.4 に，各加振 Step における設定波と実測波の最大・最小加速度を示す．振幅が小さいときには設定加速度よりも実測加振加速度の方が大きくなる傾向が見られる．これは，振動台の振動特性，作成した地盤の振動特性の影響を受けながら振動台が応答した結果であると考えられる．

表–3.4 設定加速度と振動台計測加速度の最大・最小値

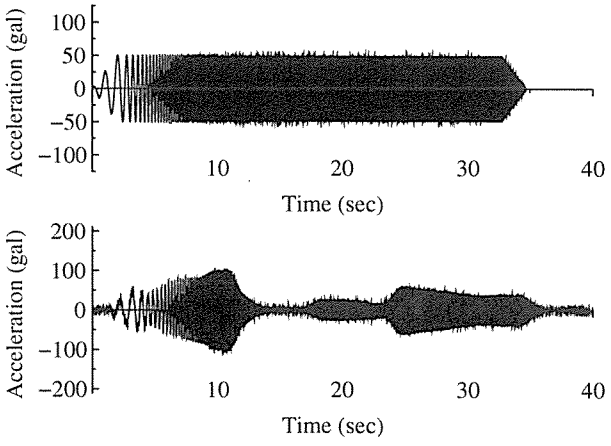
実験ケース		設定加速度		振動台計測加速度	
Case	Step	最大加速度 (gal)	最小加速度 (gal)	最大加速度 (gal)	最小加速度 (gal)
Case 1	Step 1	50.0	−50.0	109.6	−112.1
	Step 2	386.2	−294.5	601.4	−494.4
	Step 3	50.0	−50.0	106.8	−110.1
	Step 4	812.0	−588.1	712.4	−473.4
	Step 5	812.0	−588.1	726.0	−480.6
Case 2	Step 1	50.0	−50.0	110.1	−105.6
	Step 2	649.6	−470.0	557.0	−367.9
	Step 3	50.0	−50.0	113.2	−116.2



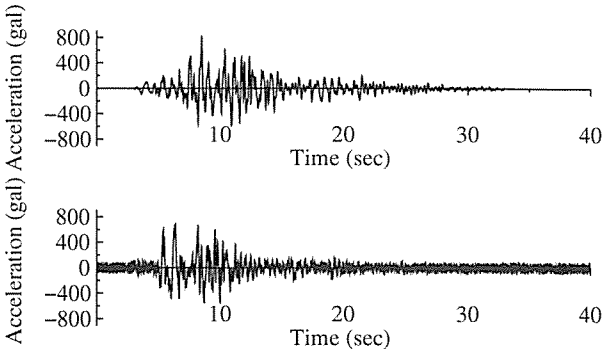
図–3.8 Case 1-Step 1, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値)



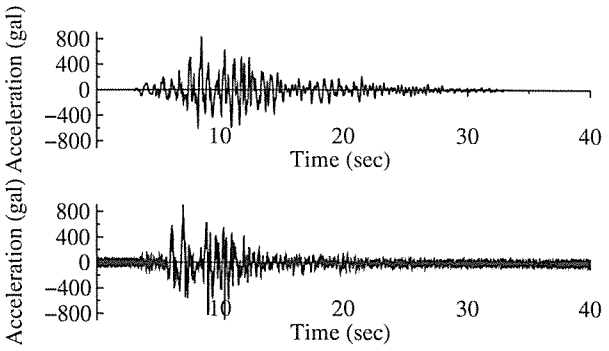
図–3.9 Case 1-Step 2, 七峰橋波 (上段：設定値，下段：実測値)



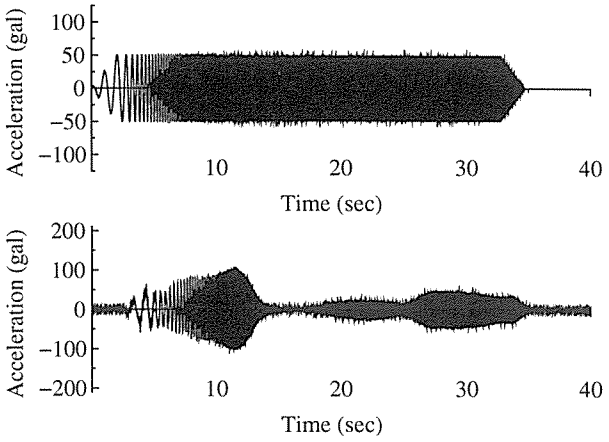
図–3.10 Case 1-Step 3, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値)



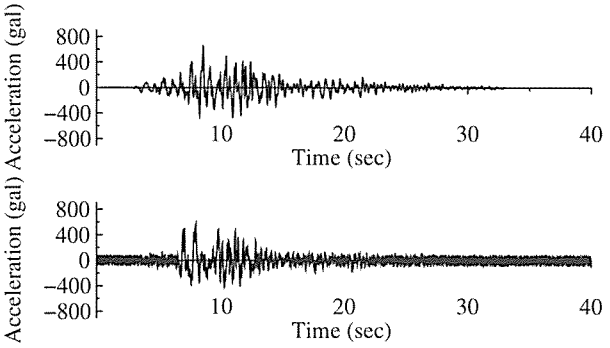
図–3.11 Case 1-Step 4, 神戸波 (上段：設定値，下段：実測値)



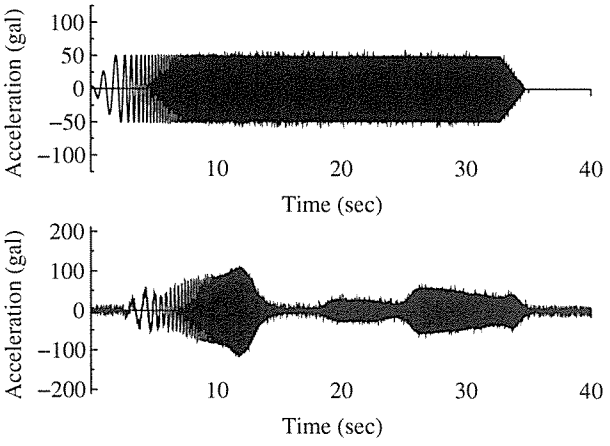
図–3.12 Case 1-Step 5, 神戸波 (上段：設定値，下段：実測値)



図–3.13 Case 2-Step 1, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値)



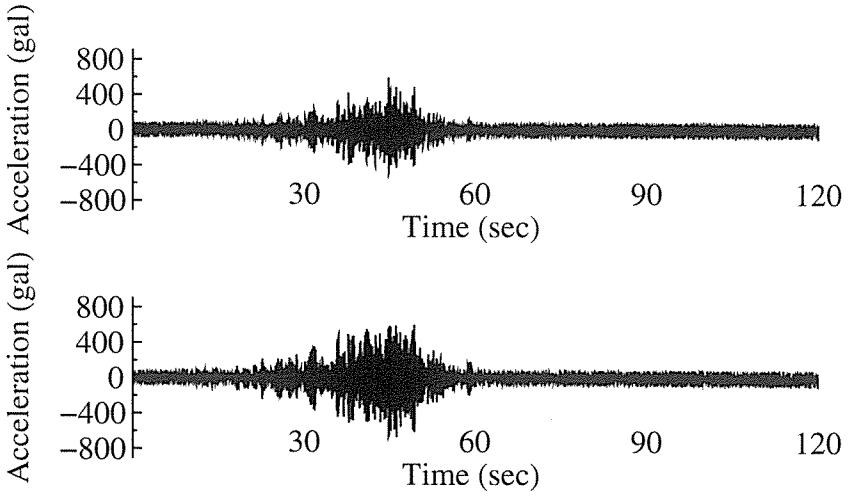
図–3.14 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %) (上段：設定値，下段：実測値)



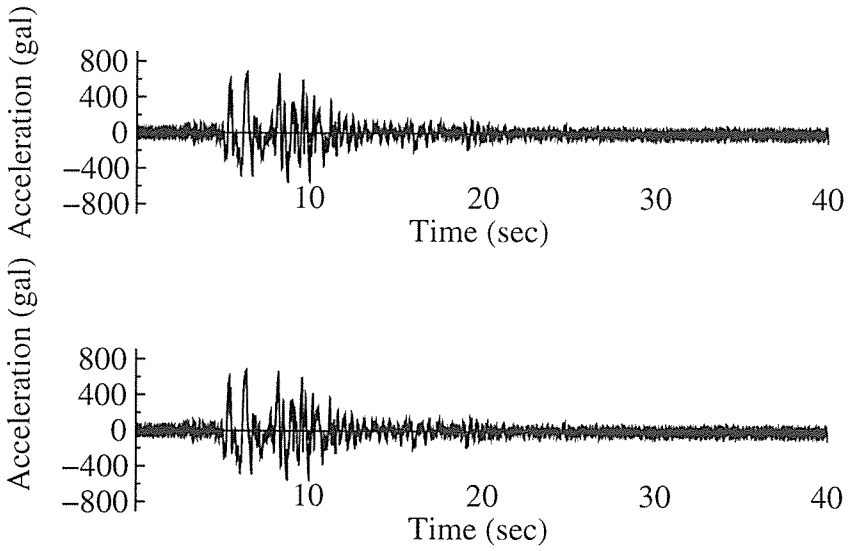
図–3.15 Case 2-Step 3, スウィープ波 (上段：設定値，下段：実測値)

3.6.2 地表面加速度時刻歴

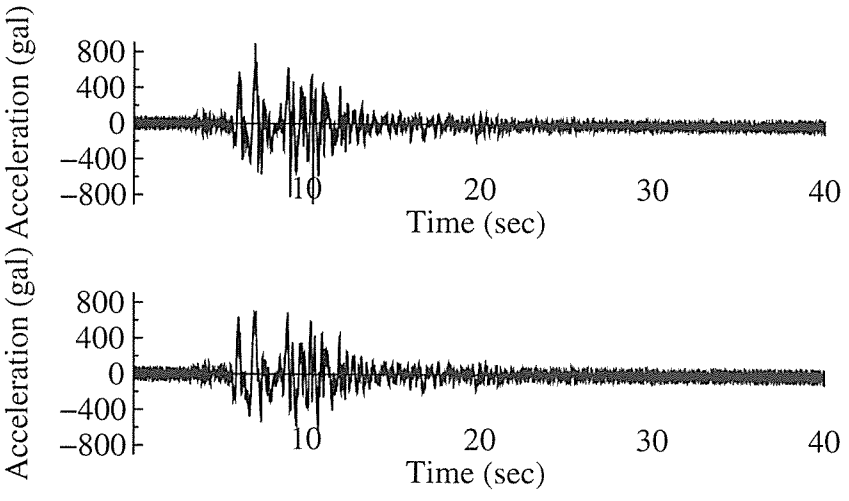
図–3.16～3.19 に地表面で計測された X 方向 (加振方向) 加速度時刻歴を示す．振動台で計測された加速度波形を上側に，地表面で計測された加速度を下側に並べて示した．ここで，地表面で計測された加速度は，地表面で計測された加振方向 (X 方向) の 2 点 (XG-00W, XG-00E) の加速度記録を各時刻において平均した値である．ただし，Case 1-Step 5 については XG-00E の加速度記録のみ用いている．



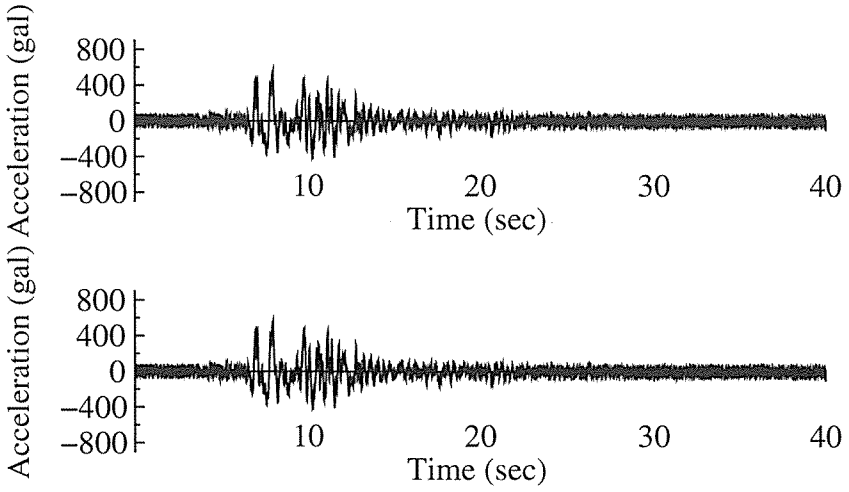
図–3.16 Case 1-Step 2, 七峰橋波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値)



図–3.17 Case 1-Step 4, 神戸波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値)



図–3.18 Case 1-Step 5, 神戸波 (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値)

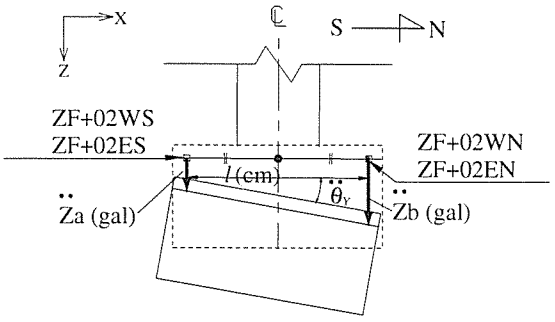


図–3.19 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %) (上段：振動台実測値，下段：地表面実測値)

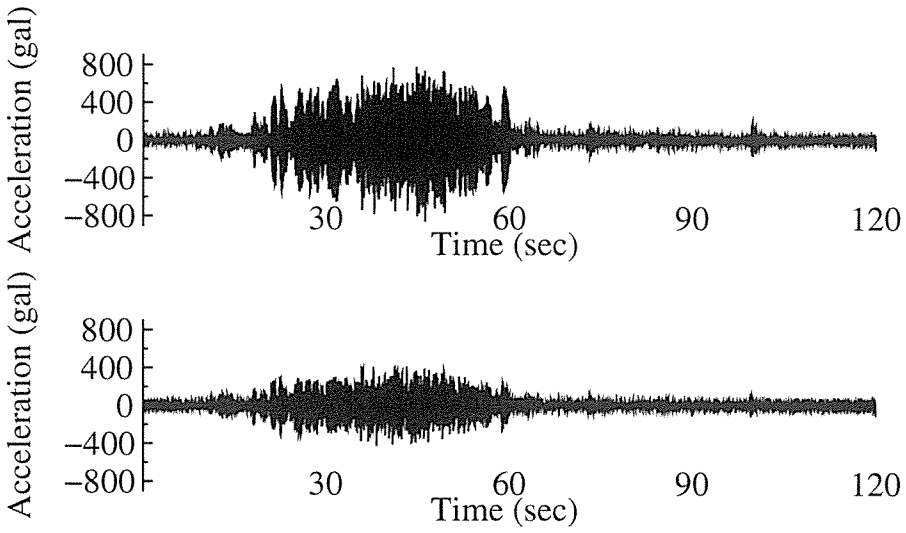
3.6.3 模型の応答加速度時刻歴

図–3.21～3.32 に模型天端および基礎位置で計測された加振方向及び鉛直方向の加速度時刻歴と，計測値を用いて算出される各加速度の時刻歴を示す．Case 1-Step 5 の神戸波による加振では計測開始から約 10 秒程度で模型が転倒したため，転倒するまでの時刻歴を示す．ここで，角加速度の時刻歴は，以下のように算出した．図–3.20 に角加速度算出方法の概念図を示す．角加速度 $\ddot{\theta}_Y$ (rad/s^2) は式 (3.3) で算出する．ここに，$\ddot{Z}_a$ (gal) は基礎南側の鉛直加速度であり ZF+02WS と ZF+02ES のそれぞれで計測された加速度を各時刻に関して平均した値である．$\ddot{Z}_b$ (gal) は基礎北側の鉛直加速度であり ZF+02WN と ZF+02EN のそれぞれで計測された加速度を各時刻に関して平均した値とする．l は加速度計間の距離で 400 mm である．

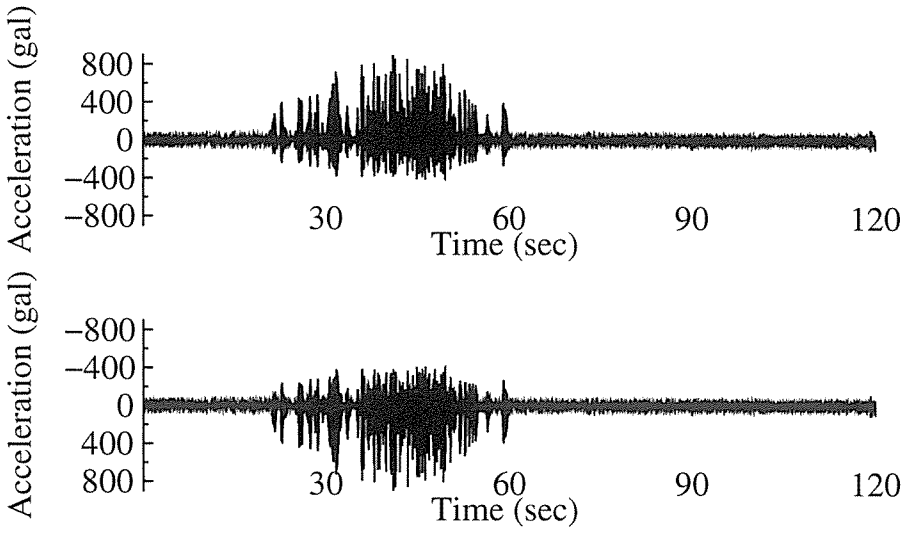
$$\ddot{\theta}_Y = \frac{\ddot{Z}_b - \ddot{Z}_a}{l} \tag{3.3}$$



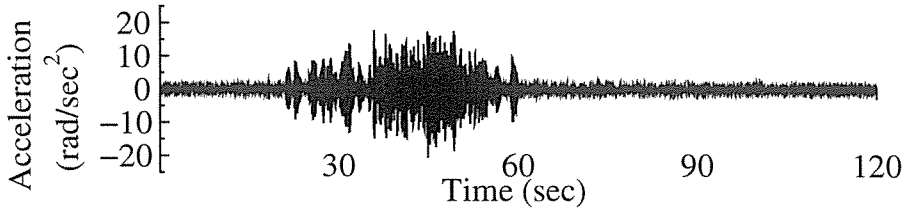
図–3.20 角加速度算出方法の概念図



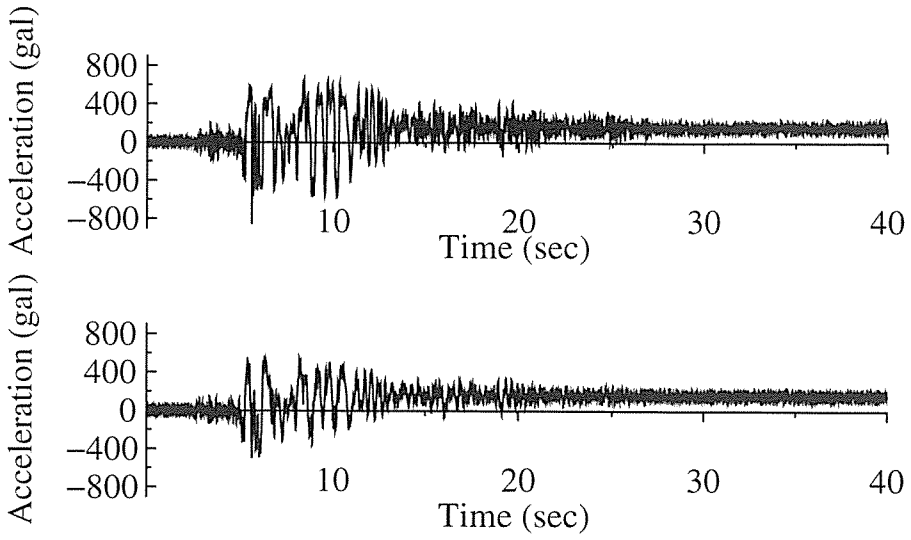
図–3.21 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M), 下段：基礎 (XF+025M))



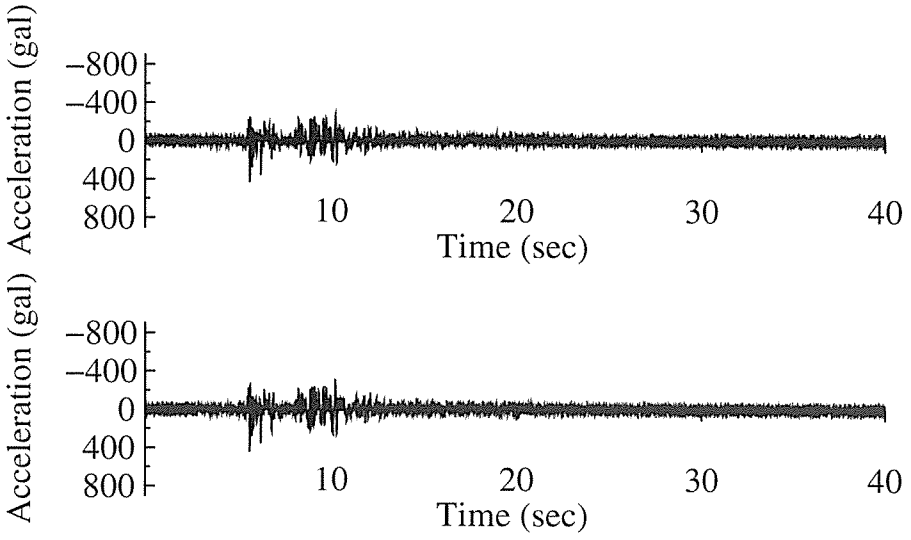
図–3.22 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M), 下段：基礎 (ZF+025M))



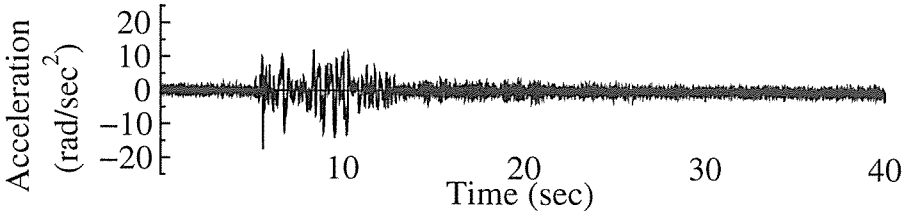
図–3.23 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 角加速度時刻歴



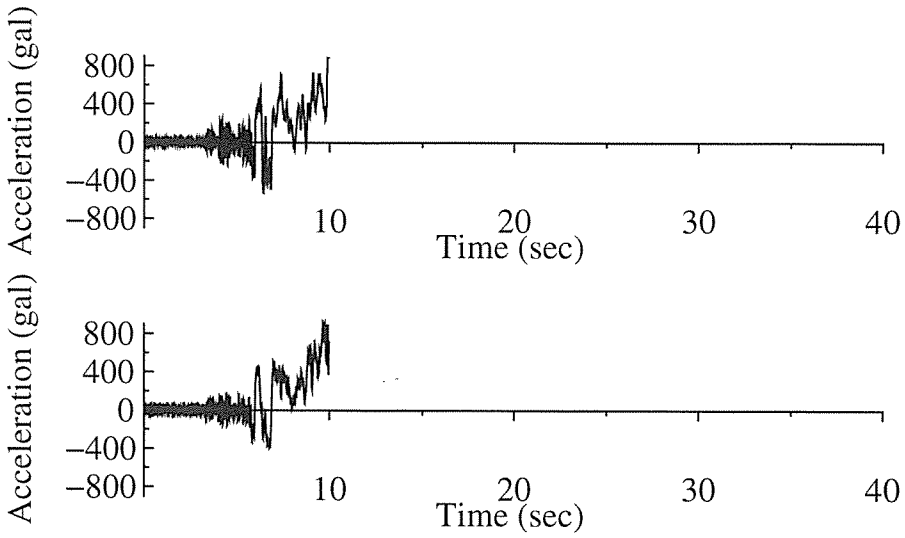
図–3.24 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M), 下段：基礎 (XF+025M))



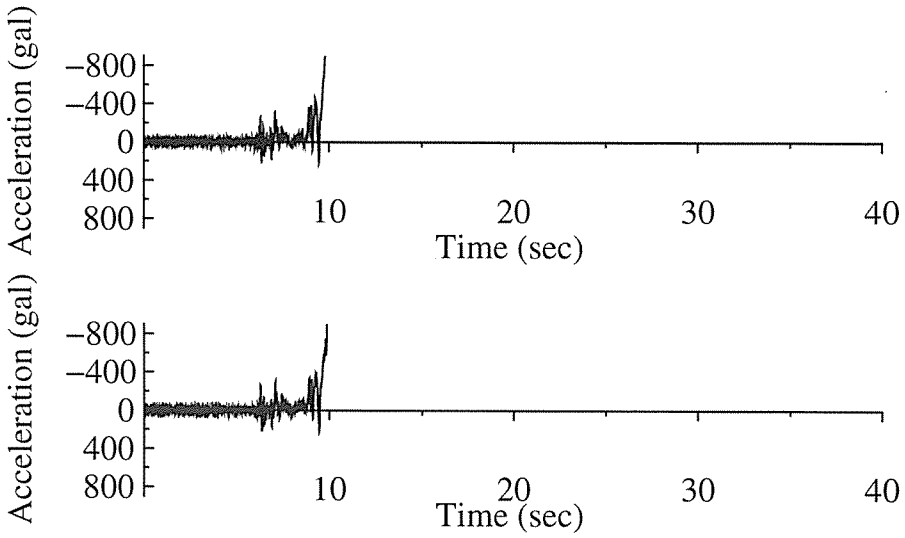
図–3.25 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M), 下段：基礎 (ZF+025M))



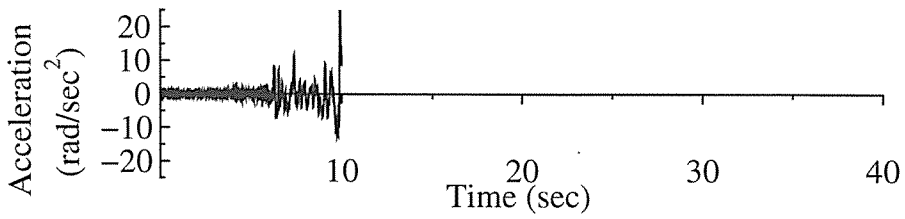
図–3.26 Case 1-Step 4, 神戸波, 角加速度時刻歴



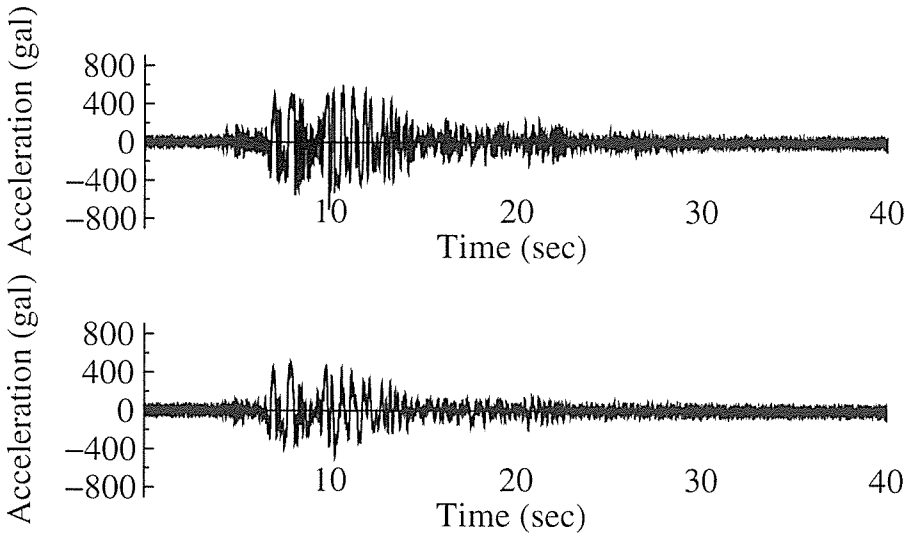
図–3.27 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M), 下段：基礎 (XF+025M))



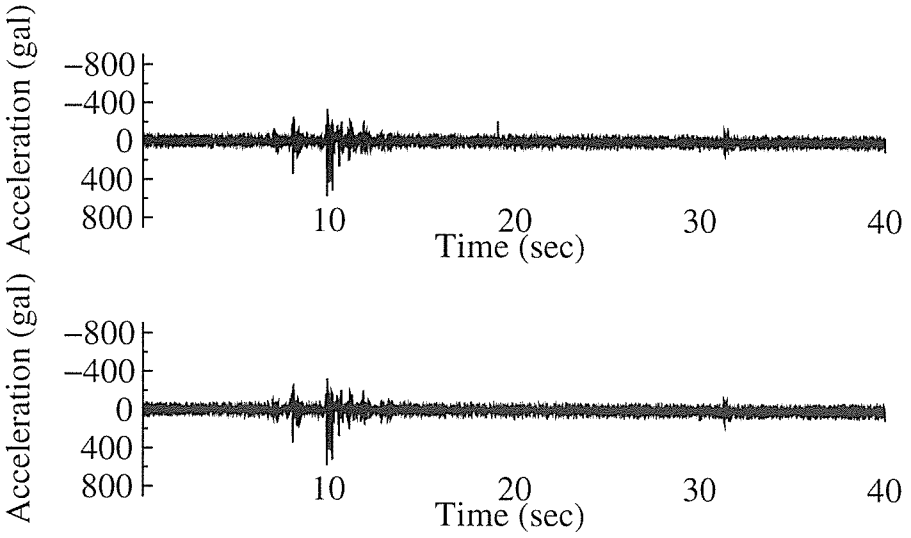
図–3.28 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M), 下段：基礎 (ZF+025M))



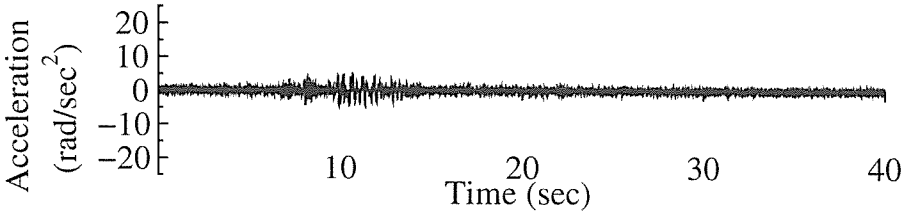
図–3.29 Case 1-Step 5, 神戸波, 角加速度時刻歴



図–3.30 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (XF+075M), 下段：基礎 (XF+025M))



図–3.31 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直方向加速度時刻歴 (上段：模型天端 (ZF+075M), 下段：基礎 (ZF+025M))



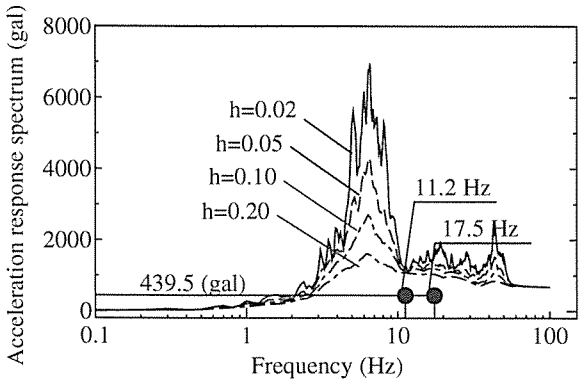
図–3.32 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 角加速度時刻歴

3.6.4 地表面加速度記録の応答スペクトル

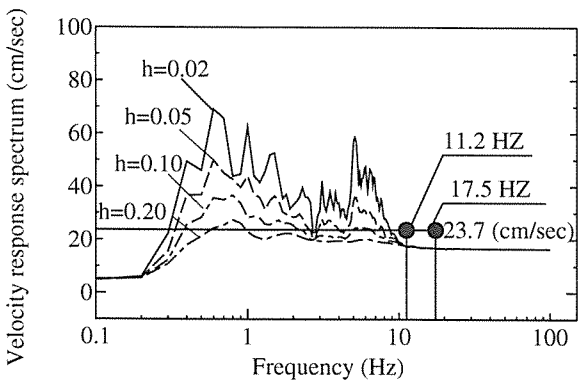
図–3.33～3.40 に各加振において地表面で計測された加速度記録から求めた，加速度応答スペクトルおよび速度応答スペクトルを示す．応答スペクトルは，線形弾性の復元力を有する一質点系の応答を示しているものである．それぞれの図は減衰率 h を 2 %，5 %，10 %，20 %で計算したスペクトルを重ねて描いている．それぞれの図中にプロットしてある点は，実験で得られた模型天端の最大加速度もしくは最大速度であり，「3.5 共振実験結果」で得られた模型の固有振動数 (スウェイモード: 11.2 Hz，ロッキングモード: 17.5 Hz) の 2 つの振動数に対してプロットした．

加速度応答に関しては，図–3.33 の減衰率を 20 %程度見込むことにより計算値は実験値に近づいた．これは，基礎の弾塑性応答を等価な線形一質点系に置き換えたときの減衰定数に相当すると考えられる．一般に，2 から 5 %が減衰率として設定されることが多いが，これは変位レベルが小さい状態での弾性応答を想定している．したがって，基礎の浮上りや地盤の塑性化などに起因する基礎の挙動の非線形性を考慮できる方法を用いた耐震設計を行うことで，上部構造の応答加速度，慣性力が小さくなり，その結果，より合理的な耐震設計結果が得られると期待できる．

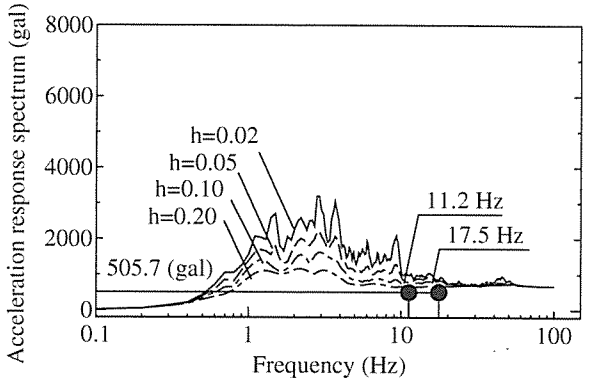
一方，速度応答に関しては実験値と計算値は大きく異なっている．したがって，実験では等価線形系では表すことができないほど非線形性の強い挙動が基礎に大きく表れたと考えられる．「3.17 転倒限界速度の検討」に示すように，応答速度は基礎の転倒を照査するための重要なパラメーターである．以上より，大地震時の直接基礎の耐震性の照査を合理的に行うためには，非線形の時刻歴応答解析の適用性を検討していく必要がある．



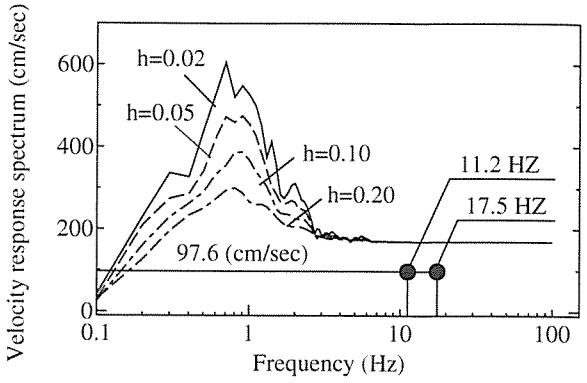
図–3.33 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 地表面波加速度応答スペクトル



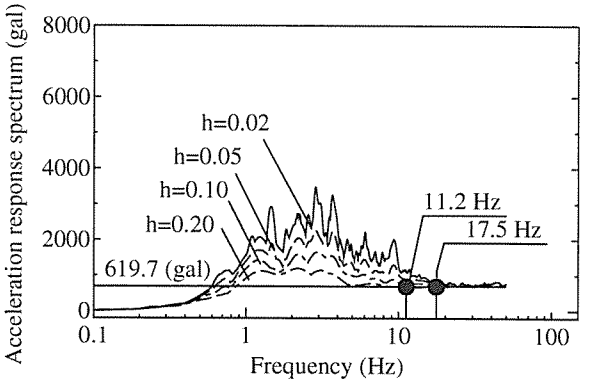
図–3.34 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 地表面波速度応答スペクトル



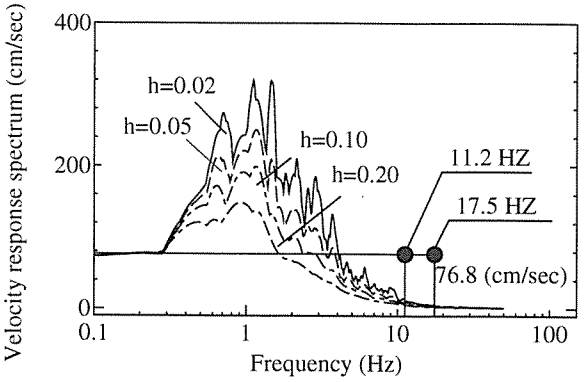
図–3.35 Case 1-Step 4, 神戸波, 地表面波加速度応答スペクトル



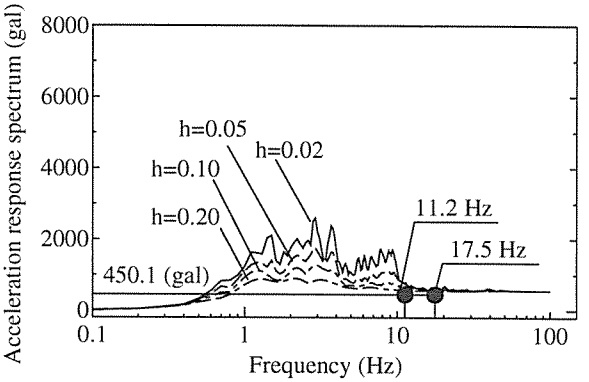
図–3.36 Case 1-Step 4, 神戸波, 地表面波速度応答スペクトル



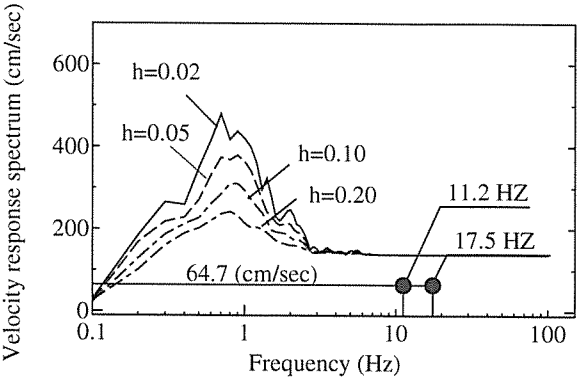
図–3.37 Case 1-Step 5, 神戸波, 地表面波加速度応答スペクトル



図–3.38 Case 1-Step 5, 神戸波, 地表面波速度応答スペクトル



図–3.39 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 地表面波加速度応答スペクトル

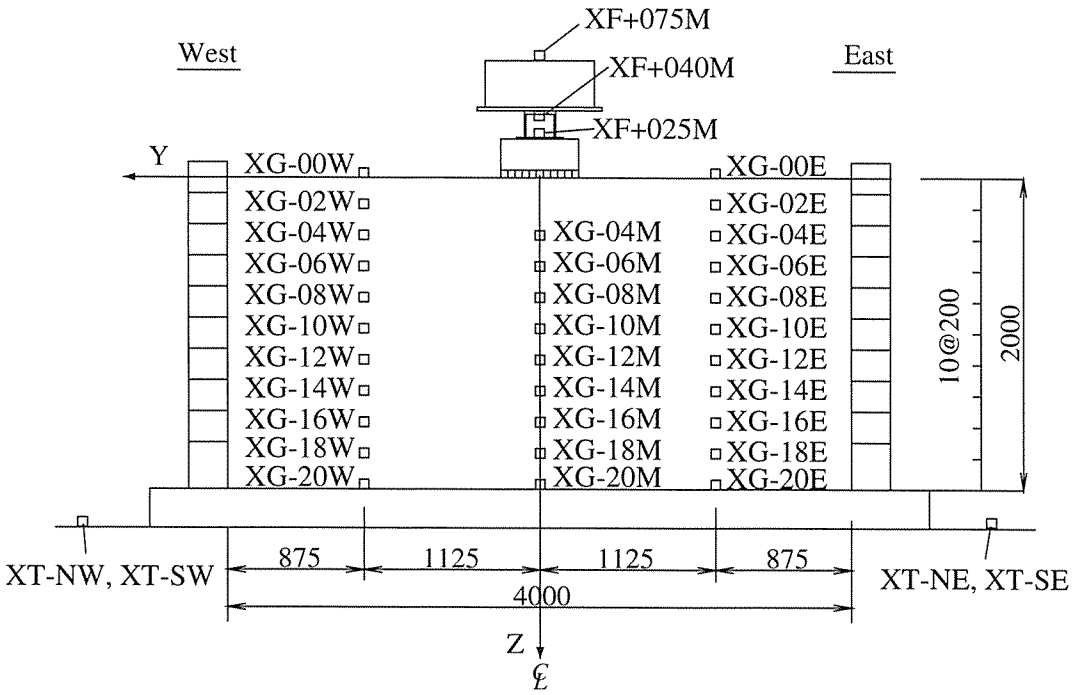


図–3.40 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 地表面波速度応答スペクトル

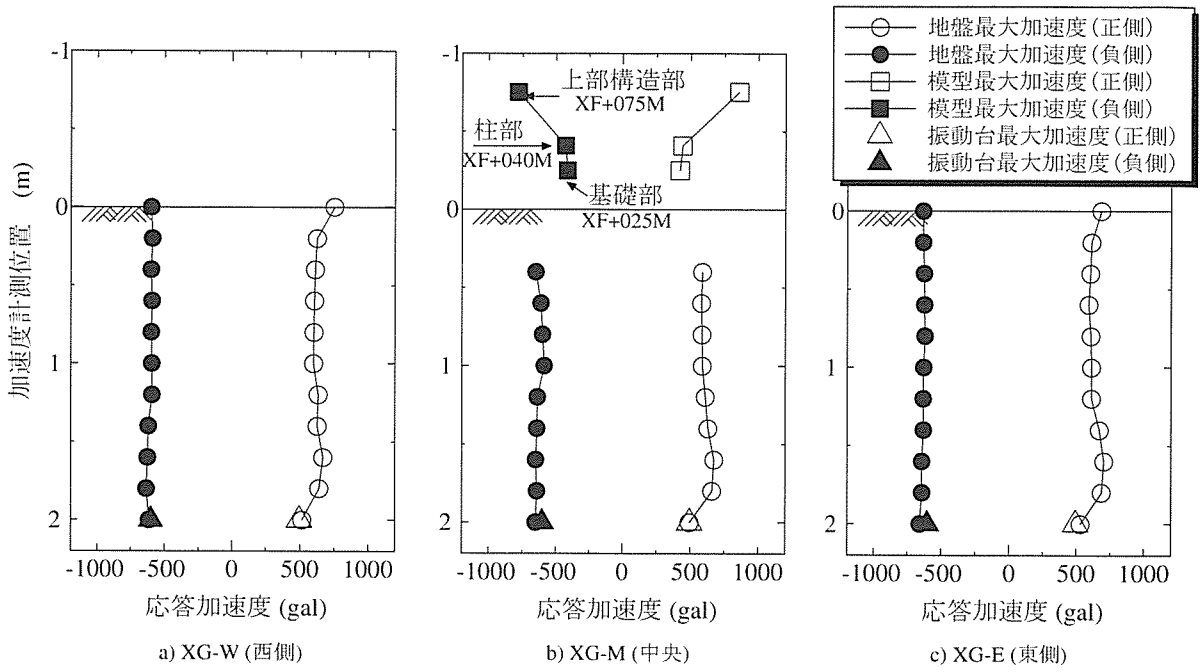
3.6.5 最大応答加速度分布

図–3.41 に示す計測器により計測された各加振ケースにおける振動台，地盤および模型の加振方向最大応答加速度 (正側，負側) の分布を，図–3.42～3.45 に示す．なお，振動台の値は，振動台上に設置された 4 台の加速度計 (XT-NW, XT-NE, XT-SW, XT-SE) で計測されたそれぞれの最大値の平均値である．

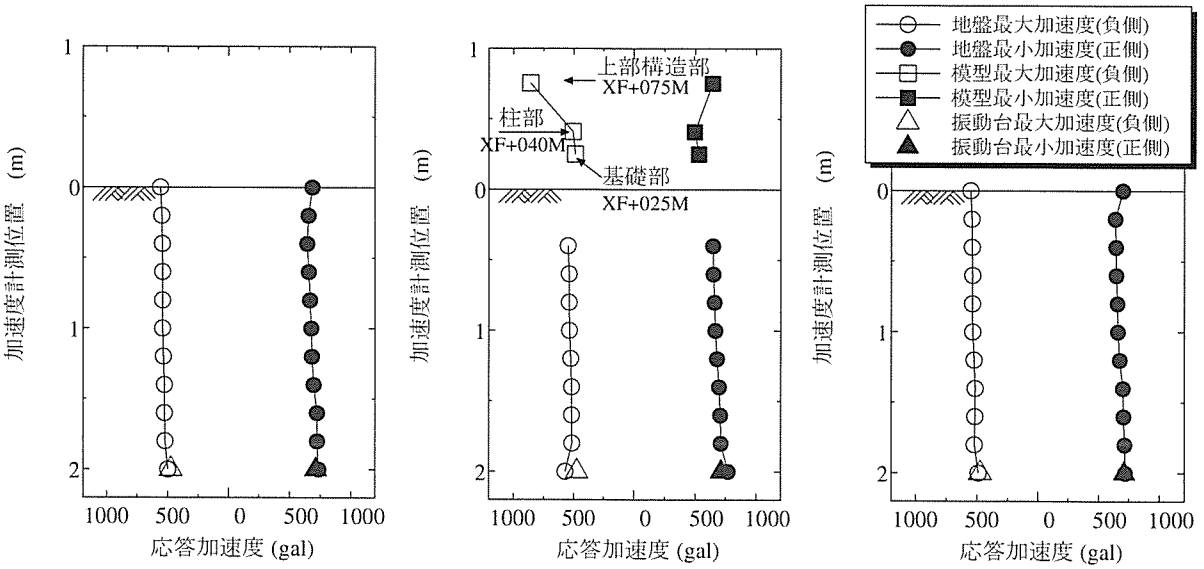
各加振ケースとも，地盤中の最大応答加速度は振動台の最大加速度と同程度であり，地盤底面から地表面までほぼ同一であった．また，模型基礎部の最大応答加速度は，地表面及び模型天端で計測されたそれに比べ小さい．柱部よりも基礎部で最大応答加速度が大きくなるのは，基礎の浮上り挙動に伴って模型全体がロッキングを起こしているためである．



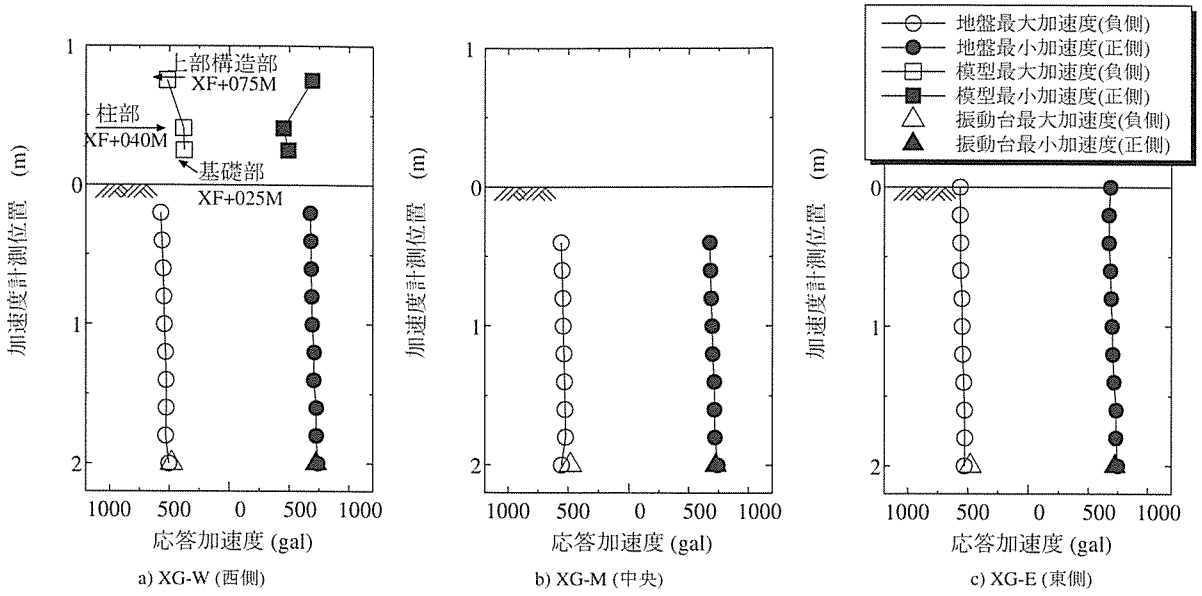
図–3.41 加速度計位置図



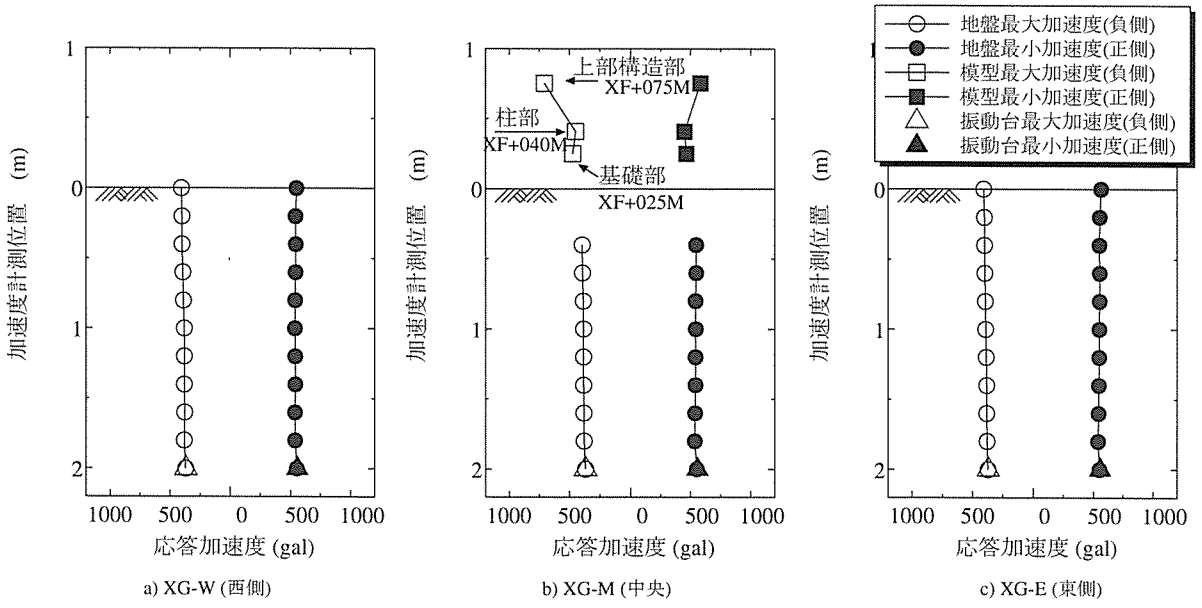
図–3.42 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 最大応答加速度分布



図–3.43 Case 1-Step 4, 神戸波, 最大応答加速度分布



図–3.44 Case 1-Step 5, 神戸波, 最大応答加速度分布



図–3.45 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 最大応答加速度分布

3.7 基礎底面作用力の時刻歴

図–3.46 に，基礎底面に作用する鉛直力 V，水平力 H，モーメント M の算出方法を示す．符号は，それぞれ鉛直力 V は鉛直下向きを正，水平力 H は北向きを正，モーメントは，模型が北側へ傾斜する方向 (X-Z 座標上で時計回り) を正とした．

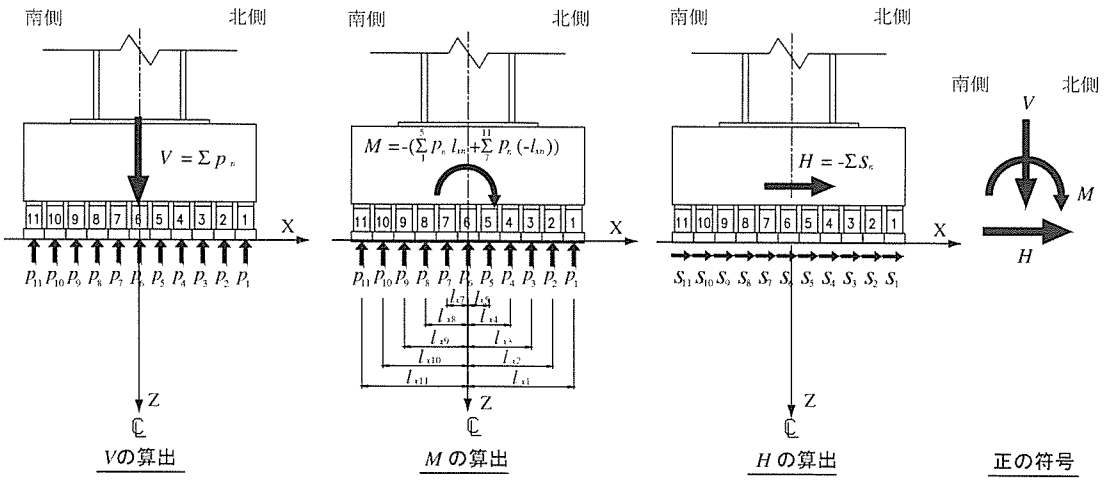
鉛直力 V は基礎底面に設置した各ロードセルに作用する鉛直力の総和とした．水平力 H は基礎底面に設置した各ロードセルに作用するせん断力の総和に (–1) を乗じたものとした．モーメント M は，基礎底面に設置した各ロードセルの鉛直反力に，それぞれ基礎底面中心までの距離を乗じたものの総和を取り，(–1) を乗じたものとする．これらは，最終的に次式で表される．

$$V = \sum_{n=1}^{11} p_n$$

$$H = -\sum_{n=1}^{11} S_n$$

$$M = -\left(\sum_{n=1}^{5} p_n \cdot l_{xn} + \sum_{n=7}^{11} p_n \cdot (-l_{xn}) \right)$$

水平力の算出で (–1) を乗じる理由は，2 方向ロードセルは北向きに作用するせん断抵抗力を正の値で出力するためである．モーメントの算出で (–1) を乗じる理由は，地盤底面反力による抵抗モーメントを作用モーメントに換算するためである．

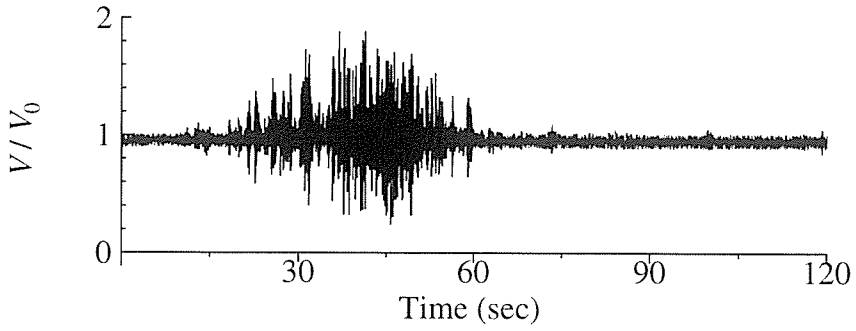


図–3.46 基礎底面作用力算出法および符号

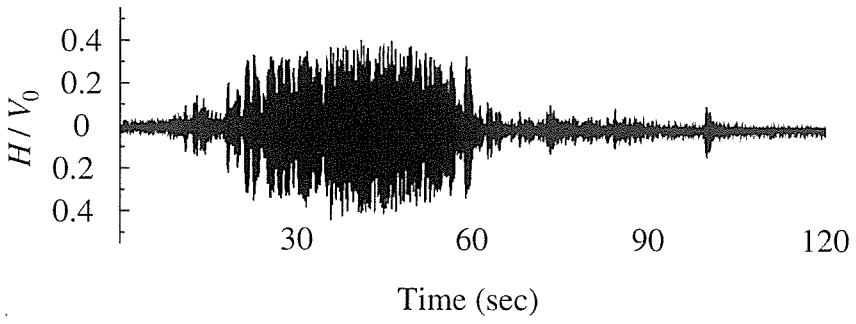
図–3.47～3.58 に，各加振ケースにおける基礎底面に作用する鉛直力 V，水平力 H，モーメント M の時刻歴を示す．それぞれのケースごとに，縦方向に鉛直力 V，水平力 H，モーメント M の時刻歴を並べている．ここで，図中の V_0 は模型自重 (=8.385 kN)，B は基礎幅 (=0.5 m) である．なお，Case 1-Step 5 の神戸波による加振については模型が転倒するまでの時刻歴を示す．

鉛直力 V は，模型自重 V_0 を中心に上下の値が生じていることがわかる．これは，「3.6.3 模型の応答加速度時刻歴」に示されるように，模型に上下方向の加速度が生じるためである．すなわち，浮上り時には上向きへの慣性力が働き，着地時には下向きの慣性力が働くので基礎底面に作用する鉛直力 V は変化する．

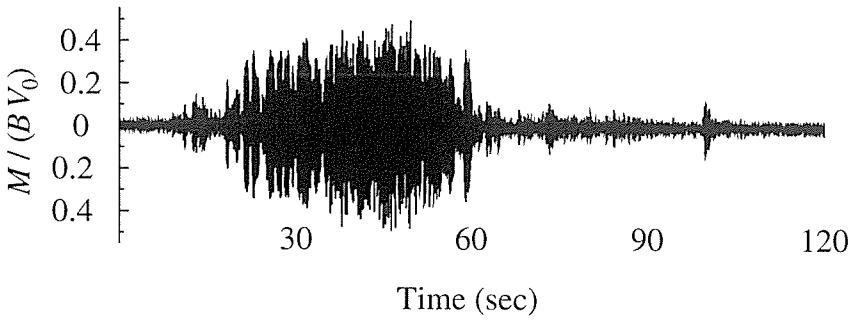
Case 1-Step 4 の水平力 H とモーメント M は，およそ 10 秒付近から負の方向にドリフトしている．これは，この時刻において南側の地盤が大きく塑性化し，模型全体が負の回転角方向に傾斜したためである (後述の写真–3.6 参照).



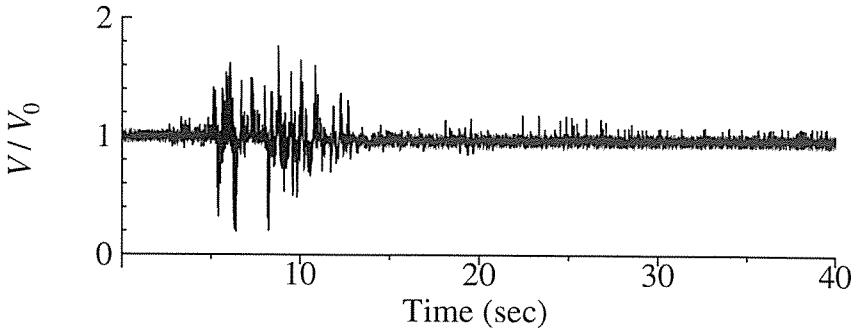
図–3.47 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直力 V の時刻歴



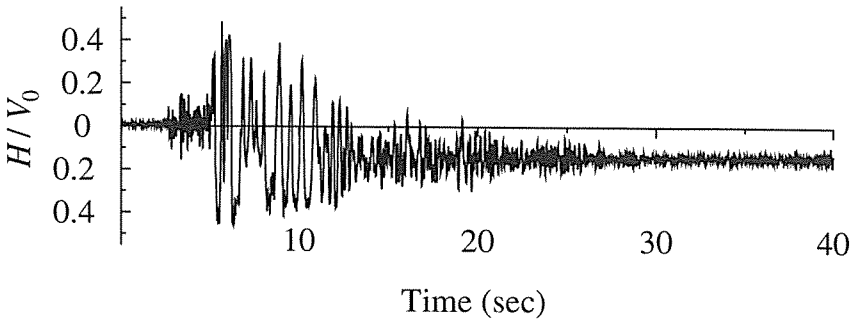
図–3.48 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平力 H の時刻歴



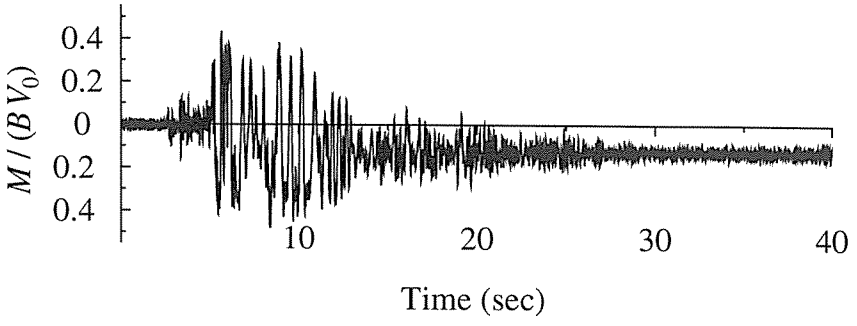
図–3.49 Case 1-Step 2, 七峰橋波, モーメント M の時刻歴



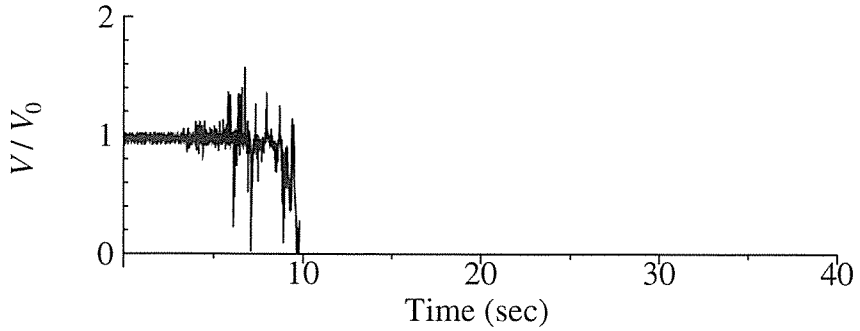
図–3.50 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直力 V の時刻歴



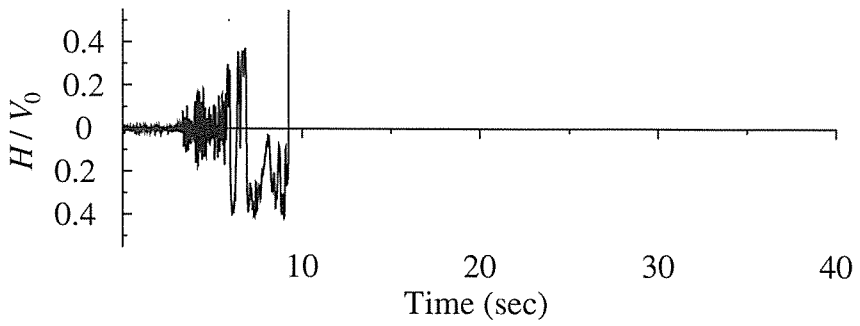
図–3.51 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平力 H の時刻歴



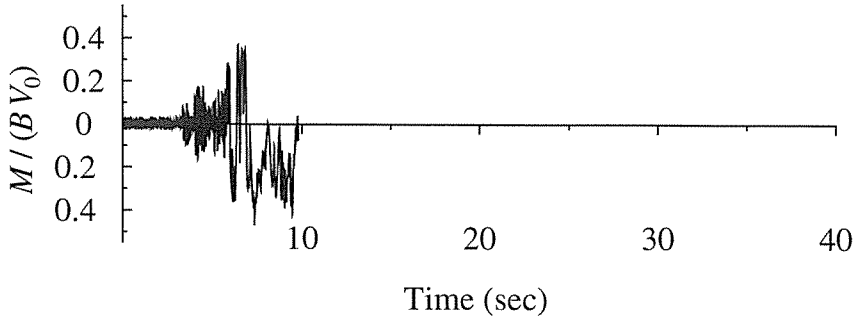
図–3.52 Case 1-Step 4, 神戸波, モーメント M の時刻歴



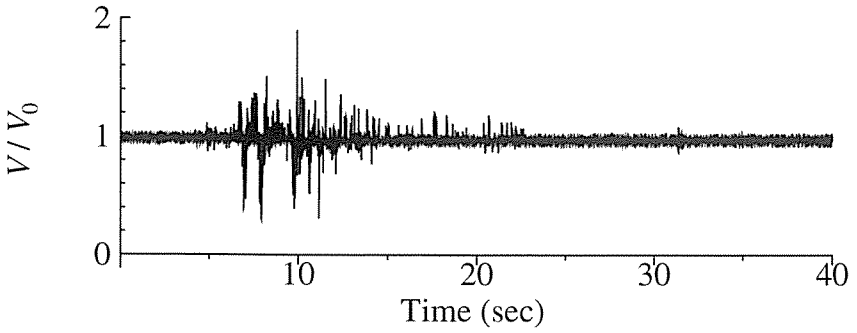
図–3.53 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直力 V の時刻歴



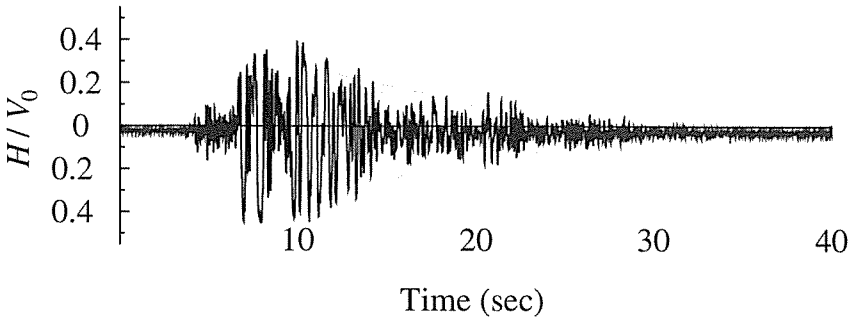
図–3.54 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平力 H の時刻歴



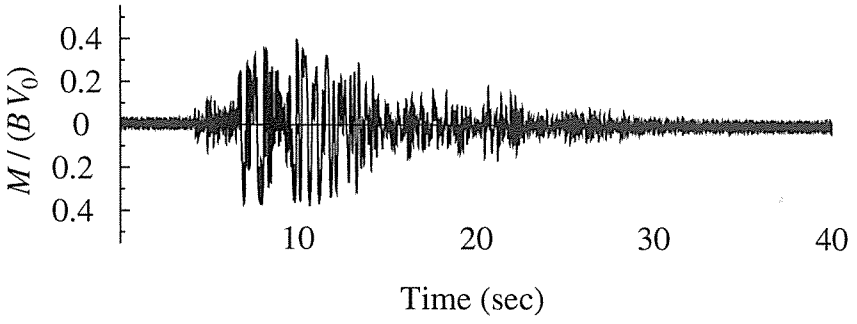
図–3.55 Case 1-Step 5, 神戸波, モーメント M の時刻歴



図–3.56 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直力 V の時刻歴



図–3.57 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平力 H の時刻歴



図–3.58 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), モーメント M の時刻歴

3.8 基礎の変位の時刻歴

各加振ケースにおける基礎底面中心位置での鉛直変位 v，水平変位 u および X-Y 平面，X-Z 平面の回転角 θ_Z, θ_Y の時刻歴を調べる．各加振ケースともに加速度を 2 階積分して算出した変位と，画像解析処理から求めた変位のそれぞれを調べる．

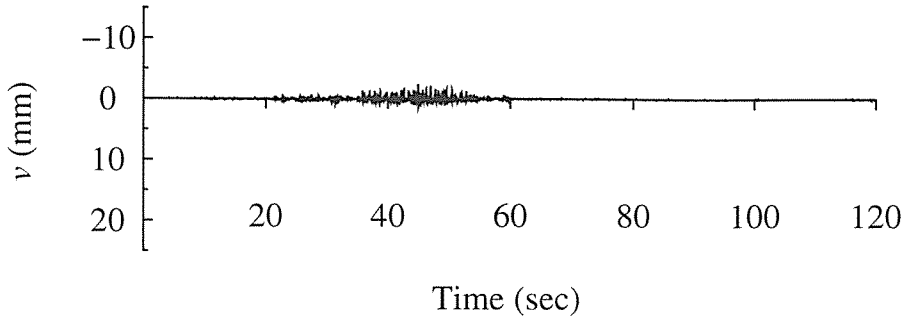
鉛直変位 v，水平変位 u，回転角 θ_Z (Z 軸まわり), θ_Y (Y 軸まわり) の算出方法は，「2.12.1 加速度計測記録からの変位の評価」および「2.12.2 画像解析による変位の評価」に示す通りであるが，水平変位 u は地表面との相対変位とし，さらに以下の処理を行った．

加速度積分変位は，加速度積分にて算出された基礎底面中心位置の水平変位から地表面水平変位を差し引いて求めた．地表面水平変位の時刻歴は，地表面に設置した 2 つの加速度計 (XG-00W, XG-00E) の加速度記録をそれぞれ 2 階積分して求めた変位を，各時刻に関して平均を取ることにより求めた．ただし，Case 1-Step 5 については XG-00E の加速度記録のみ用いている．参考として振動台水平変位との相対変位も示す．振動台水平変位の時刻歴は，2 つの変位計 (DISP1, DISP2) の変位記録を各時刻に関して平均を取ることにより求めた．

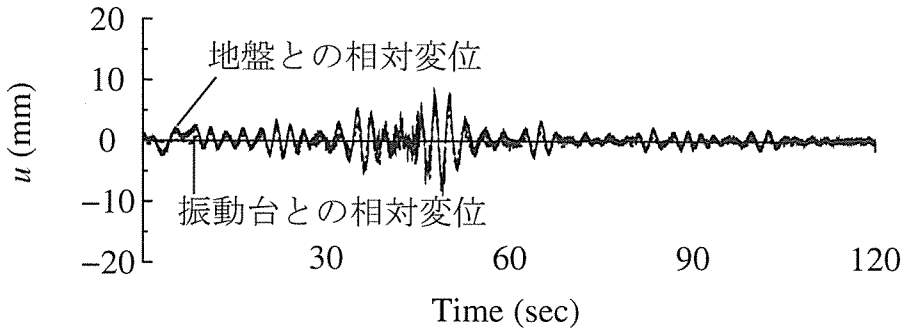
画像解析処理による変位は，模型標点から求めた基礎底面中心位置の水平変位から，地表面の標点 G1～G6 のいずれかの水平変位を差し引いて求めた．このとき，加振中に模型と重なり標点計測が行えなかったものや，加振後の残留値が大きい地表面標点データは使用しなかった．図–3.59～3.90 に v, u, θ_Z, θ_Y の算出結果を示す．

X-Y 平面上の回転角 (Z 軸まわりの回転角) については，加速度積分から計算された回転角が極めて小さい値となった．そのため，対応する画像解析結果と縦軸のスケールを変えて示している．また，Case 1-Step 5 の神戸波による加振については，模型が転倒するまでの時刻歴を示した．図–3.60 に示されるように，地盤との相対変位と振動台との相対変位にはほとんど差が見られない．

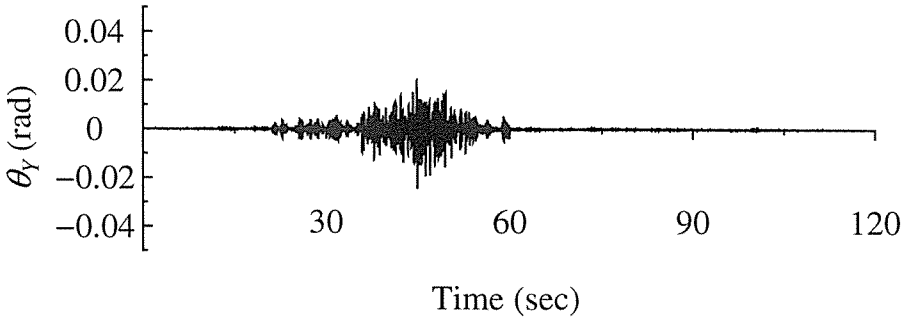
「2.12.1 加速度計測記録からの変位の評価」で示した通り，振動台および地盤の変位と，残留変位が生じる模型の変位では，加速度記録に含まれる長周期成分が違うため，変位を算出するためのフィルタの値が異なっている．その結果，それぞれの算出された変位は異なる周波数帯域が包含された波形となる．このため，相対変位を取ることにより，加速度記録を 2 階積分して求められた変位と画像解析処理による変位とが大きく異なる波形となったものと考えられる．



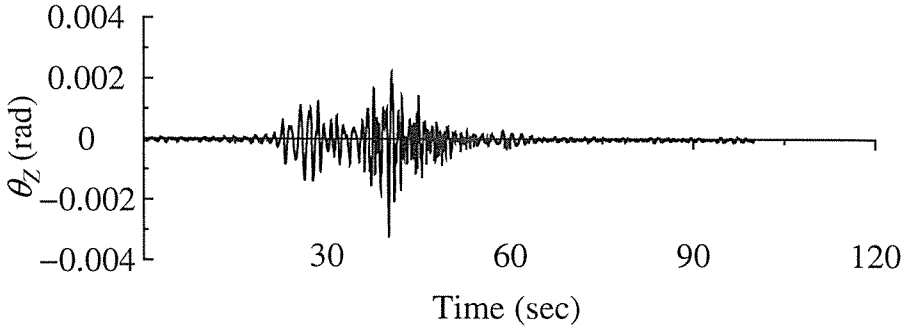
図–3.59 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分)



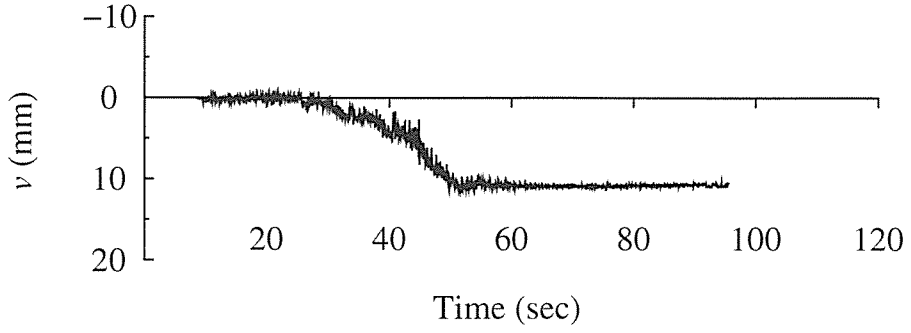
図–3.60 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分)



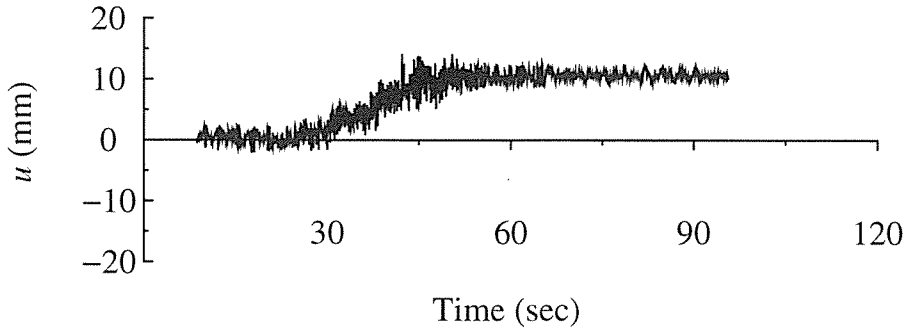
図–3.61 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分)



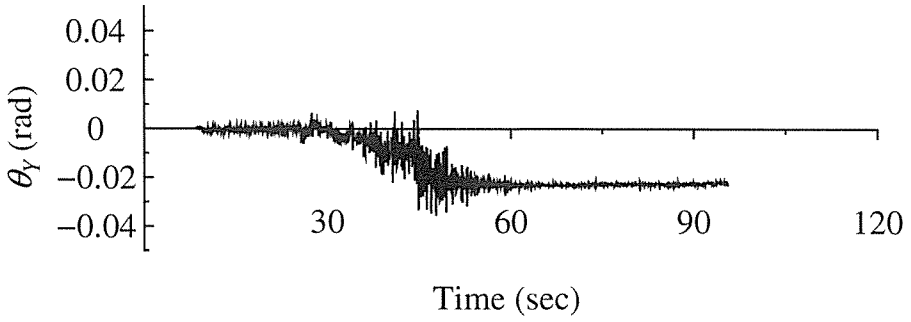
図–3.62 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分)



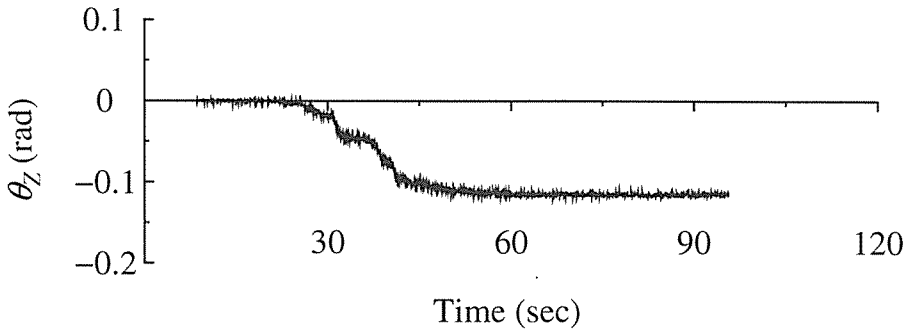
図–3.63 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理)



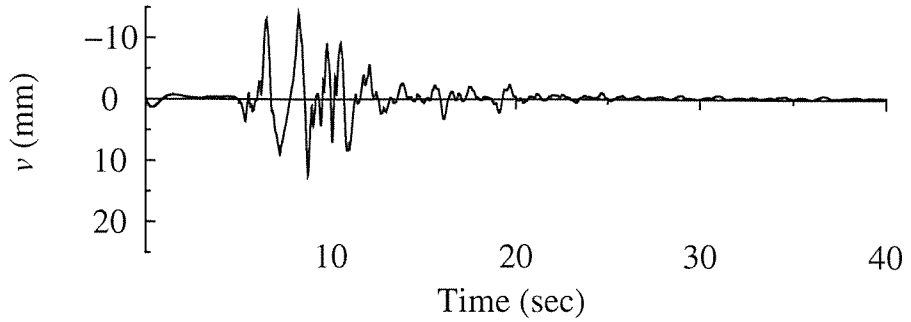
図–3.64 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理)



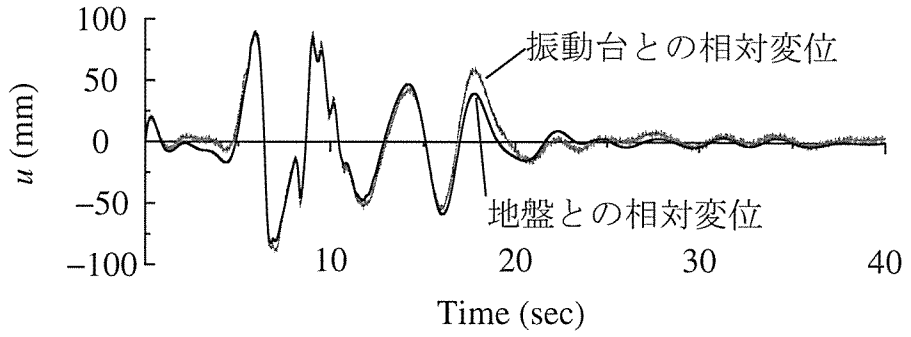
図–3.65 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理)



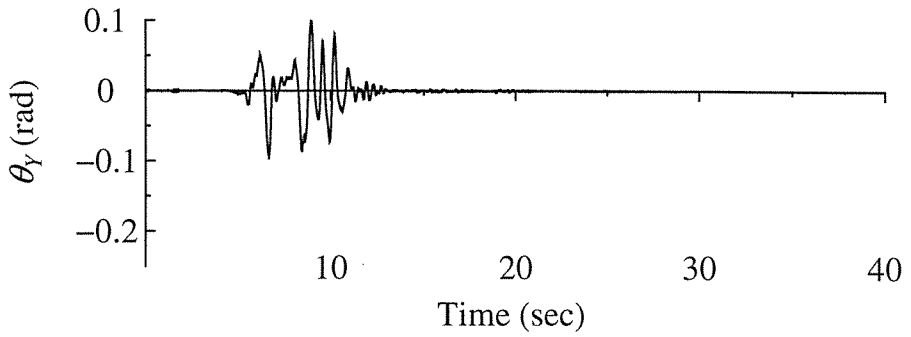
図–3.66 Case 1-Step 2, 七峰橋波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理)



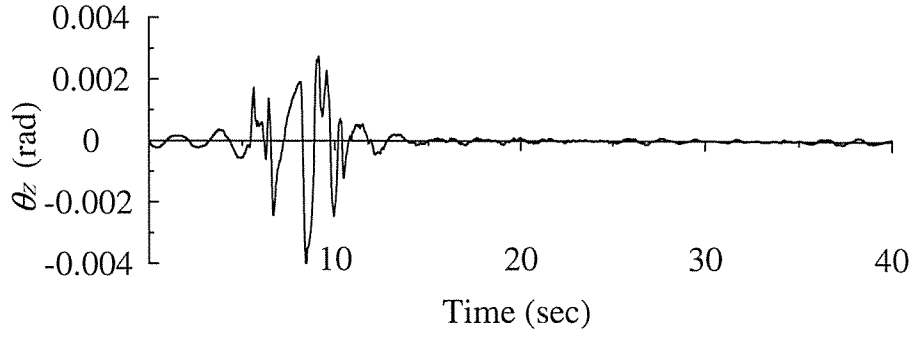
図–3.67 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分)



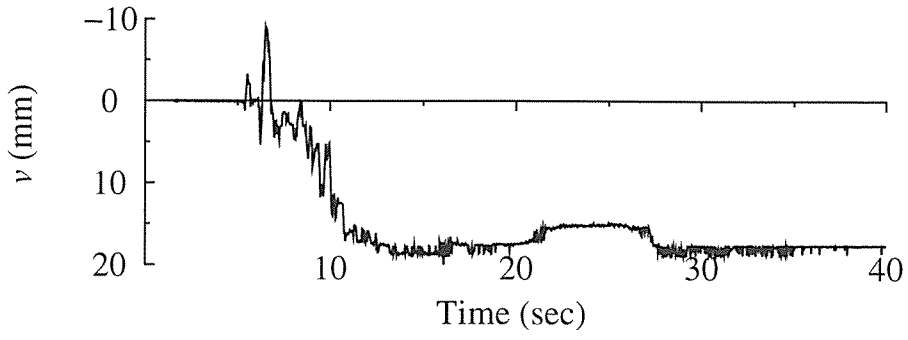
図–3.68 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分)



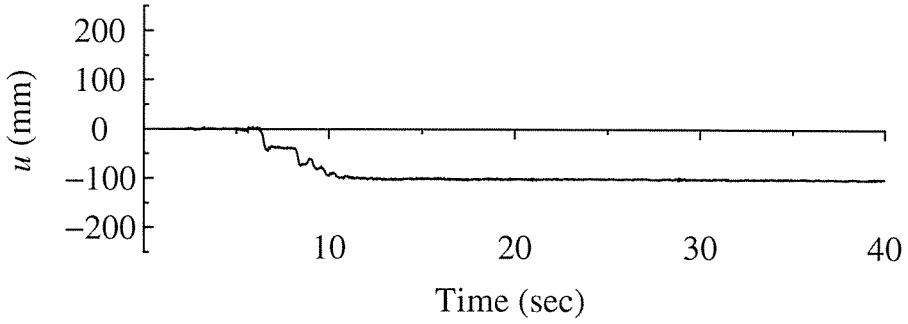
図–3.69 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分)



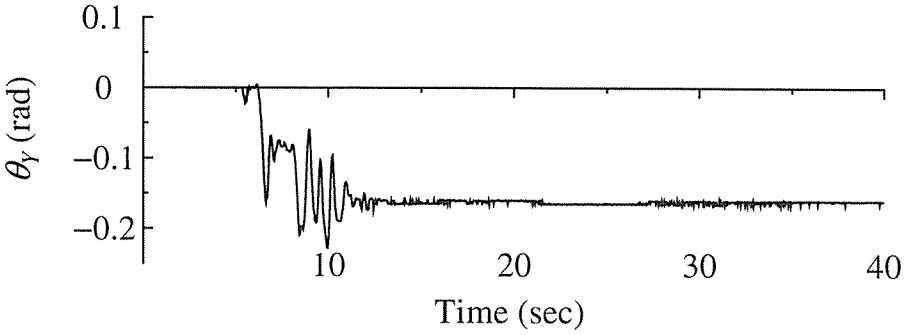
図–3.70 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Y 平面回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分)



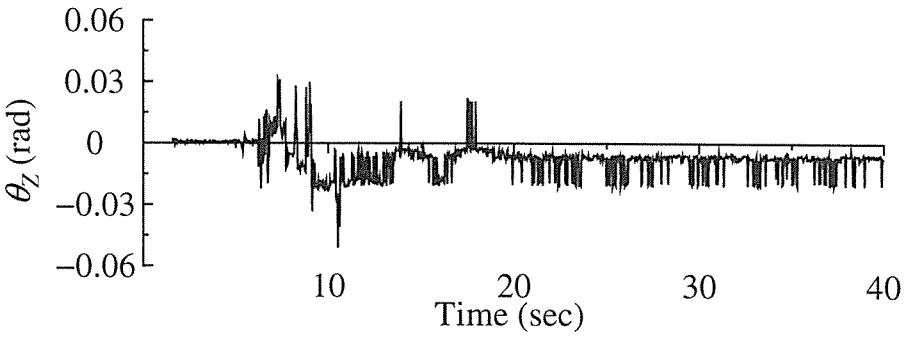
図–3.71 Case 1-Step 4, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理)



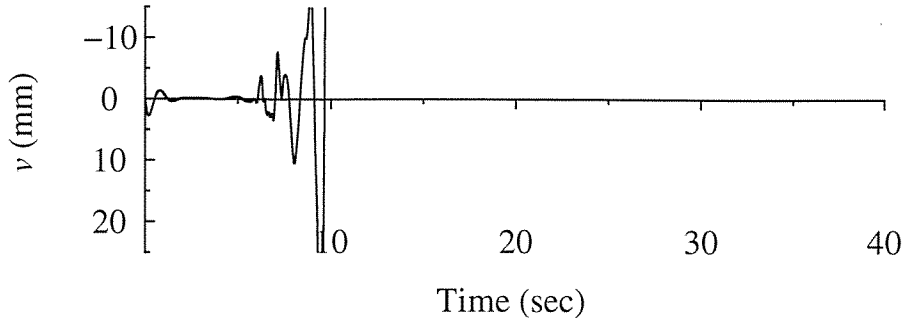
図–3.72 Case 1-Step 4, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理)



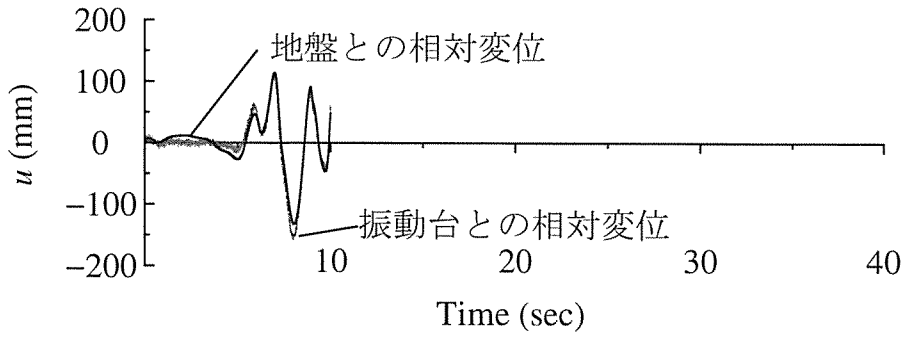
図–3.73 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Z 平面回転角 θ の時刻歴 (画像解析処理)



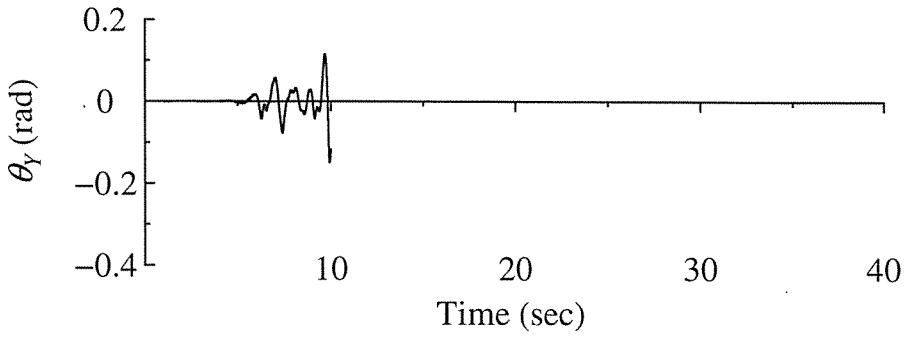
図–3.74 Case 1-Step 4, 神戸波, X-Y 平面回転角 θ の時刻歴 (画像解析処理)



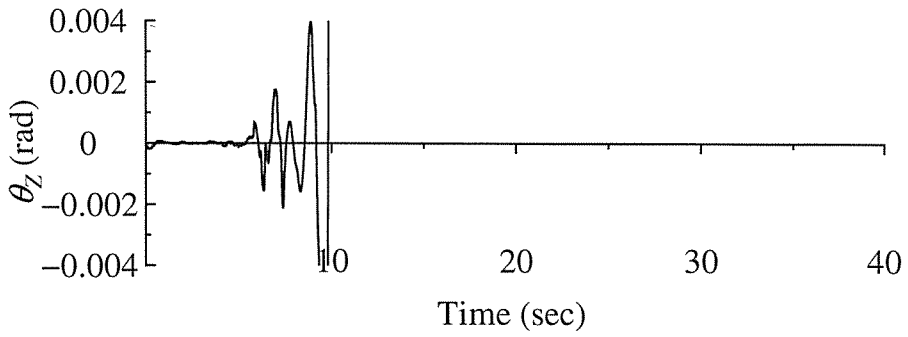
図–3.75 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分)



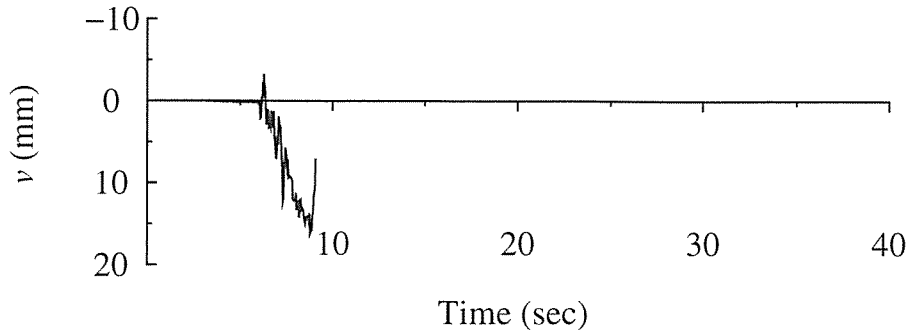
図–3.76 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分)



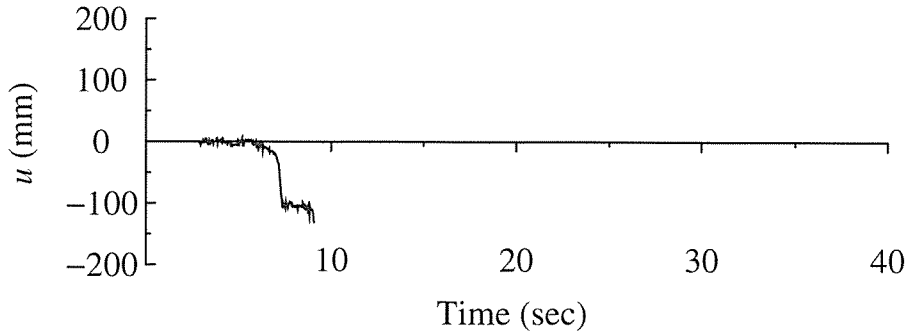
図–3.77 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分)



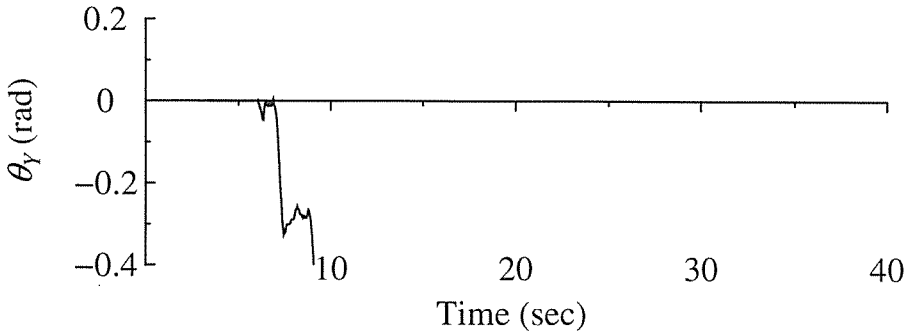
図–3.78 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分)



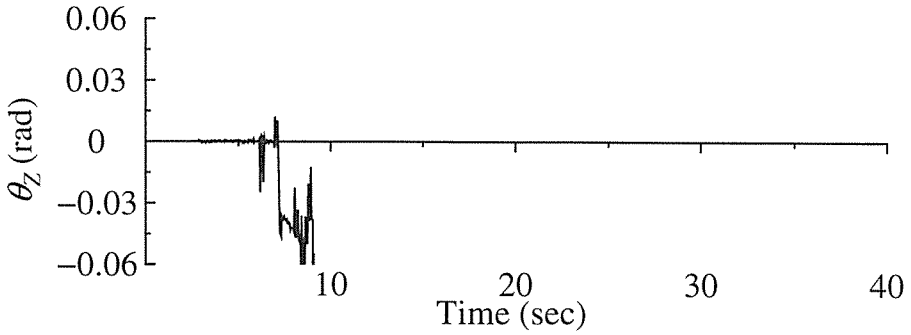
図–3.79 Case 1-Step 5, 神戸波, 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理)



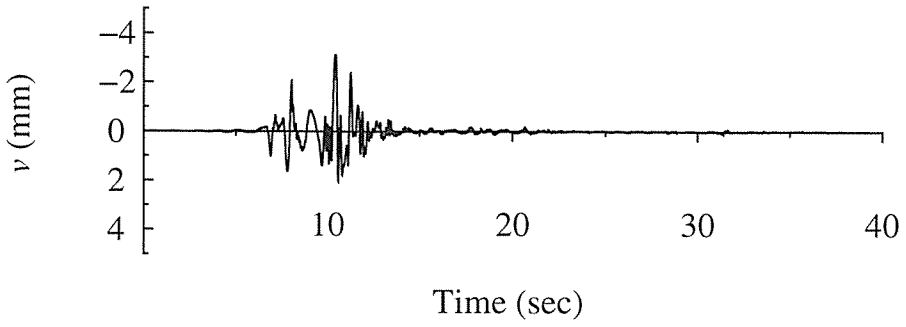
図–3.80 Case 1-Step 5, 神戸波, 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理)



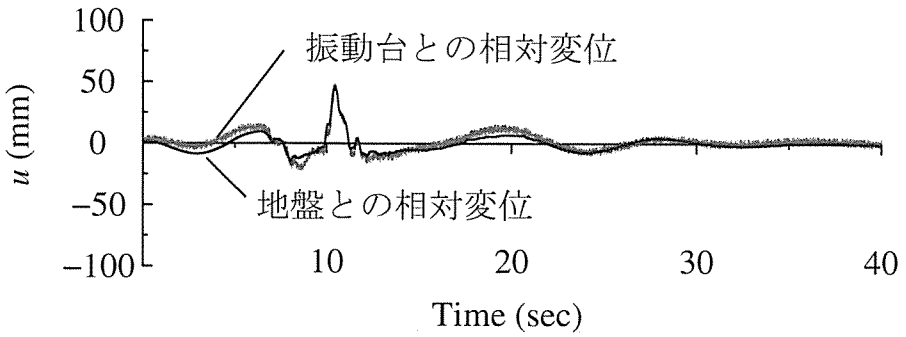
図–3.81 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理)



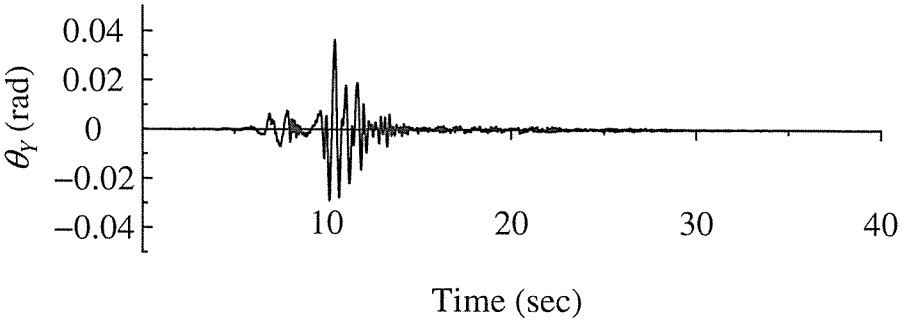
図–3.82 Case 1-Step 5, 神戸波, X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理)



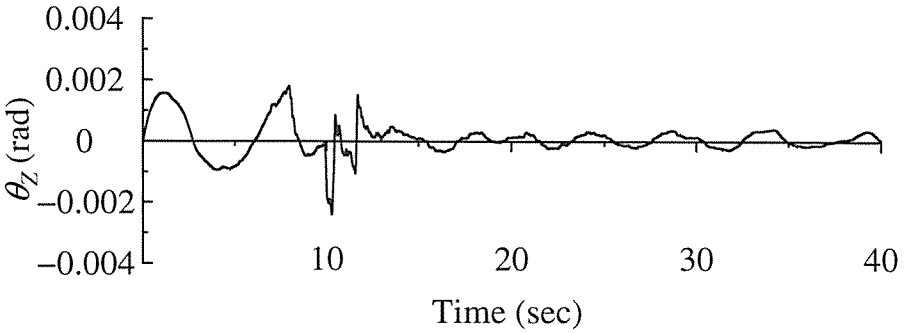
図–3.83 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直変位 v の時刻歴 (加速度積分)



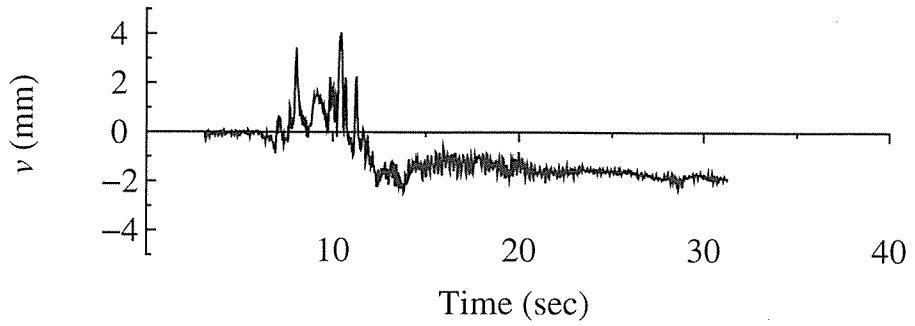
図–3.84 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平変位 u の時刻歴 (加速度積分)



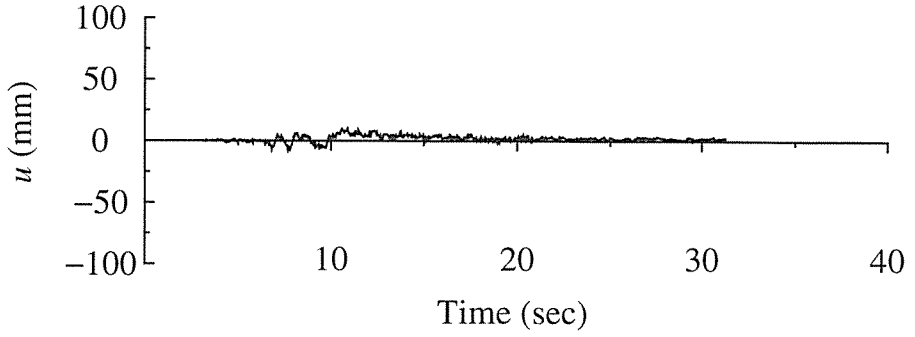
図–3.85 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (加速度積分)



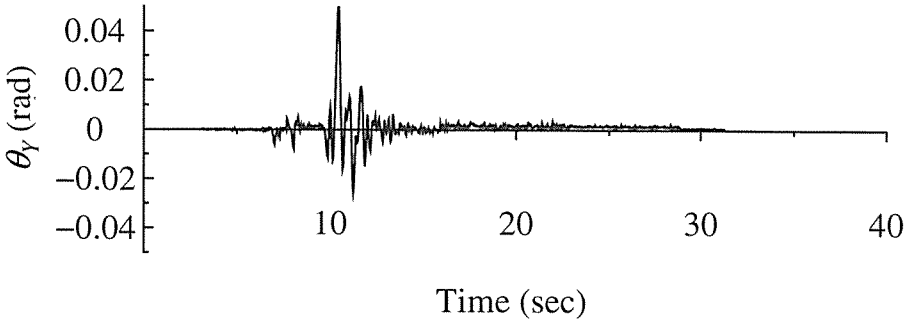
図–3.86 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Y 平面上の回転角 θ_Z の時刻歴 (加速度積分)



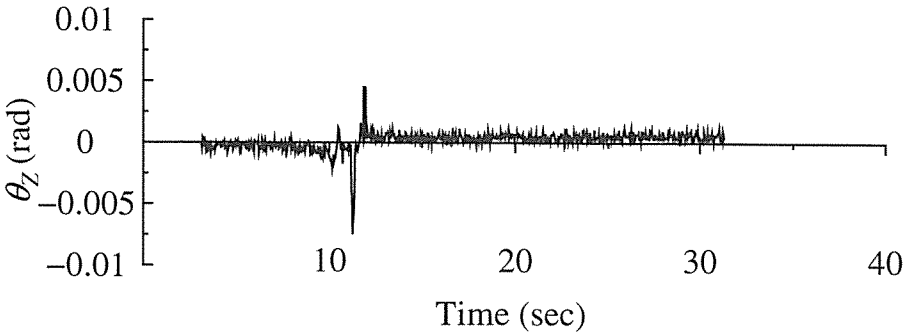
図–3.87 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 鉛直変位 v の時刻歴 (画像解析処理)



図–3.88 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 水平変位 u の時刻歴 (画像解析処理)



図–3.89 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Z 平面上の回転角 θ_Y の時刻歴 (画像解析処理)



図–3.90 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), X-Y 平面回転角 θ_Z の時刻歴 (画像解析処理)

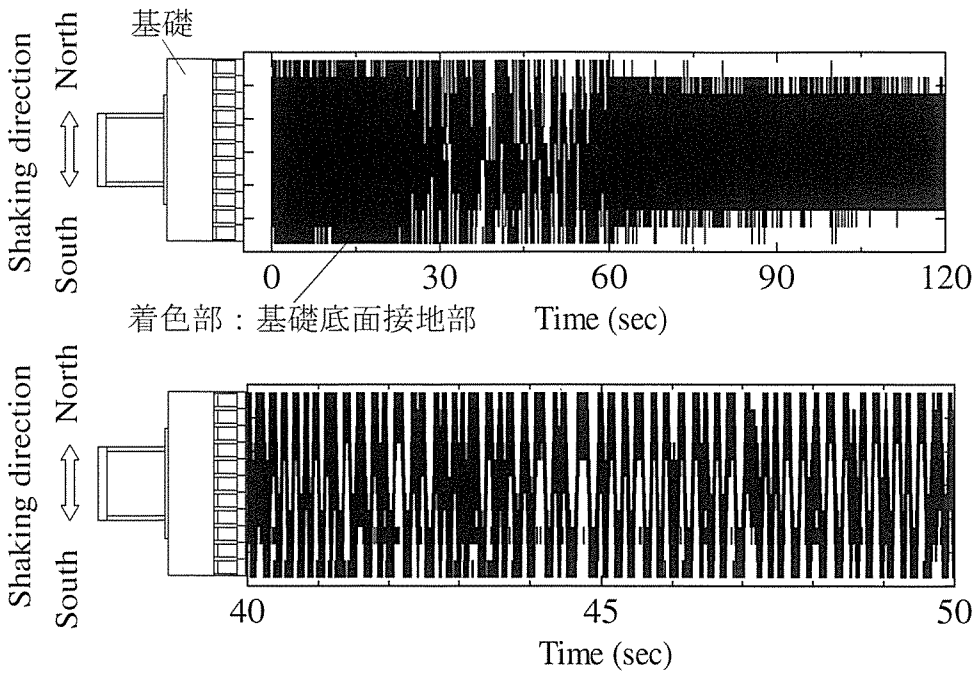
3.9 基礎底面接地幅の時刻歴

図–3.91～3.94 に，加振中の基礎底面の接地幅の時間変化を示す．図の上段には全時刻における基礎底面接地幅の時刻歴を，下段には最大変位が生じた時刻を中心に 10 秒間引き伸ばした図を示す．縦軸は，基礎底面に設置した 2 方向ロードセルの設置位置を示しており 11 分割している．各時刻において 2 方向ロードセルが接地していると判定された部分を着色した．2 方向ロードセルが接地しているか否かは，2 方向ロードセルの鉛直反力の有無を用いて判定した．

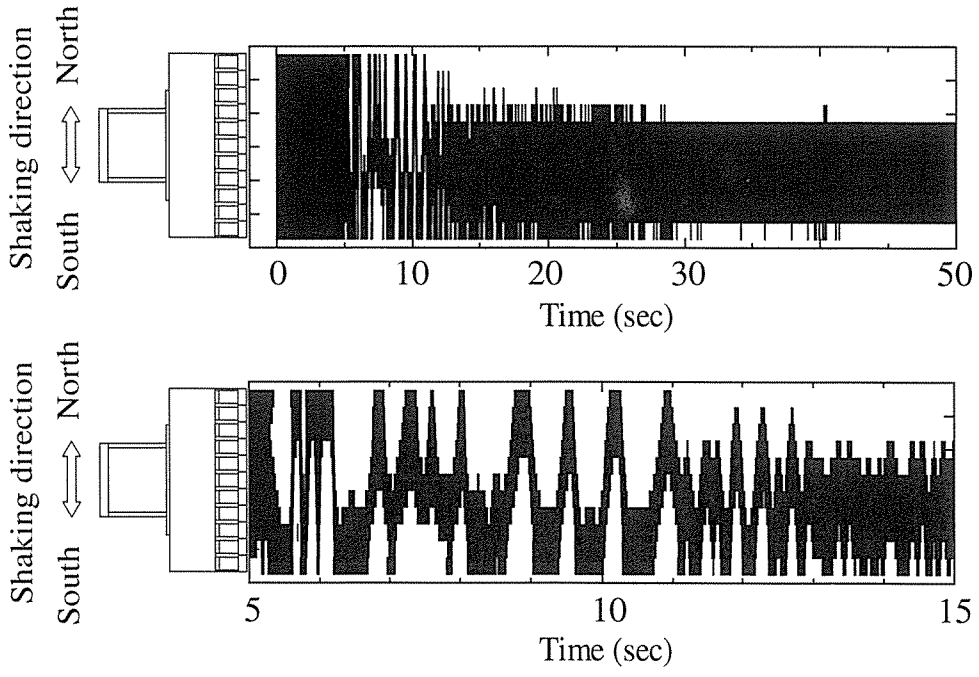
図–3.91 に示す Case 1-Step 2 の七峰橋波における基礎底面接地幅の時刻歴を見ると，非常に短い周期で基礎の浮上り挙動が繰返されているのがわかる．また，計測開始後約 60 秒経過したあたりから加振終了にかけては基礎両端部は接地しない状態となった．これは，加振による基礎の一方の端部の浮上りに伴い，その逆側である接地側の基礎端部に荷重が集中することで地盤が塑性化するという挙動が位置を入れかえながら交互に繰返されることにより，基礎底面中央部分に比べ端部付近で地盤が大きく沈下しているためである．図–3.91 に示す Case 1-Step 2 の七峰橋波と図–3.94 に示す Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅 80 %) とを比較してみると，神戸波 (振幅 80 %) の方が基礎の浮上り挙動が大きくなり加振後の基礎端部の非接地範囲が広くなった．これは，七峰橋波の方が，小さな回転角の浮上りが多くの回数繰返されたため，比較的基礎底面全体に渡って均一に地盤が塑性化すると考えられるのに対して，神戸波 (振幅 80 %) のケースは浮上り挙動の繰返し回数は小さくても，大きな回転角の浮上り挙動となることで，基礎端部への荷重集中が大きく，基礎中央に比べ端部地盤の塑性化がかなり大きくなるためであると考えられる．

図–3.92 に示す Case 1-Step 4 の神戸波では，加振開始から約 10 秒経過したあたりで基礎南側端部の下で地盤が大きく沈下したため，模型全体が南側へ傾斜した．その後，加振終了まで傾斜した状態が続いたため，七峰橋波や神戸波 (振幅 80 %) に比べ基礎底面接地部分は南側へ偏心している．図–3.93 に示す Case 1-Step 5 の神戸波では，加振開始から約 7 秒経過したあたりで基礎南端部の下の地盤が大きく沈下し模型全体が南側へ傾斜し，加振開始から約 10 秒後に転倒した．ここで，基礎南側端部の鉛直反力は転倒後にも多少値が出ていたが，この鉛直荷重は模型の重量による鉛直力ではないと考えられるため図では着色していない．

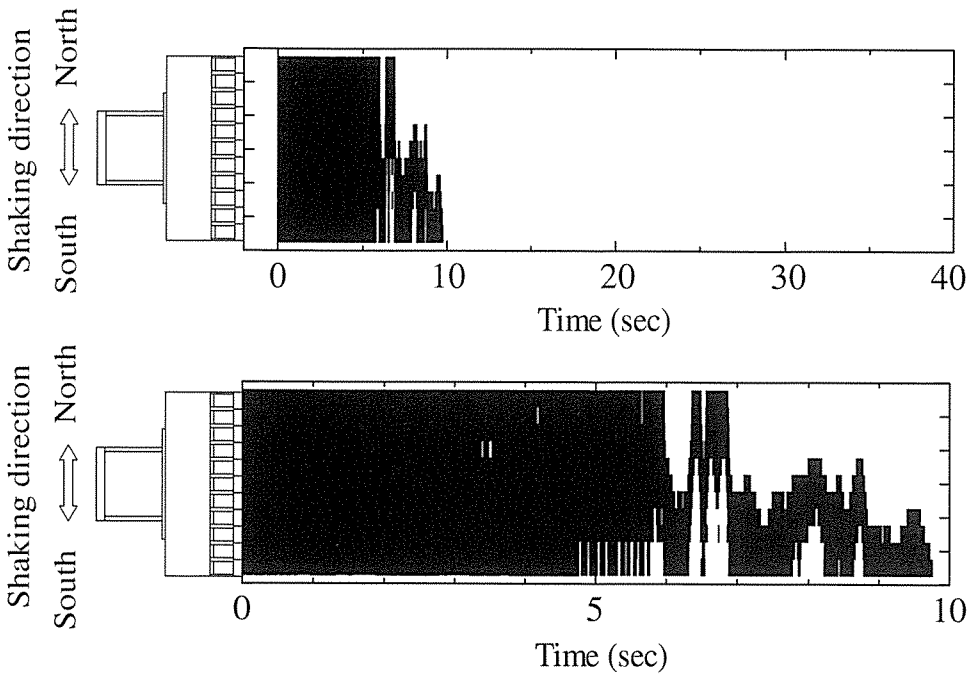
図–3.95～3.97 に各ケースの加振前と加振後の地盤反力度分布を示す．地盤反力度分布は，いずれのケースも基礎中央部で最大となり，端部に向かうにつれ小さな値となった．先の図–3.91 および図–3.94 に示した通り，Case 1-Step 2 の七峰橋波よりも，Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅 80 %) の方が基礎底面端部の非接地幅が大きいことがわかる．また，接地幅に対して鉛直荷重が作用することから，Case 2-Step 2 の方が大きな地盤反力度が生じる．加振中の地盤反力度分布については，後述の「3.13.3 基礎変位および地盤反力度のスナップショット」で詳述する．



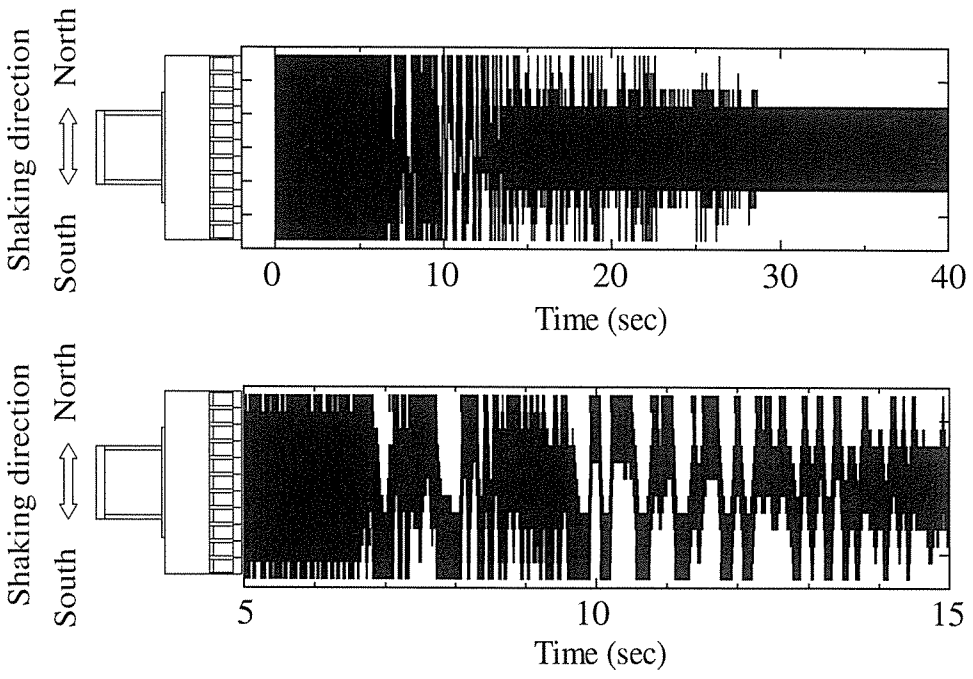
図–3.91 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋)



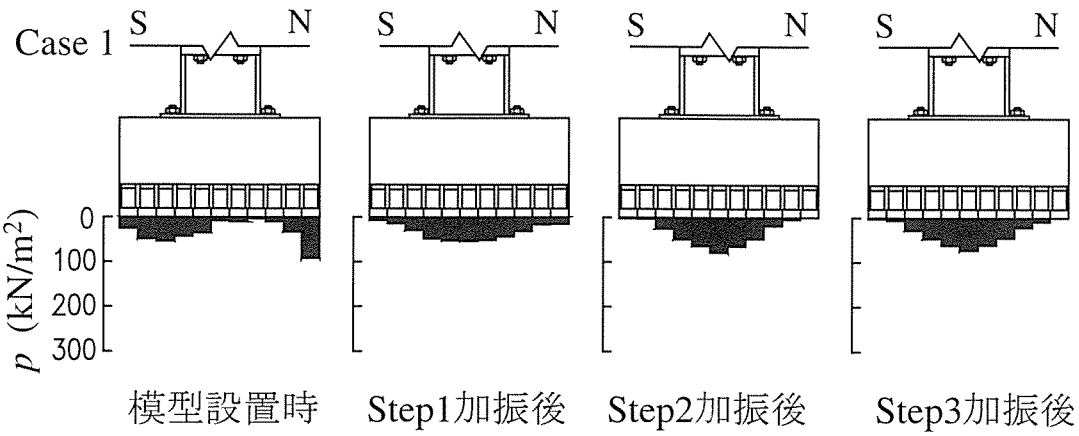
図–3.92 Case 1-Step 4, 神戸波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋)



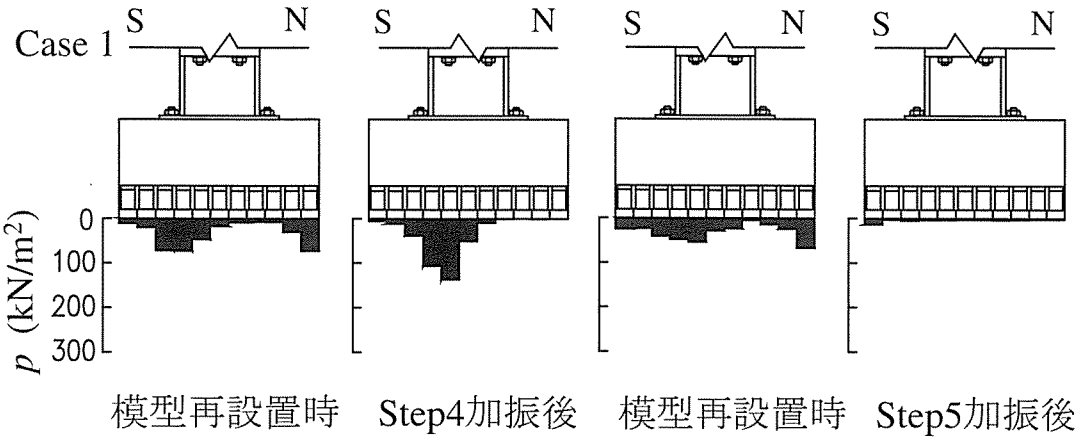
図–3.93 Case 1-Step 5, 神戸波, 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋)



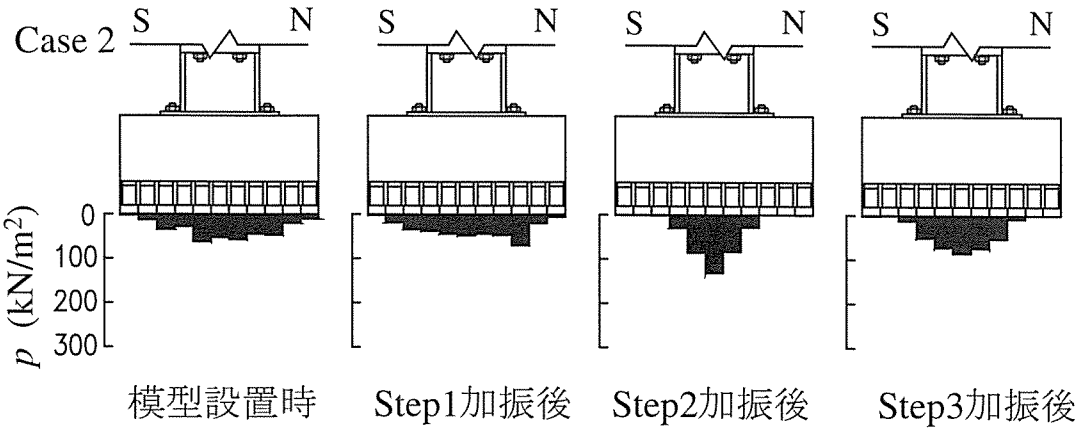
図–3.94 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 基礎底面接地幅の時刻歴 (上段：全時刻, 下段：10 秒間抜粋)



図–3.95 Case 1-Step 1～Step 3, 地盤反力度分布
(S = 南側, N = 北側)



図–3.96 Case 1-Step 4 および Step 5, 地盤反力度分布
(S = 南側, N = 北側)



図–3.97 Case 2-Step 1～Step 3, 地盤反力度分布
(S = 南側, N = 北側)

3.10 地盤の支持力

地盤の支持力は，地盤に作用する鉛直力 V，水平力 H，モーメント M の組み合わせに応じて決定される．これまでの多くの載荷実験[8)9)10)11)12)13)14)15)]から，地盤が極限支持力に達したときの V, H, M の組み合わせは図–3.98 に示すようなラクビーボール状の曲面上に分布することがわかっている．これを支持力曲面と呼ぶ．例えば文献[12)]によれば，支持力曲面は式 (3.4) でモデル化できる．

$$h_F^2 + m_F^2 - v_F^2(1 - v_F)^{2\zeta} = 0 \tag{3.4}$$

ここに，h_F，m_F，v_F は，$H = M = 0$ のときの鉛直支持力 $V_{\max}$ を用いて無次元化された荷重で，それぞれ式 (3.6)〜(3.7) で表すことができる．

$$h_F = \frac{H}{\mu V_{\max}} \tag{3.5}$$

$$m_F = \frac{M}{\psi B V_{\max}} \tag{3.6}$$

$$v_F = \frac{V}{V_{\max}} \tag{3.7}$$

ここで，μ, ψ, ζ は形状を規定するパラメーターであり，μ は摩擦係数 (=tan ϕ: ϕ は地盤の内部摩擦角) である．また，V, H, M のうち，1 つの荷重をある一定値として，その他の 2 つの荷重に関して降伏曲面の軌跡を表したものを支持力曲線と呼ぶことにした．式 (3.4) において ζ=1.00 とし，M=0 と仮定すると式 (3.8) で表されるような支持力曲線が得られる．

$$\frac{H}{\mu} = V\left(1 - \frac{V}{V_{\max}}\right) \tag{3.8}$$

さらに，式 (3.8) を V で微分すると式 (3.9) が得られる．

$$\frac{dH}{dV} = \mu\left(1 - \frac{2V}{V_{\max}}\right) \tag{3.9}$$

式 (3.9) より，H-V 平面上の支持力曲線の原点 O における接線勾配は式 (3.10) で表すことが出来る．

$$\left(\frac{dH}{dV}\right)_{V=0} = \mu \tag{3.10}$$

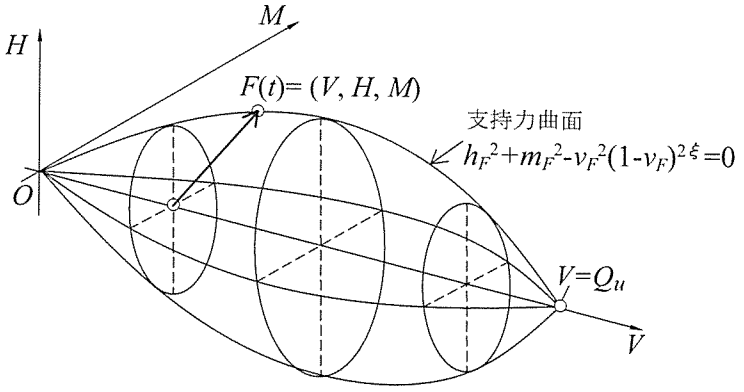
式 (3.10) より，μ は式 (3.4) において ζ=1.00，M=0 とした時の支持力曲線の原点 O における接線勾配に等しい (図–3.99 参照)．また，式 (3.4) において ζ=1.00，H=0 として M-V 平面上の支持力曲線について同様の検討を行うと，ψ は式 (3.11) で表すことができ，M-V 平面上の支持力曲線の原点 O における接線勾配に等しいことがわかる (図–3.99 参照)．

$$\left(\frac{d(M/B)}{dV}\right)_{V=0} = \psi \tag{3.11}$$

図–3.100〜3.111 に各加振ケースの H-M, M-V, H-V 関係の実験値と支持力曲線の理論値を示す．それぞれのパラメータは以下のようにして決定された．$V_{\max}$ は，著者らが先に同じ相対密度の地盤で，同じ基礎幅の模型を行って載荷実験をした結果[5)]から 244.8 kN とした，基礎幅 B は 0.5 m で

ある．μ を評価するための内部摩擦角は三軸試験 (CD) の結果 (表–2.1 参照) から $\phi = 42.1°$ とし，μ は 0.904 とした．ψ と ζ は過去に行われた実験で妥当であると判断された値を用い，ψ は 0.3, 0.4, 0.45, 0.5，ζ は 1.00 と仮定した．図–3.100～3.111 では，表–3.5 に示す荷重のうち一つを固定して，それぞれ支持力曲線を描いている．固定された V, H, M の値は，M がその実験ケースにおける最大モーメントであり，V, H は最大モーメントが発生したときの値である．図–3.100 を例に説明すると，Case 1-Step 2 の全時刻のデータのうち，V=12.309 kN となったときの H と M をプロットしたものである．なお，図中の • は実験値である．

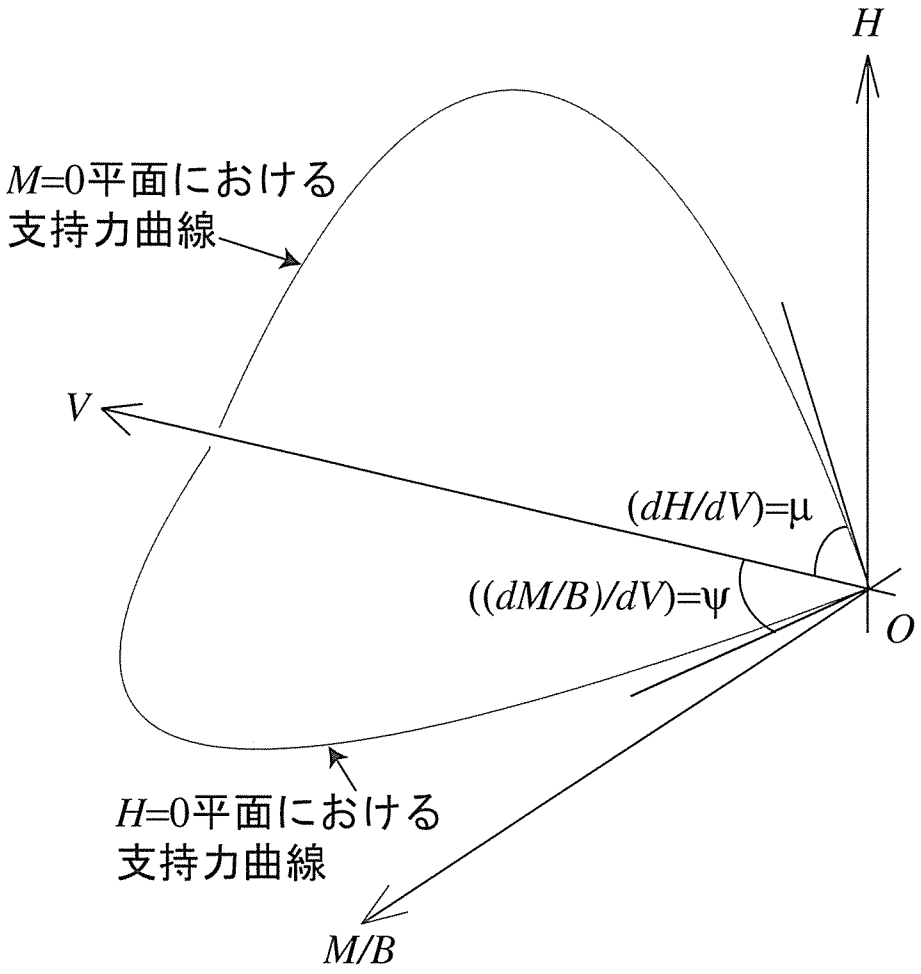
支持力曲線は，実験値とよく一致しており，実験値の時刻歴は，ここに示す荷重の組合せによる支持力曲面の内側とその周辺で挙動していることがわかる．一方，理論的には，地盤の支持力は地盤に生じる加速度によっても変化する[16]．それに関してはここでは考慮しておらず，その検討は今後の課題である．



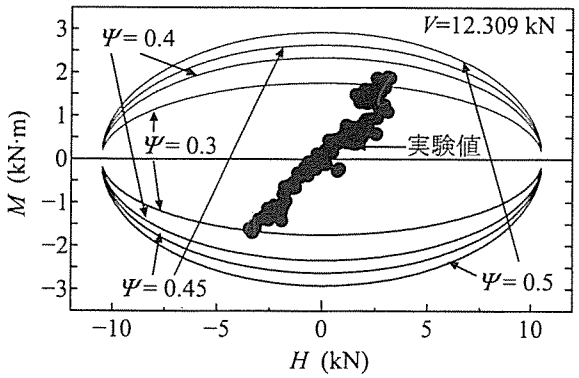
図–3.98 *H-M-V* 支持力曲面概念図

表–3.5 支持力曲面算出時刻および作用荷重

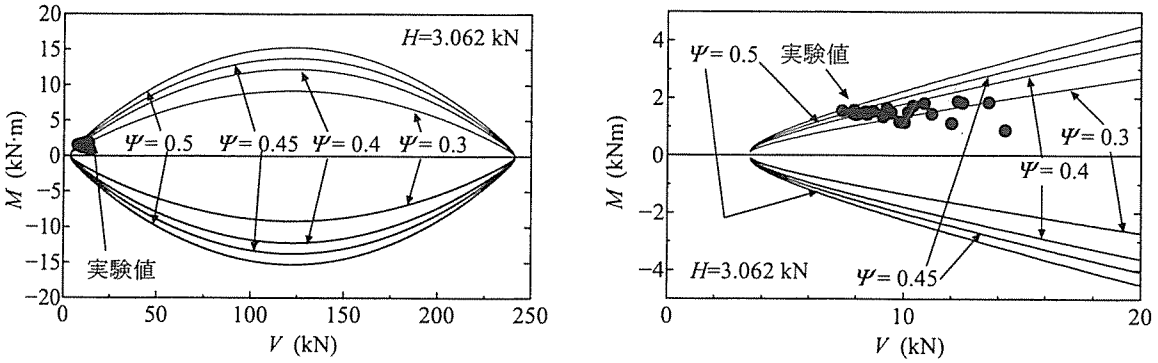
実験ケース		時刻 t	鉛直力 V	水平力 H	モーメント M
Case	Step	(sec)	(kN)	(kN)	(kN·m)
Case 1	Step 2	37.880	12.309	3.062	1.889
Case 1	Step 4	5.654	11.684	4.065	1.544
Case 1	Step 5	7.331	10.583	−3.189	−1.963
Case 2	Step 2	9.931	10.815	2.753	1.676



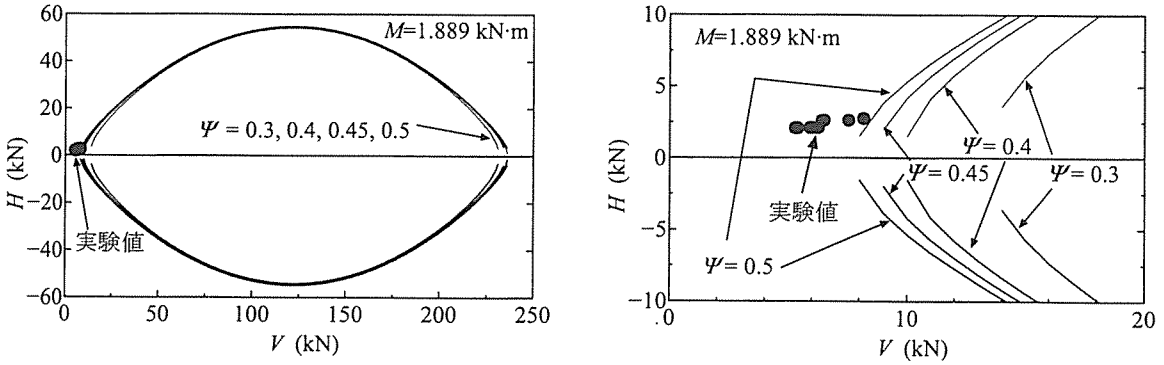
図–3.99 支持力曲面上における μ, ψ の概念図



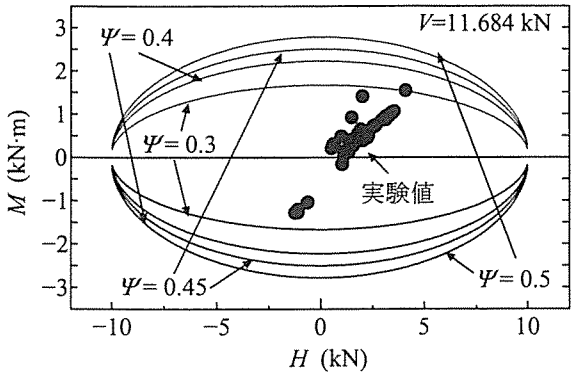
図–3.100 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値



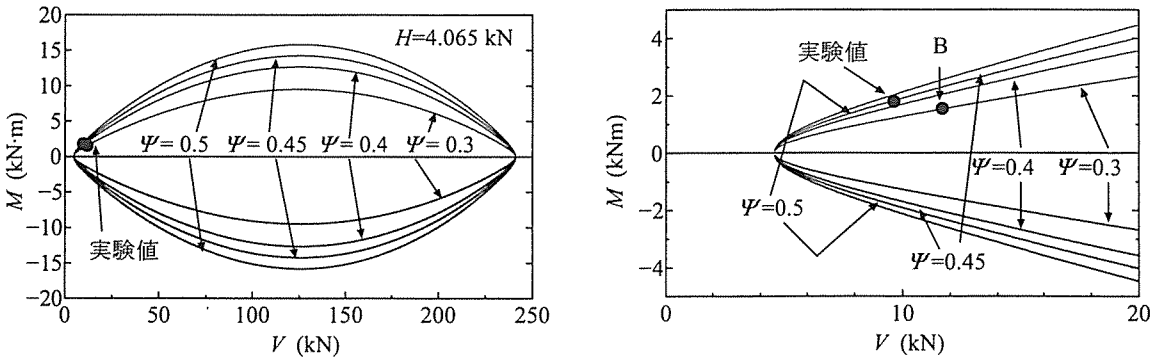
図–3.101 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *M-V* 関係の実験値および *M-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図, 右：拡大図)



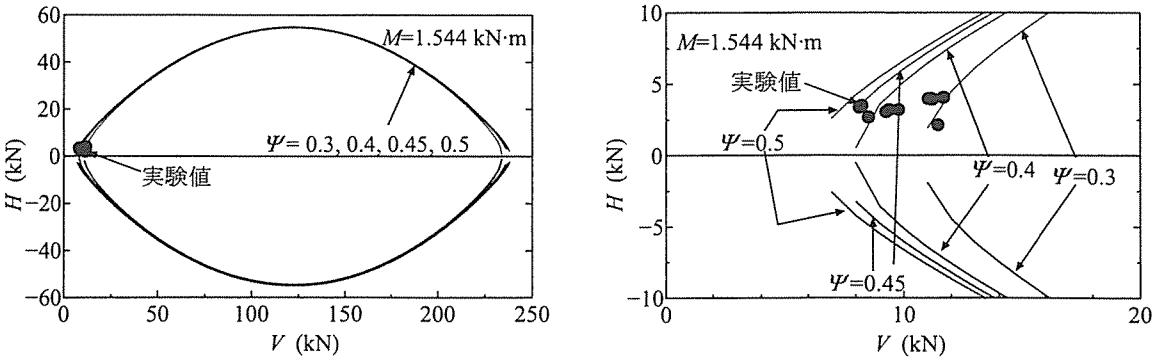
図–3.102 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *H-V* 関係の実験値および *H-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図, 右：拡大図)



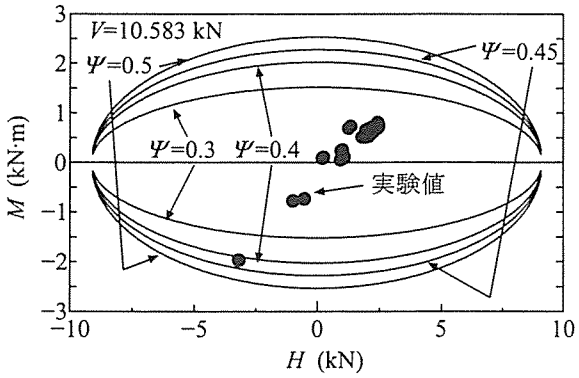
図–3.103 Case 1-Step 4, 神戸波, *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値



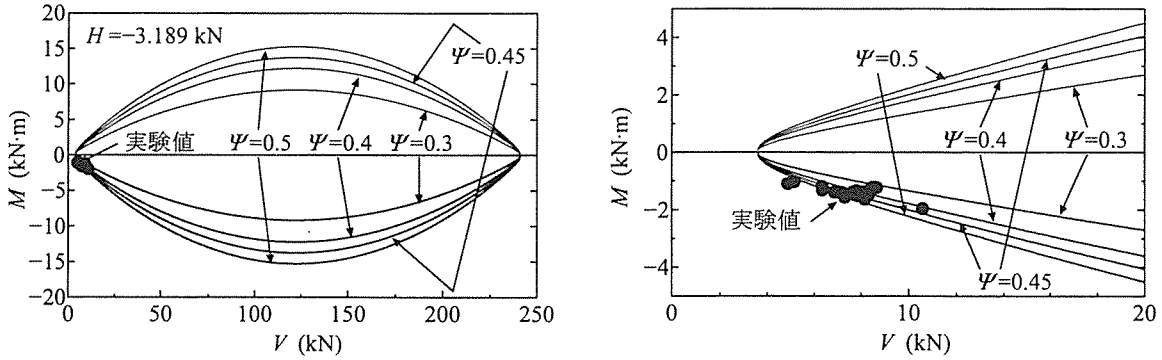
図–3.104 Case 1-Step 4, 神戸波, *M-V* 関係の実験値および *M-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)



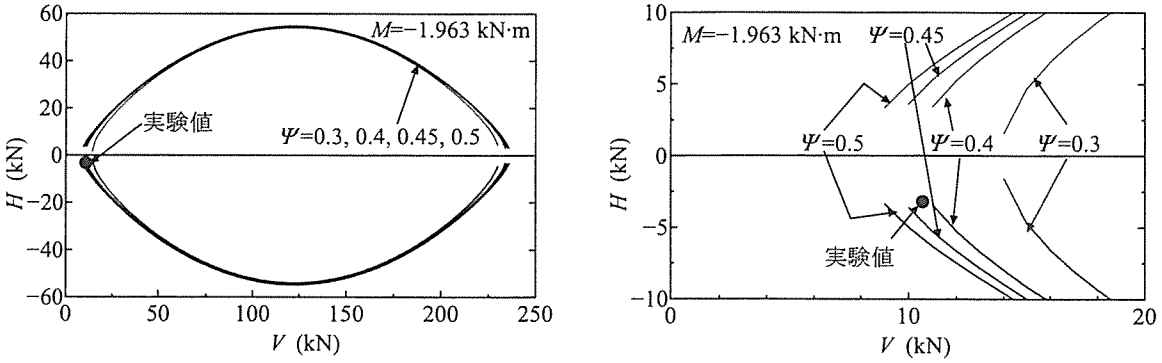
図–3.105 Case 1-Step 4, 神戸波, *H-V* 関係の実験値および *H-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)



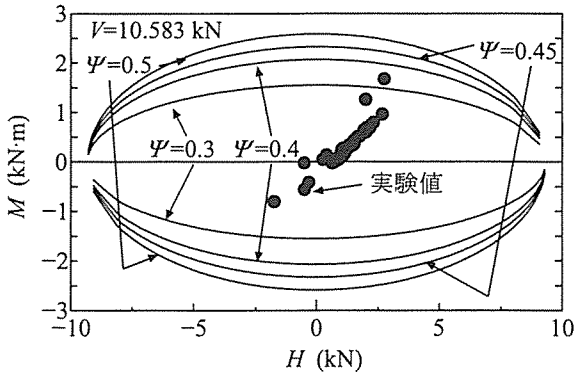
図–3.106 Case 1-Step 5, 神戸波, *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値



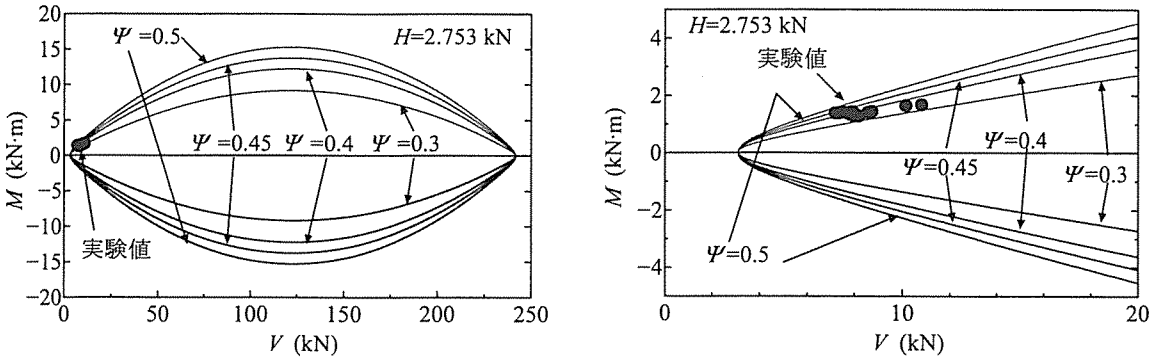
図–3.107 Case 1-Step 5, 神戸波, *M-V* 関係の実験値および *M-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)



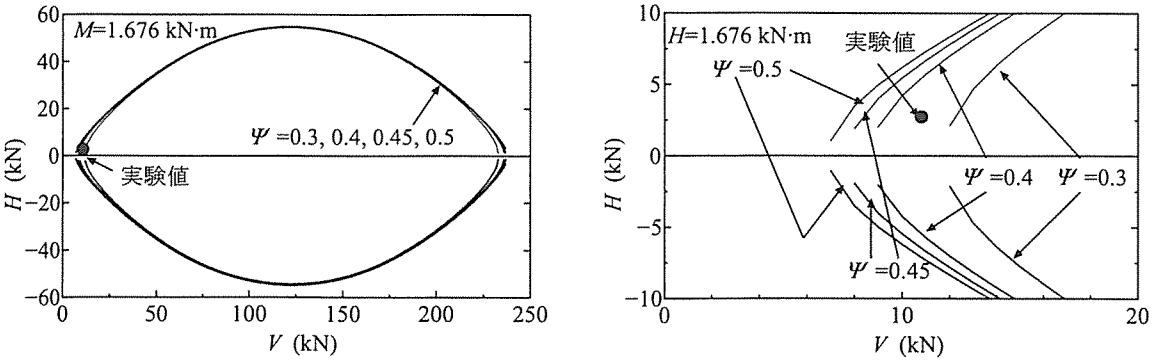
図–3.108 Case 1-Step 5, 神戸波, *H-V* 関係の実験値および *H-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)



図–3.109 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *H-M* 関係の実験値および *H-M* 支持力曲線計算値



図–3.110 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *M-V* 関係の実験値および *M-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)

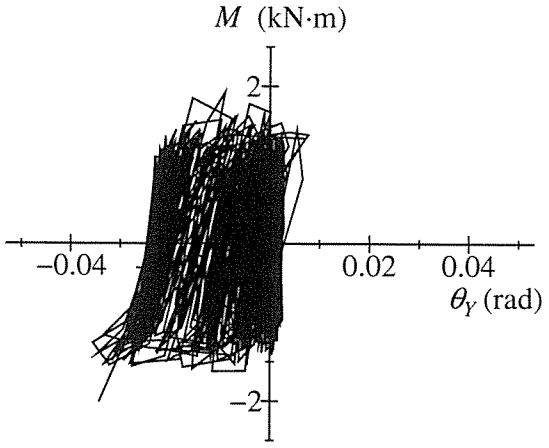


図–3.111 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *H-V* 関係の実験値および *H-V* 支持力曲線計算値 (左：全体図，右：拡大図)

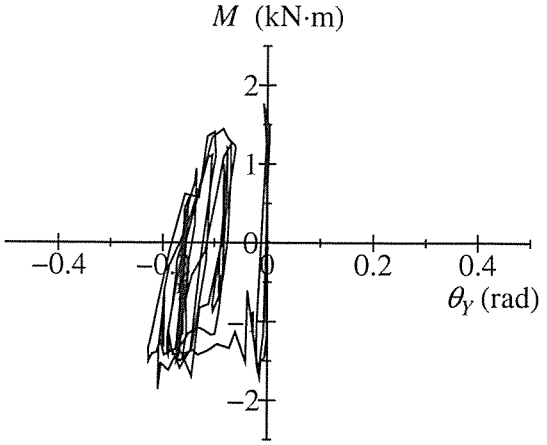
3.11 基礎底面作用力と変位の関係

3.11.1 画像解析データを用いて求めた M-θ_Y 関係

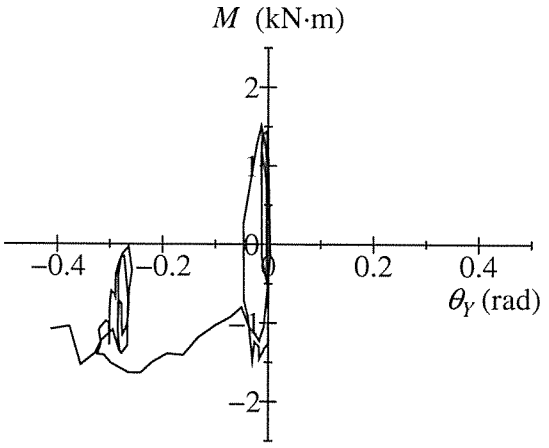
図–3.112～3.115 に，各加振におけるモーメント M-回転角 θ_Y 関係を示す．ここで，θ_Y は画像解析処理により算出した回転角である．特徴の一つは，M の値に上限が見られ，かつループの中心位置がずれていくことである．先に示した通り，最大モーメントが作用している間，地盤の塑性変形が生じ，基礎の回転角 θ_Y は増加する．その塑性変形による回転角 θ_Y は変形方向に残留するため，残留回転角が累積方向に履歴ループ中心位置がずれる．なお，加振ケースにより回転角 θ_Y のレベルが異なるため，回転角 θ_Y スケールを変えて示した．



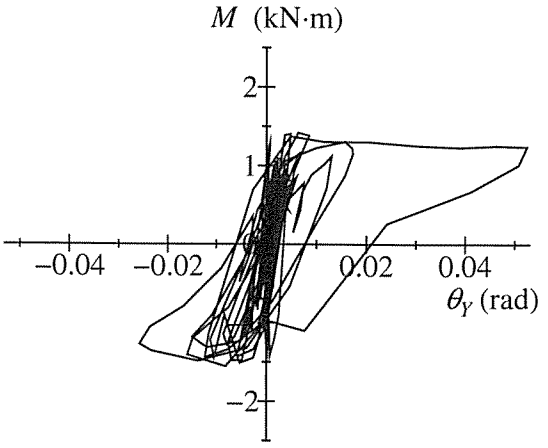
図–3.112 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係



図–3.113 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係



図–3.114 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係

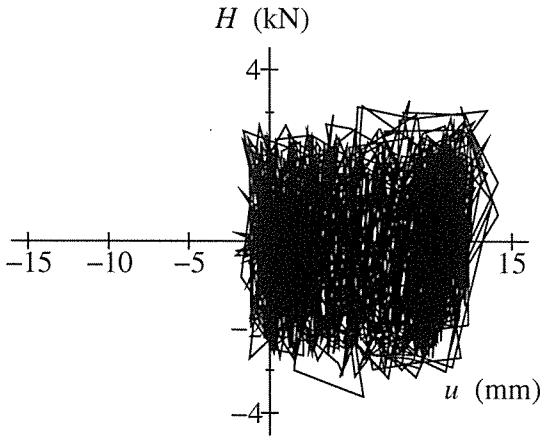


図–3.115 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係

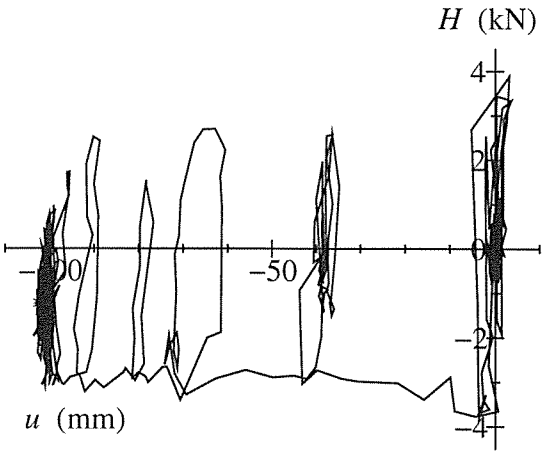
3.11.2 水平力 H-水平変位 u 関係

図–3.116～3.119 に橋脚から基礎に作用する水平力 H と基礎底面中心位置の水平変位 u の関係を示す．ここに，水平変位 u は画像解析処理により算出した基礎底面中心位置での水平変位であり，地表面との相対変位である (地表面との相対変位の求め方は，「3.8 基礎の変位の時刻歴」参照).

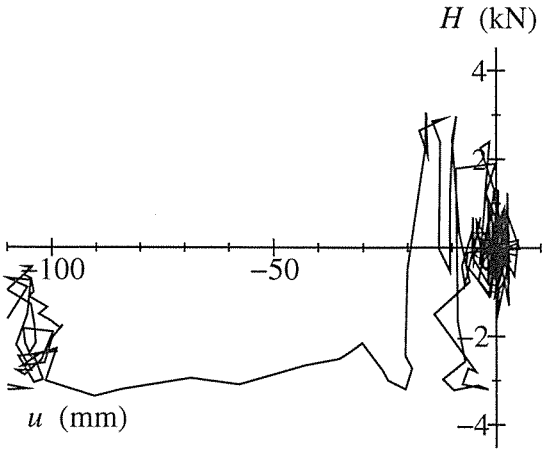
これらの図より先に示した M-θ_Y 関係と同様に，水平力 H にモーメント M と同様な上限値 (最大水平力) が見られ，かつ H-u 関係のループの中心がずれていく傾向が見られる．水平力 H が上限値に達したとき，水平力の作用方向に水平変位 u が増加し，その残留水平変位は徐々に累積される．履歴ループは完全弾塑性型に近い形状である．図–3.117 の Case 1-Step 4 及び図–3.118 の Case 1-Step 5 でその様子が顕著に見られる．ここで，水平変位 u が急増する過程を回転角 θ_Y との関係から考察しておく．後述する「3.12 基礎に生じる各変位の関係」の図–3.146，3.149 は，Case 1-Step 4 および Case 1-Step 5 の回転角 θ_Y-水平変位 u 関係であり，回転角 θ_Y の増加に伴い水平変位 u が増加していることがわかる．水平変位 u の急増は，回転挙動とも連成している．



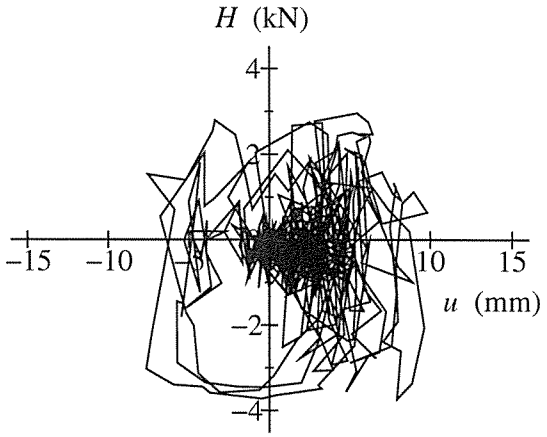
図–3.116 Case 1-Step 2, 七峰橋波, H-u 関係



図–3.117 Case 1-Step 4, 神戸波, H-u 関係



図–3.118 Case 1-Step 5, 神戸波, H-u 関係

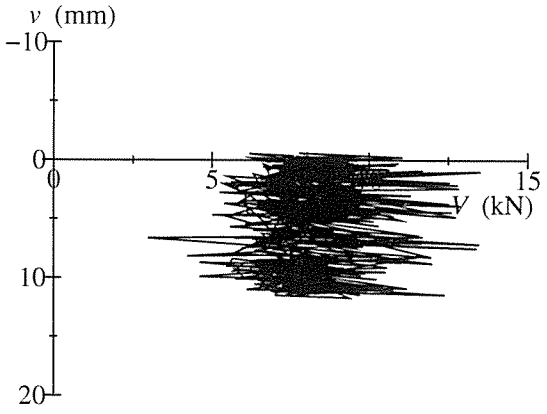


図–3.119 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), H-u 関係

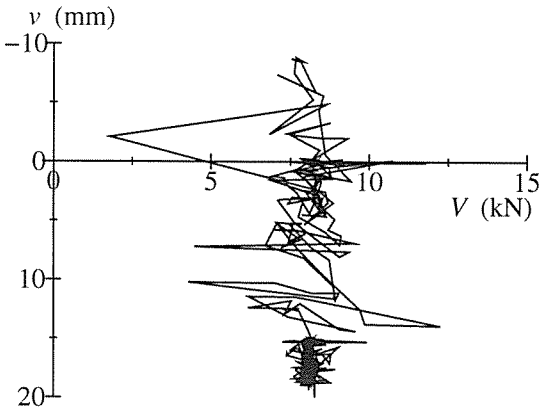
3.11.3 鉛直力 V-鉛直変位 v 関係

図–3.120～3.123 に橋脚から基礎に作用する鉛直力 V と基礎の鉛直変位 v の関係を示す．また，図–3.124 は，図–3.120 の一部を取り出した拡大図であり，図中の番号は，V-v 関係の時刻歴の順番を示している．ここに，v は画像解析処理により算出した基礎底面中心位置での鉛直変位である．「3.7 基礎底面作用力の時刻歴」で示した通り，基礎の浮上り挙動に伴う慣性力により鉛直力 V は増減する．すなわち，基礎底面に作用する鉛直力 V は，浮上り時には上向きの慣性力が働くために減少し，着地時には下向きの慣性力が働くために増加する．そのため，図–3.124 に示すように右下がりの履歴ループとなっている．

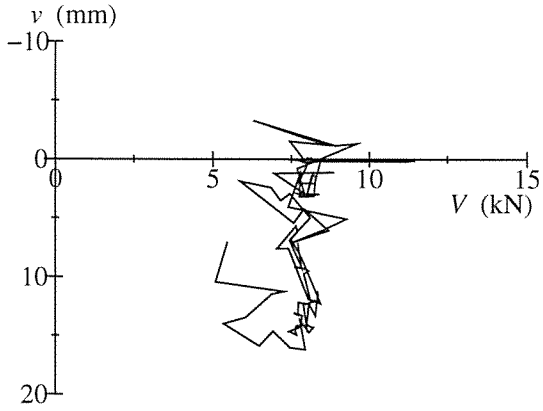
地盤の相対密度および基礎平面寸法が同じ条件で行った鉛直載荷実験において，極限支持力は 244.8 kN であった[5]．今回の模型重量は 8.385 kN であり，極限支持力に対して非常に小さな鉛直力である．また，加振中の鉛直力の最大値 16 kN も極限支持力に比べて非常に小さい．極限支持力に対して，作用鉛直荷重が小さくても残留沈下が生じていることから，鉛直力 V だけでなく，水平力 H，モーメント M が作用することでも顕著な沈下が生じると考えられる．



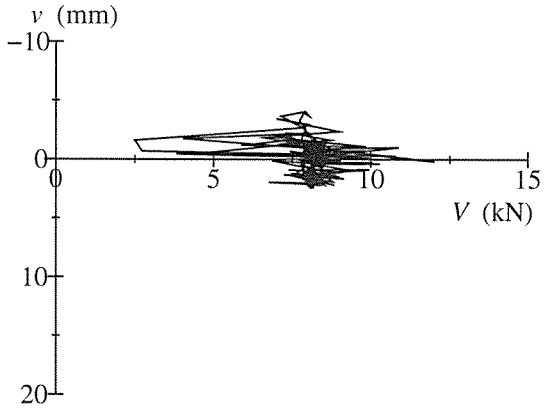
図–3.120 Case 1-Step 2, 七峰橋波, V-v 関係



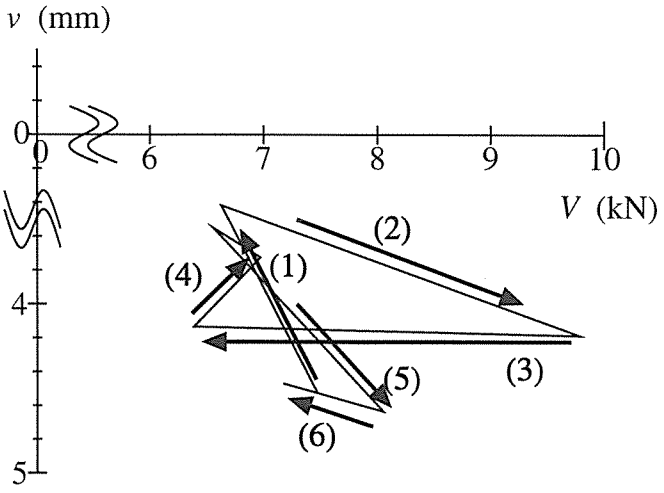
図–3.121 Case 1-Step 4, 神戸波, V-v 関係



図–3.122 Case 1-Step 5, 神戸波, *V*-*v* 関係



図–3.123 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *V*-*v* 関係

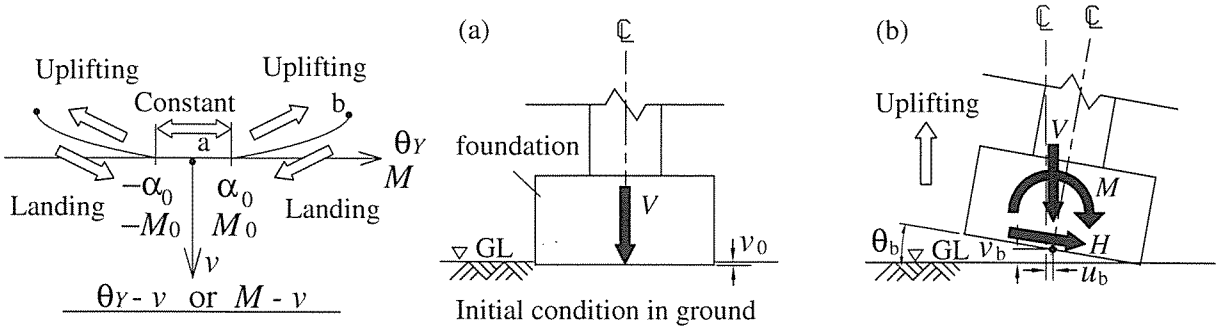


図–3.124 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *V*-*v* 関係拡大図

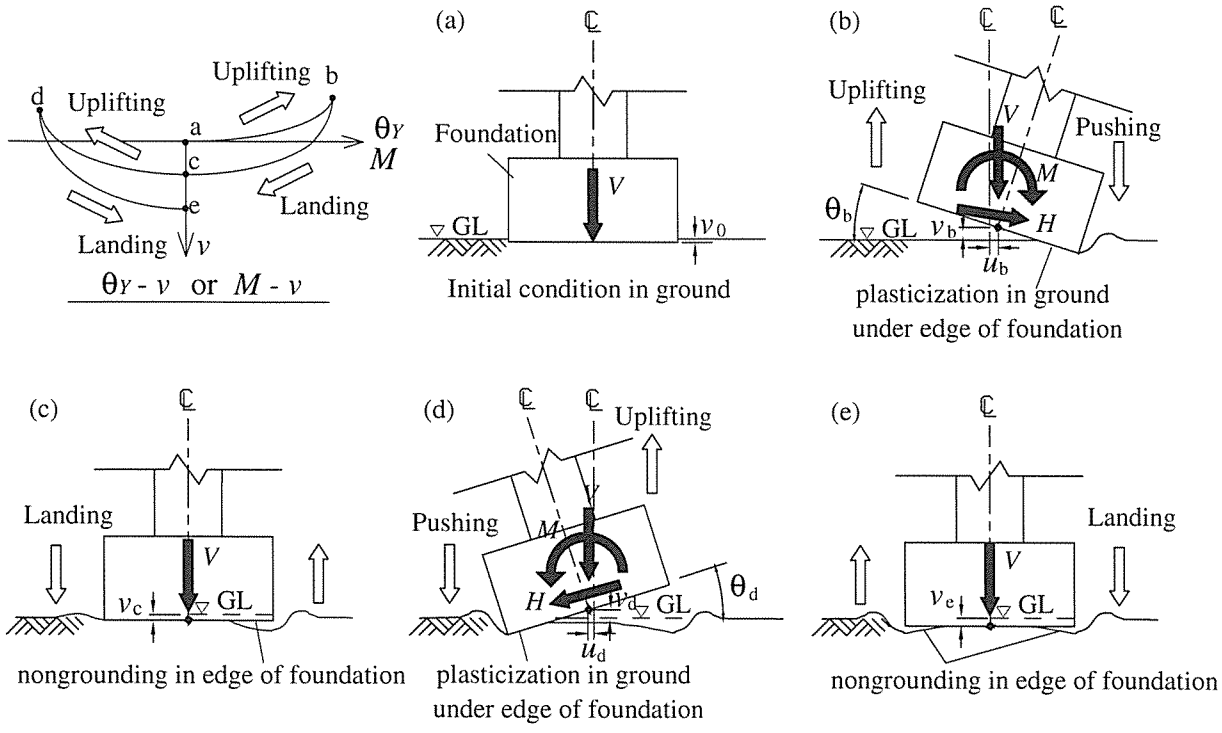
3.11.4 モーメント M-鉛直変位 v および水平力 H-鉛直変位 v 関係

図–3.125，3.126 に，モーメント M および水平力 H による基礎の挙動と鉛直変位 v との関係を概念図で示す．簡単のため鉛直力 V は一定とする．基礎底面地盤が弾性範囲内であると仮定したときの挙動と，塑性化する場合の挙動は，それぞれ以下の通りである．

- 基礎底面地盤が弾性範囲内であると仮定したときの挙動 (図–3.125)
  1) 鉛直荷重 V により鉛直変位 v_0 が生じる．
  2) 加振前の状態 (a) から (b) に向かって，モーメント M および水平力 H が増加する．モーメント M が浮上り限界モーメント M_0 を超えたときに，基礎端部の浮上りが生じる．
  3) 基礎底面地盤が塑性化しない場合には，基礎の浮上りにともない，基礎底面中心位置の鉛直変位 v はマイナス方向に増加する．
  4) 除荷に伴い，(a) に戻る．モーメント M が浮上り限界モーメント M_0 を下回ると同時に，基礎底面前面が着地し，鉛直変位 v は一定の値 v_0 となる．
- 基礎底面地盤が塑性化する場合の挙動 (図–3.126)
  1) 鉛直荷重 V により鉛直変位 v_0 が生じる．
  2) 加振前の状態 (a) から (b) に向かって，モーメント M および水平荷重 H が増加する．初期地盤からの浮上りは，先に示す弾性挙動と同様に生じる．
  3) 基礎底面に作用するモーメント M および水平荷重 H は増加し，基礎底面は浮上りを生じるとともに，地盤と接している押込み側基礎端部地盤が塑性化する．地盤が塑性化することで，基礎は回転方向，水平方向だけでなく鉛直方向 (沈下方向) にも顕著な変位が生じる．
  4) (b) から (c) に向かうとき，基礎底面中央位置に比較して，押込み側基礎端部地盤は塑性化し残留沈下も大きい．このため，押込み側であった基礎端部底面は，水平 (回転角ゼロ) になっても非接地状態となる．したがって，基礎底面接地幅が減少するため，基礎中央部の鉛直変位 v_c は v_0 よりも沈下方向へ増大すると考えられる．
  5) (c) から (d) に向かうときも，(a) から (b) に向かう時と同様に，押込み側基礎端部地盤が塑性化する．
  6) そして，(d) から (e) に向かう際に，基礎底面接地幅が減少するため，鉛直変位 v_e は，v_c よりもさらに沈下方向へシフトする．
  7) 繰返しモーメント M および水平力 H が作用することで，以上の挙動が繰り返され，基礎の沈下は累積されていく．



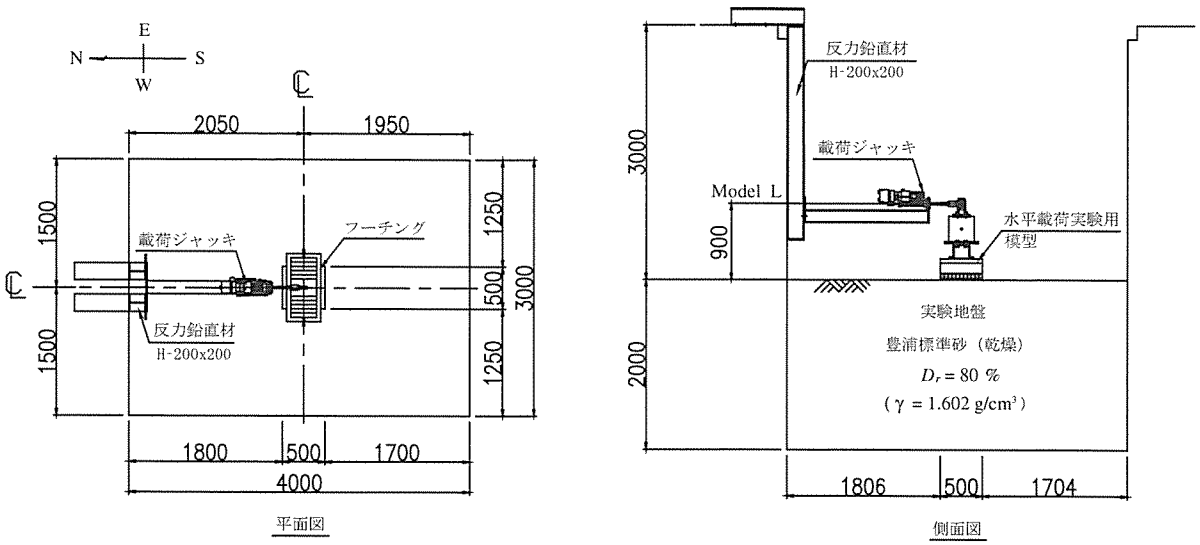
図–3.125 *M*-*v* または θ_Y-*v* 関係概念図 (弾性挙動)



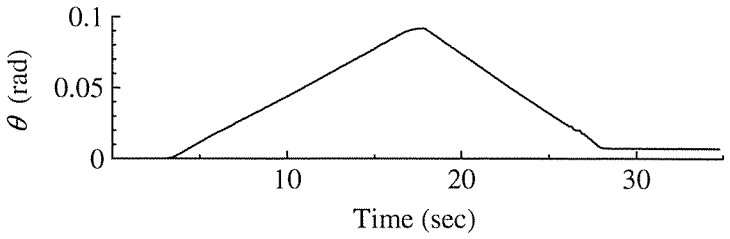
図–3.126 *M*-*v* または θ_Y-*v* 関係概念図 (塑性化挙動)

こうした挙動は，著者らが行った静的繰返し載荷実験[5]でも確認されている．ここでは，模型の頂部に単調水平載荷，交番水平載荷が与えられた実験を参照する．概要を図–3.127 に示す．参照する実験ケースで用いられている模型は振動台実験とほぼ同じものであり，また，地盤の相対密度もほぼ同一である．図–3.128～3.130 に静的繰返し載荷実験での載荷パターンを示す．静的繰返し載荷実験は，模型頂部を載荷ジャッキを用いて水平方向に載荷するものである．図–3.128～3.130 では，後述の M-θ_γ 関係と対応させるために，載荷により生じる基礎底面の回転角のパターンを示している．載荷点の水平変位の載荷速度は約 1 cm/s であり，回転角は約 0.006 rad/s (いずれも実験結果より逆算した値) である．単調水平載荷実験とは，回転角約 0.1 rad まで，模型天端を一定速度で載荷した実験である (図–3.128)．交番水平載荷実験とは，載荷の繰返し回数が多い Type I 載荷パターン (図–3.129) と載荷の繰返し回数が少ない Type II 載荷パターン (図–3.130) の 2 種類の載荷パターンにて，模型天端を一定速度で載荷した実験である．いずれの載荷も変位制御にて行っている．交番水平載荷実験結果を振動台実験結果と比較するときには，Case 1-Step 2 の七峰橋波については Type I 載荷パターンを，その他の神戸波のケースについては Type II 載荷パターンの結果を用いることとし，振動台実験における各加振にて生じた最大回転角レベルに近い回転角が基礎に生じたときのモーメント M-回転角 θ_γ 関係の履歴ループを用いた．図–3.131，3.132 に，静的繰返し載荷実験における，モーメント M-鉛直変位 v および回転角 θ-鉛直変位 v 関係の一例を示す．モーメント M の増加とともに，基礎の回転角 θ が増加する．そして，基礎の浮上りとともに基礎底面中心位置の鉛直変位 v はマイナス側に増加する．その後，モーメント M は一定値に収束する．地盤が塑性化するため，回転角 θ および鉛直変位 v が生じる．そのため，着地時の θ-v 曲線は，浮上り時と同一ルートとはならずに，鉛直変位が下方にシフトした曲線となる．水平力 H-鉛直変位 v 関係についても同様の傾向である．

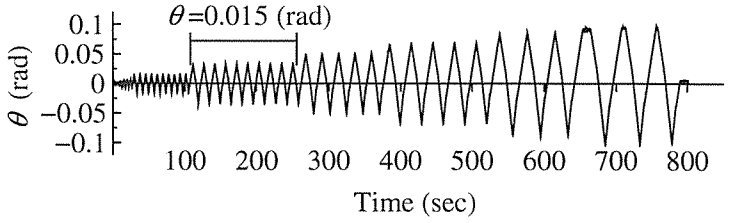
図–3.133～3.136 に，各加振におけるモーメント M-鉛直変位 v 関係を示す．また，図–3.137～3.140 に水平力 H-鉛直変位 v 関係を示す．ここで，v は画像解析処理により算出した基礎底面中心位置での鉛直変位である．前述の通り，上限値に達した正負のモーメント M，または水平力 H が繰り返され，同時に地盤の塑性化も繰り返されるため，沈下が累積されて行くことがわかる．



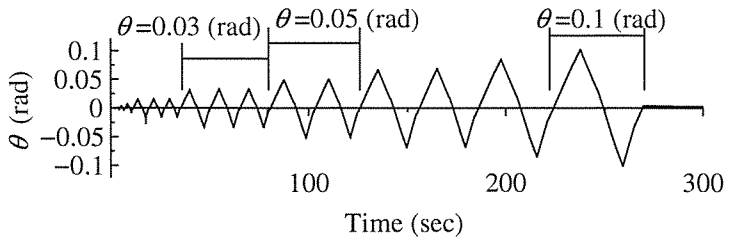
図–3.127 静的載荷実験概要図



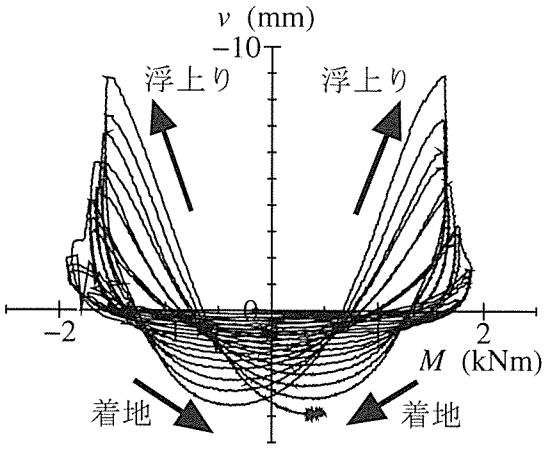
図–3.128 単調水平載荷パターン



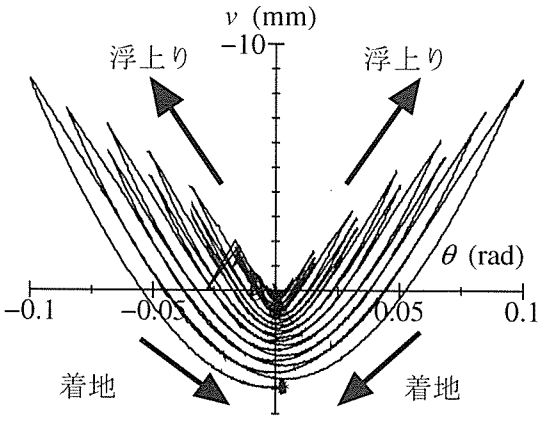
図–3.129 交番水平載荷パターン (Type I)



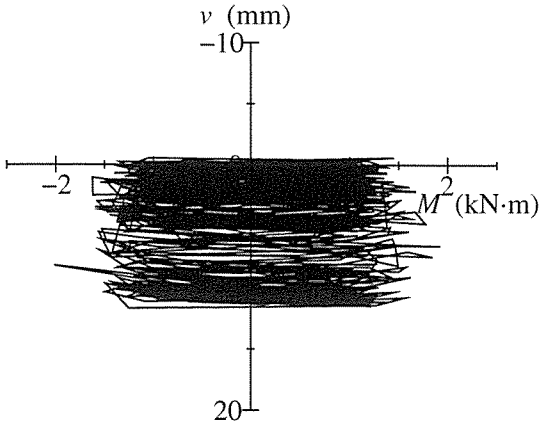
図–3.130 交番水平載荷パターン (Type II)



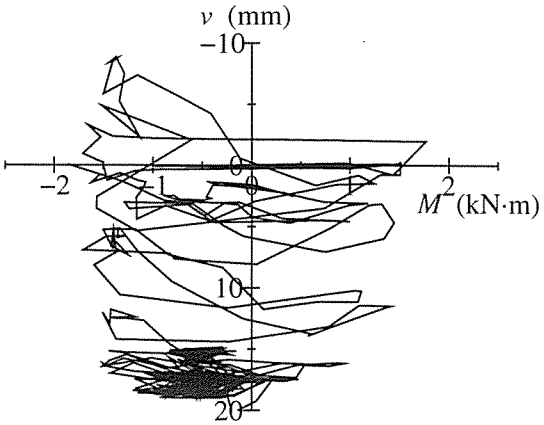
図–3.131 静的水平載荷実験 M-v 関係



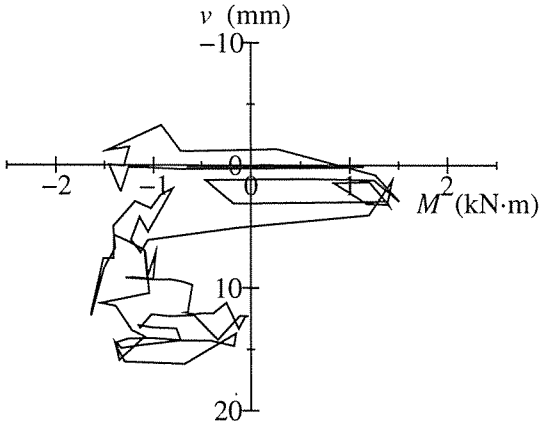
図–3.132 静的水平載荷実験 θ_γ-v 関係



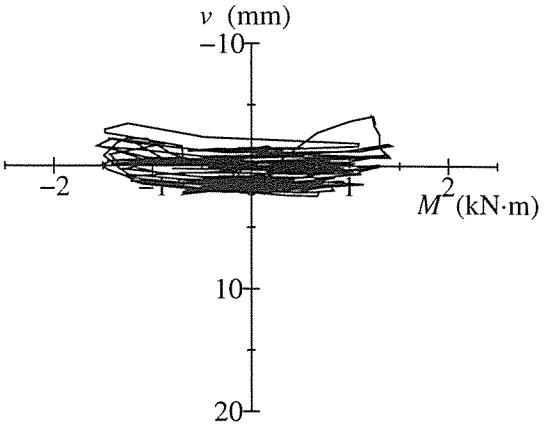
図–3.133 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *M*-*v* 関係



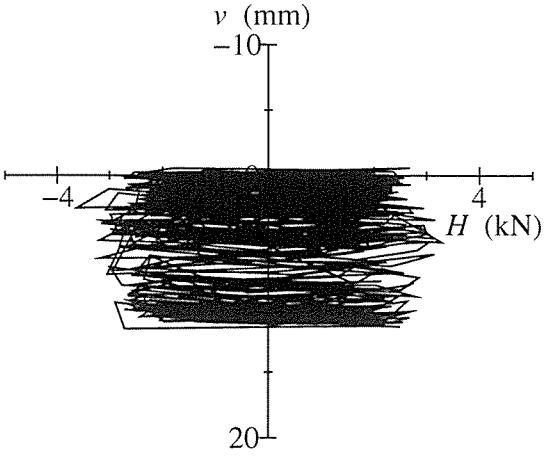
図–3.134 Case 1-Step 4, 神戸波, *M*-*v* 関係



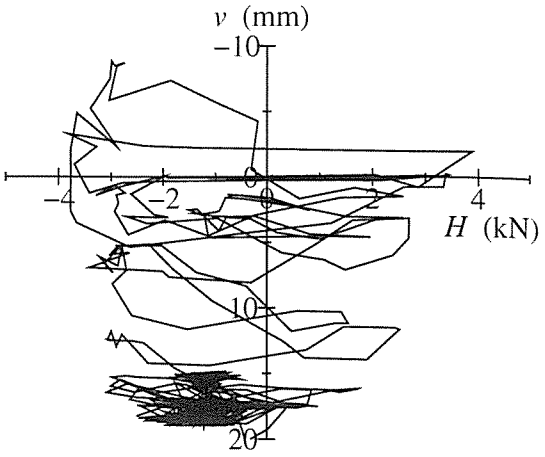
図–3.135 Case 1-Step 5, 神戸波, *M*-*v* 関係



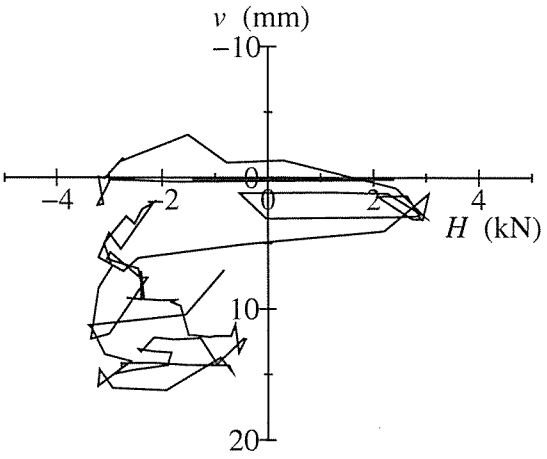
図–3.136 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *M*-*v* 関係



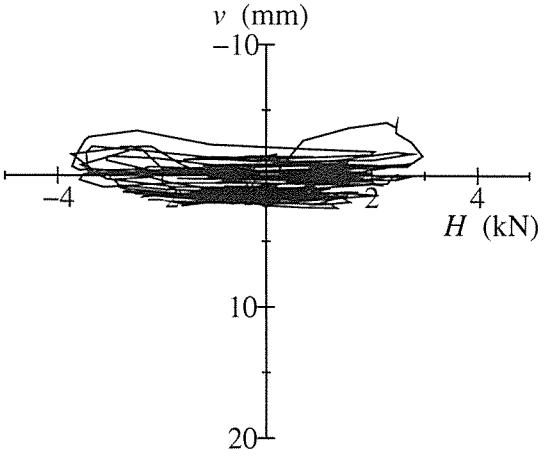
図–3.137 Case 1-Step 2, 七峰橋波, *H*-*v* 関係



図–3.138 Case 1-Step 4, 神戸波, *H*-*v* 関係



図–3.139 Case 1-Step 5, 神戸波, *H*-*v* 関係



図–3.140 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), *H*-*v* 関係

3.12 基礎に生じる各変位の関係

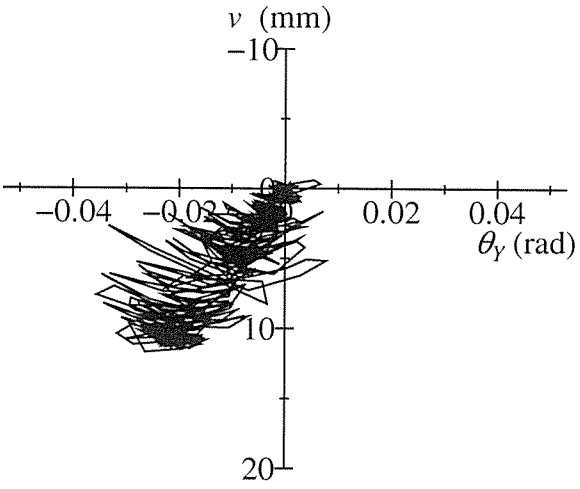
図–3.141～3.152 に，各加振における回転角 θ_Y-鉛直変位 v 関係，水平変位 u-鉛直変位 v 関係および回転角 θ_Y-水平変位 u 関係を示す．ここで，v，u および θ_Y は，画像解析処理により算出した基礎底面中心位置での変位である．

Case 1-Step 2 の七峰橋波での加振では，小さな回転挙動を繰返しながら，鉛直変位 v が累積された．回転角 θ_Y-水平変位 u 関係を見ると，回転角 θ_Y が負の方向 (南側方向) に傾斜しながら水平変位 u は北側に移動して行く．

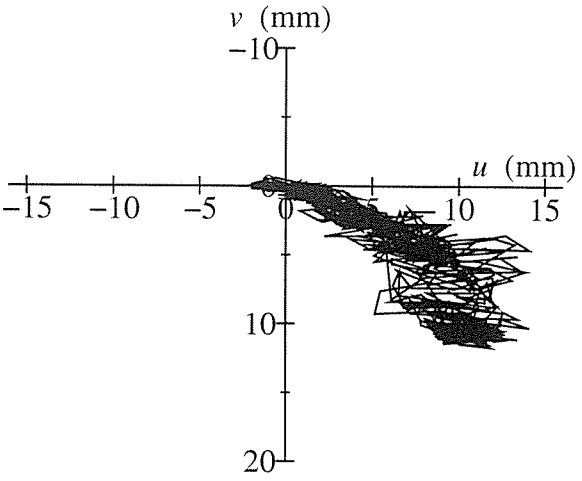
Case 1-Step 4 の神戸波での加振でも，回転挙動の繰返しとともに鉛直変位 v が累積された．水平変位 u は，回転角 θ_Y の増加に伴って同方向に増加した．

Case 1-Step 5 の神戸波での加振では，基礎が南側に大きく傾斜したのち転倒したケースである．よって，押込み側 (南側) の基礎端部地盤が大きく塑性化したことにより，回転角 θ_Y のみでなく，同時に水平変位 u，鉛直変位 v が生じた．

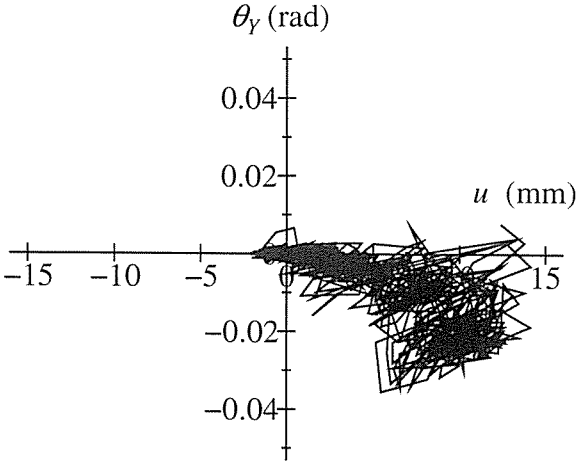
Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅 80 %) での加振では，Case 1-Step 2 と同様に，小さな回転挙動を繰返しながら，鉛直変位 v が累積された．ここで，Case 1-Step 2 と Case 2-Step 2 の回転角 θ_Y-鉛直変位 v 関係 (図–3.141, 図–3.150 参照) を比べると，Case 2-Step 2 の方がより大きな応答回転角であるにもかかわらず，残留沈下量は小さい．これは地震動の繰返し特性の違いに起因していると考えられる．このように基礎の応答変位が小さい場合であっても，残留変位量はそれに応じて小さくならないという点は，基礎の耐震設計において考慮されるべき事項であると考えられる．



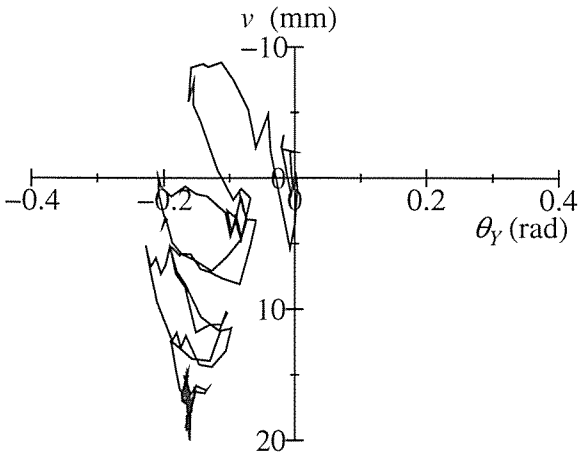
図–3.141 Case 1-Step 2, 七峰橋波, θ_Y-v 関係



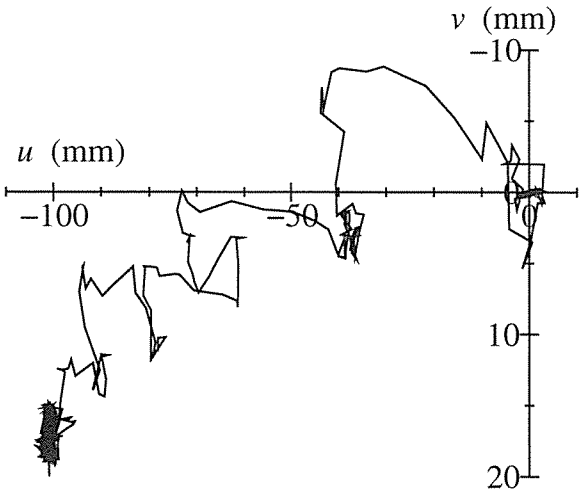
図–3.142 Case 1-Step 2, 七峰橋波, u-v 関係



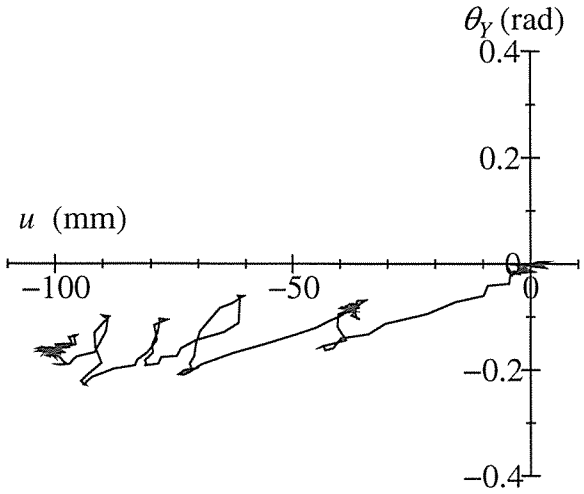
図–3.143 Case 1-Step 2, 七峰橋波, θ_Y-u 関係



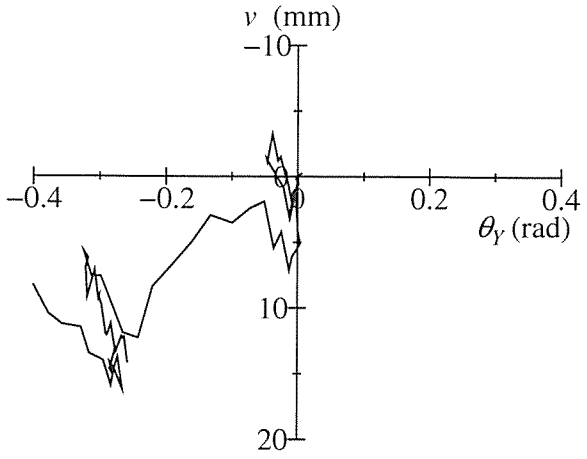
図–3.144 Case 1-Step 4, 神戸波, θ_Y-v 関係



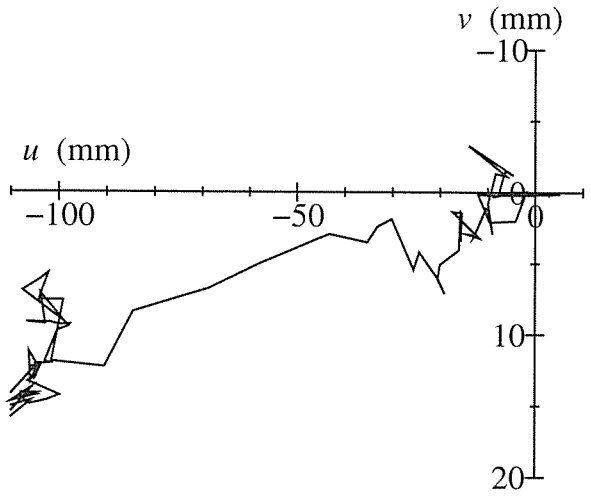
図–3.145 Case 1-Step 4, 神戸波, u-v 関係



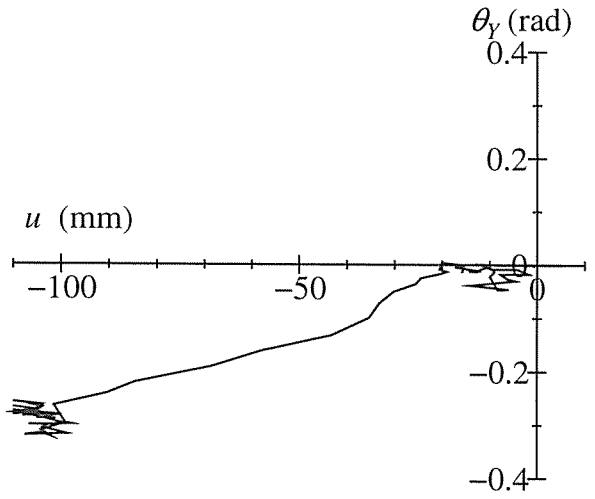
図–3.146 Case 1-Step 4, 神戸波, θ_Y-u 関係



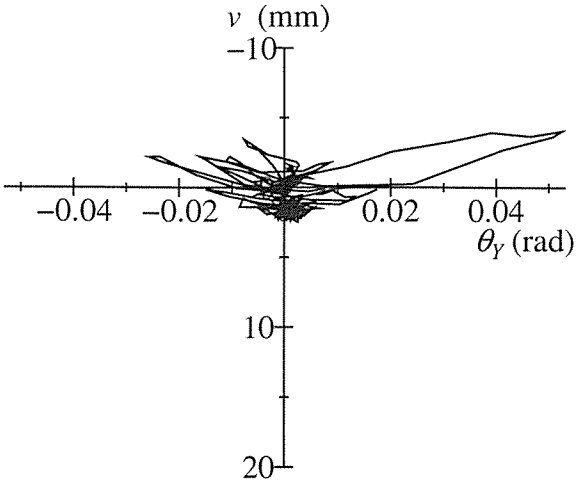
図–3.147 Case 1-Step 5, 神戸波, θ_Y-v 関係



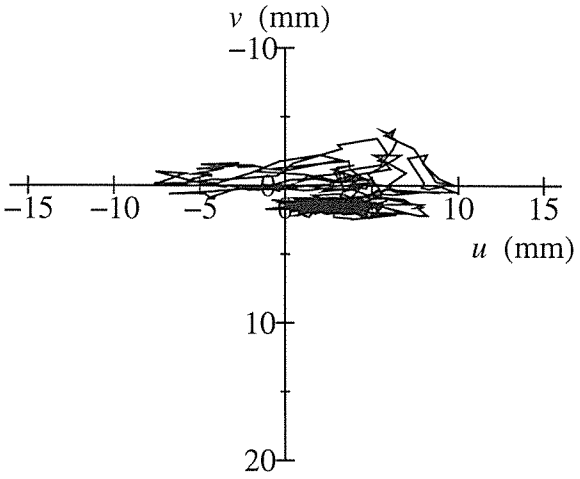
図–3.148 Case 1-Step 5, 神戸波, u-v 関係



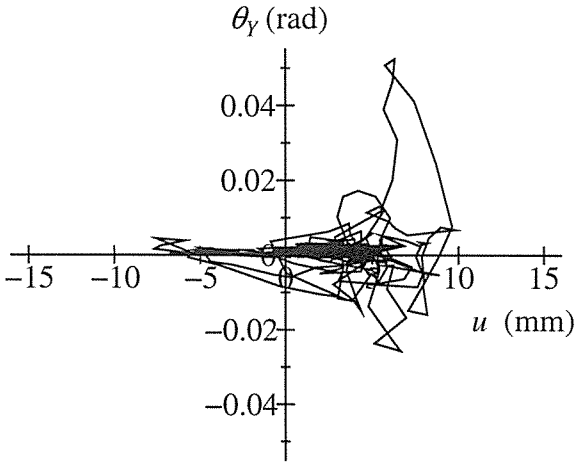
図–3.149 Case 1-Step 5, 神戸波, θ_Y-u 関係



図–3.150 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), θ_Y-v 関係



図–3.151 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), u-v 関係



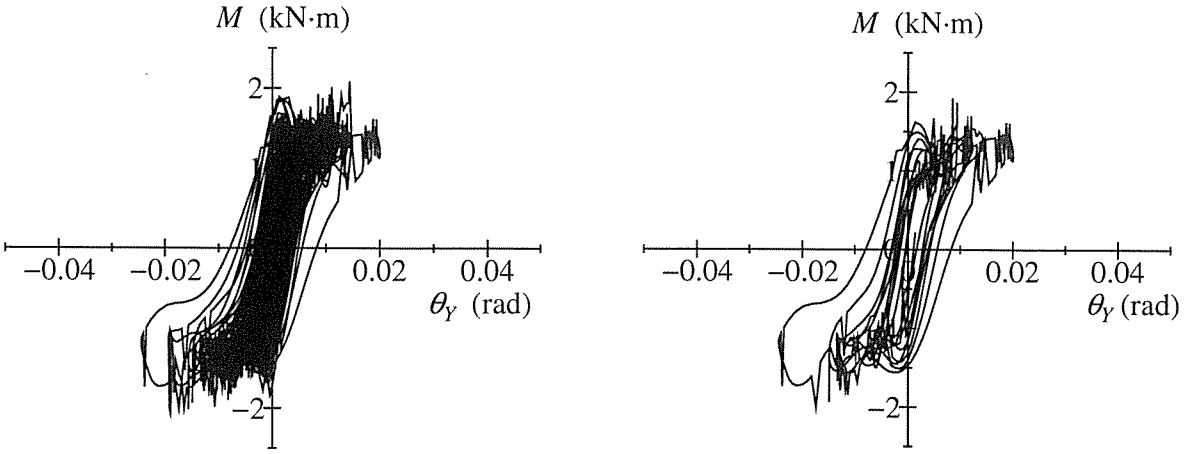
図–3.152 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), θ_Y-u 関係

3.13 加速度データを用いて求めたモーメント M に関する復元力特性

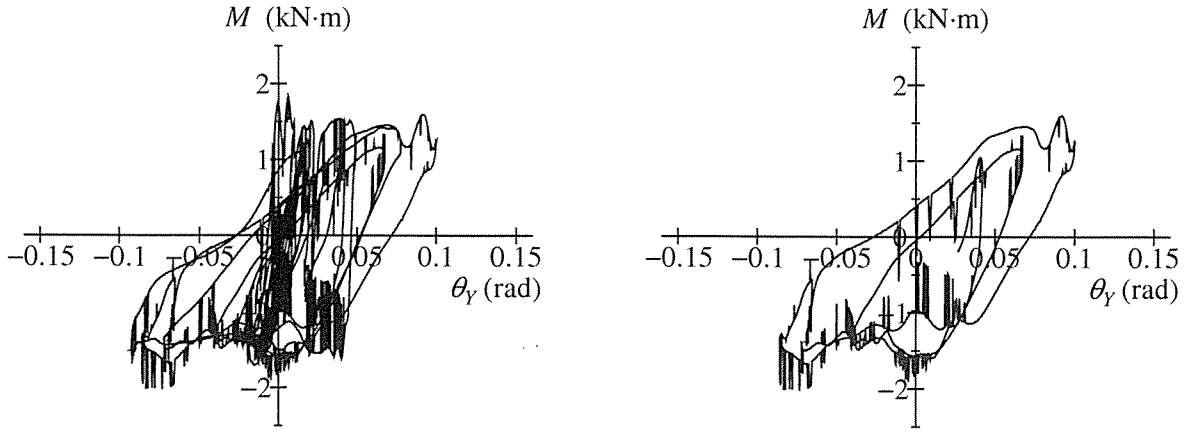
3.13.1 加速度データを用いて求めたモーメント M-回転角 θ 関係

図–3.153～3.156 に，橋脚から基礎底面へと作用するモーメント M と基礎に生じる X-Z 平面上の回転角 θ_Y の関係を示す．図左には全時刻の M-θ_Y 関係を，図右には最大回転角が生じた時刻を中心に前後 1 秒間，計 2 秒間を抽出した M-θ_Y 関係を示す．ここでは，基礎の復元力特性を分かりやすくするよう，変位のドリフト成分 (残留変位) が除去された加速度積分変位により評価される θ_Y を用いた．

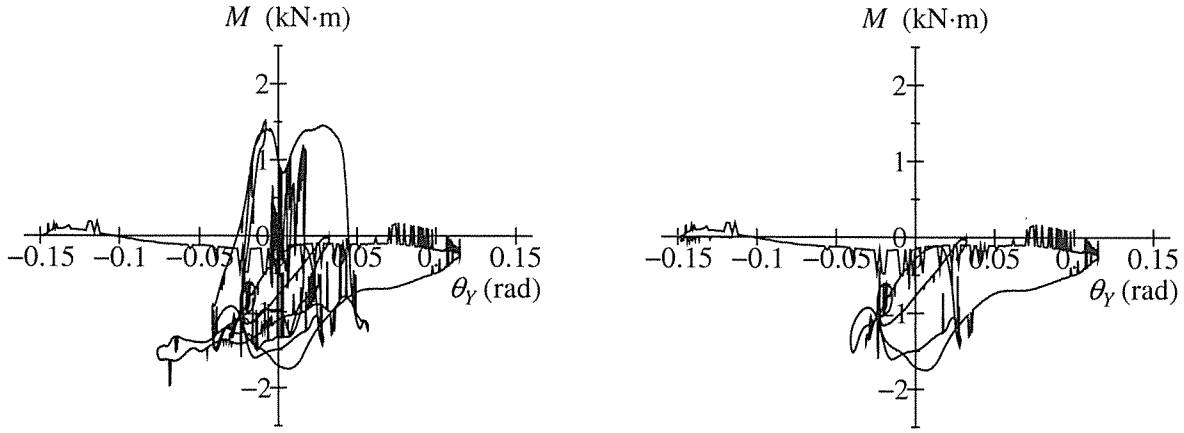
M-θ_Y の履歴ループは，ある大きさのモーメントで一定値となり (最大モーメント)，その後，モーメントの作用方向に回転角が増加するという挙動を示している．すなわち，最大モーメントが作用している間は地盤の塑性変形が累積されることを示す．そして，初期勾配に近い勾配で M=0 の軸に向かうバイリニア型に代表されるような挙動を示すが，θ_Y の振幅が大きくなるにつれ原点指向型のような履歴特性と混合されたような挙動を示す．



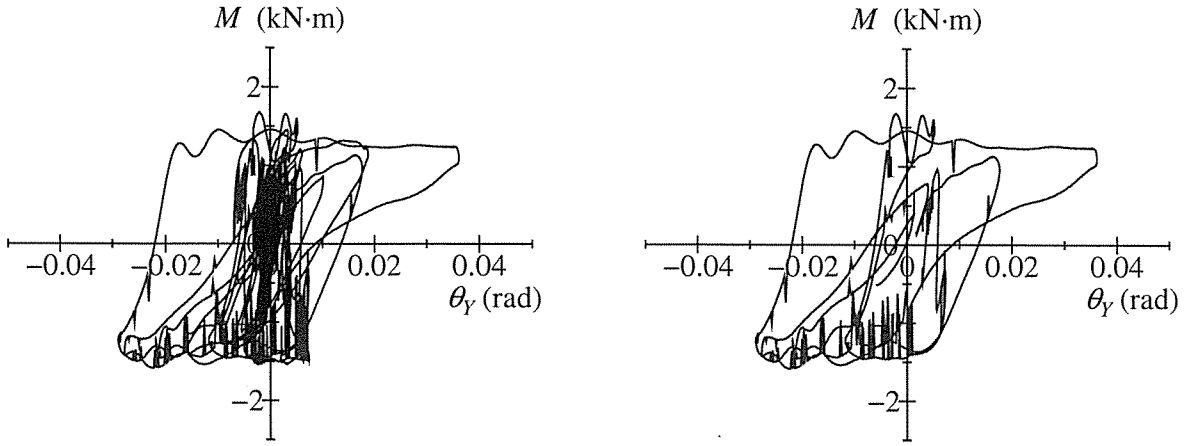
図–3.153 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出)



図–3.154 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出)



図–3.155 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出)



図–3.156 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係 (左：全時刻，右：最大回転角を中心に前後 1 秒間を抽出)

3.13.2 M-θ_Y 関係に関する静的繰返し載荷実験および計算値との比較

各加振におけるモーメント M-回転角 θ_Y 関係と，静的繰返し載荷実験における実験値および道路橋示方書[1]に示される式により計算された計算値 (以下，計算値と呼ぶ) を比較する．静的繰返し載荷実験については，「3.11.4 モーメント M-鉛直変位 v および水平力 H-鉛直変位 v 関係」を参照されたい．

道路橋示方書[1]に示される浮上りを考慮した基礎の M-θ_Y 関係を，式 (3.12) および (3.13) に示す．なお，地盤の塑性化の影響はここでは考慮しない．

- 浮上り前 ($0 \leq M \leq M_0$)

$$M = M_0 \frac{\alpha}{\alpha_0} \tag{3.12}$$

- 浮上り後 ($M_0 \leq M$)

$$M = \left(3 - 2\sqrt{\frac{\alpha_0}{\alpha}}\right) M_0 \tag{3.13}$$

ここに，M は基礎底面に作用するモーメント (kN·m)，α は応答回転角 (rad)，M_0 は基礎端部に浮上りが生じ始めるときの基礎底面モーメント (kN·m)，α_0 は基礎端部に浮上りが生じ始めるときの回転角 (rad) である．この M_0 および α_0 は，それぞれ式 (3.14) および式 (3.15) で算出される．

$$M_0 = \frac{B \cdot V}{6} \tag{3.14}$$

$$\alpha_0 = \frac{12 M_0}{B^3 \cdot D \cdot k_v} \tag{3.15}$$

ここに，B は基礎の回転軸に直交する平面に投影した基礎幅 (m)，V は基礎底面に作用する鉛直荷重 (kN)，D は基礎の回転軸方向に平行な面に投影した基礎幅 (m) (奥行き幅)，k_v は基礎底面の鉛直方向地盤反力係数 (kN/m^3) である．k_v は，表–3.3 に示した S 波速度結果より得られたせん断弾性係数 G を用い，そしてポアソン比を 0.3 と仮定し，式 (3.16), (3.17), (3.18) で算出した値である．ここに，G の値として，Case 1 および Case 2 の加振前に行われた S 波の計測結果から求まる 2 つのせん断弾性係数の平均値を用いた (表–3.3 参照)．入力値の詳細を，表–3.6 に示す．

$$E_0 = 2G(1 + \nu) \tag{3.16}$$

$$k_{v0} = \frac{1}{0.3} E_0 \tag{3.17}$$

$$k_v = k_{v0} \left(\frac{B_v}{0.3}\right)^{-3/4} \tag{3.18}$$

ここに，B_v は基礎の換算載荷幅 (m) で式 (3.19) で算出されたものである．

$$B_v = \sqrt{BD} \tag{3.19}$$

表–3.6 浮上りを考慮した M-θ_Y 関係計算諸元

基礎幅 B (m)	直交基礎幅 D (m)	鉛直荷重 V (kN)	せん断弾性係数 G (MN/m^2)	変形係数 E_0 (MN/m^2)	鉛直地盤反力係数 k_v (MN/m^3)	M_0 (kN·m)	α_0 (rad)
0.5	0.5	8.385	84.500	219.700	499.255	0.699	2.687×10^{-4}

表–3.7 回転ばね係数より算出される模型の固有振動数

模型重量 m (kN)	基礎底面断面 2 次モーメント I (m^4)	鉛直地盤反力係数 k_v (MN/m^3)	回転ばね係数 $k_r=k_v\times I$ (MN·m)	基礎底面から模型重心までの距離 $L\,(=h_G)$ (m)	固有振動数 ω_r (Hz)
8.385	0.0052	499.255	2.600	0.420	41.9

さらに，式 (3.20) に示す計算値を用いてロッキング動に対する基礎の固有振動数 ω_r を求めてみる．

$$\omega_r = \sqrt{\frac{k_r}{m \cdot L^2}} \tag{3.20}$$

ここに，k_r は回転ばね係数，m は模型重量，L は基礎底面から模型重心位置までの距離である．

表–3.7 に模型および地盤の諸元と固有振動数 ω_r の計算結果を示す．模型の固有振動数は 41.9 Hz と求まった．一方，「3.5 共振実験結果」から推定された，ロッキング動に関する基礎の固有振動数は 17.5 Hz であった．このように両者は異なる値であった．なお，固有振動数が 17.5 Hz の場合の k_v は 87.111 MN/m^3 である．

図–3.158～3.171 に各ケースにおけるモーメント M-回転角 θ_Y 関係と計算値および静的繰返し実験の実験値を示す．ここで，振動台実験結果における θ_Y は加速度記録から求めた基礎の変位を用いて求めた値である．また，図中の計算値 (a) は k_v=499.255 MN/m^3 の場合の M-θ_Y 関係計算結果であり，図中の計算値 (b) は k_v=87.111 MN/m^3 の場合の計算結果である．

図–3.158 には，Case 1-Step 2 の七峰橋波加振の全時刻における実験値と，単調水平載荷実験および計算値の M-θ_Y 関係を示す．ここで，単調水平載荷実験は正もしくは負のいずれか一方の値で得られるが，正負反転させた曲線も同時に描いている．最大モーメントは，振動台実験結果，単調水平載荷実験結果，交番水平載荷実験結果，および計算値のいずれも近い値となった．

図–3.159 には計測開始から約 13 秒間の挙動を示す．これは，基礎端部に浮上りが生じ始めるときの回転角 α_0 と同程度，もしくはそれ以下の回転角レベルの挙動に相当する．また，「3.8 基礎変位の時刻歴」で示す鉛直変位の時刻歴を見ても，計測開始から 13 秒までに顕著な鉛直沈下は起きていない．以上より，この時間においては，基礎は弾性挙動をしていると見なすことができ，以下弾性範囲での挙動と呼ぶ．M-θ_Y 関係の勾配は，実験値と計算値 (a) とでほぼ一致しているが，計測値 (b) は実験値と大きく異なる結果となった．回転に関する剛性は，変位レベルが小さい弾性範

囲ではせん断弾性係数より求められた k_r の値を用いて算出される計算値に近い値が得られるようである．

図–3.160 には，最大回転角が生じた付近の時刻における振動台実験の実験値，同程度の回転レベルの静的な繰返し水平載荷実験の実験値及び計算値を示す．振動台実験の実験値と静的な繰返し水平載荷実験での M-θ_Y 関係は，非常に良く似たS字の履歴ループとなった．

図–3.161(a), (b) はスウィープ波であり，「3.5 共振実験結果」の図–3.7 で共振振動数 17.5 Hz を求めた実験 (Case 1-Step 1) について M-θ_Y 関係を示したものである．同図 (a) は，加振振動数が神戸波の卓越振動数である 1~3 Hz (図–2.21~2.26 参照) における M-θ_Y 関係である．振動数の違いに応じて弾性勾配，および発生変位レベルが異なっている．

図–3.162 には，Case 1-Step 4 の神戸波加振の全時刻における実験値と，静的載荷実験結果および計算値を示す．図–3.160 の Case 1-Step 2 の七峰橋波加振の値と比較すると大きな回転角が生じているが，両者の履歴ループの形状は似ている．計算値と比べると，振動台実験結果，静的載荷実験結果のいずれも回転角が大きくなるにしたがいモーメントに差が現れた．これに関して，以下の 2 つの理由が挙げられる．

- 計算値は地盤の塑性化を考慮していないが，実験では地盤は塑性化している．
- 両実験値のモーメントは，基礎底面のロードセルで計測された鉛直反力より計算されている．回転変位が大きくなると，見かけ上，基礎端部は塑性化した地盤に根入れされた状態になるため，基礎底面だけでなく基礎側面でも死荷重を支持している状態になる．その結果，ロードセルで計測された鉛直反力を用いて計算したモーメントは実際に発生したモーメントより小さい．
- 基礎底面下の地盤変形の影響を受けている．

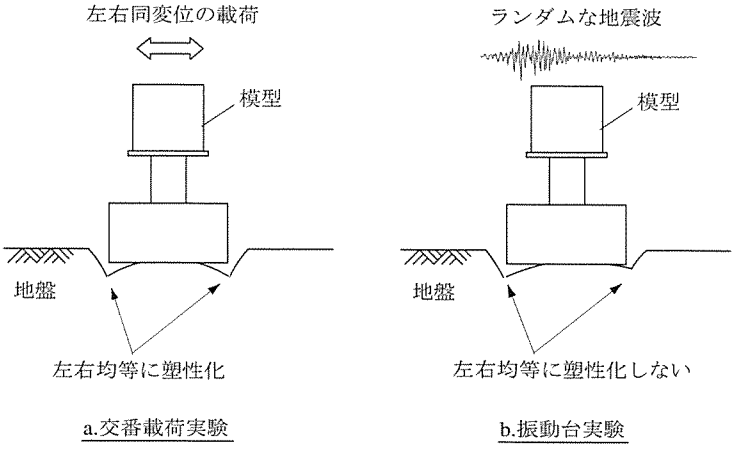
図–3.163 は，図–3.159 と同様に基礎に浮上りが生じるより前の時刻について M-θ_Y 関係を示したものである．図–3.159 と同様の傾向となった．

図–3.164 には，最大回転角が生じた付近の時刻における振動台実験値，同程度の回転レベルを載荷した時の静的な交番水平載荷実験の実験値及び計算値を示す．マイナスからプラスへの回転挙動については履歴ループの勾配は振動台実験と静的繰返し載荷実験とで類似している．しかし，プラスからマイナスへの回転角挙動については，振動台実験結果のループはふくらんだ形状になる．ここで，画像解析処理データを用いた M-θ_Y 関係においても，同様の傾向となるか否かを，Case 1-Step 4 を例にとって検証する．画像解析処理では回転角 θ_Y が一方向に累積されているため，計算値および静的水平載荷実験値と比較するために，回転角 θ_Y 軸の調整を行った．回転角 θ_Y 軸の調整は，モーメント M がゼロとなる点の時刻における回転角の平均値が，加速度積分変位から算出したときと画像解析処理から算出したときで同じになるようにする処理である．結果を図–3.165 に併せて示す．図–3.165 より，画像解析処理データを用いた解析結果でも，図–3.164 と同様にプラスからマイナスに移る際に，ループが膨らむことがわかる．データの解析法によらず同じ傾向が見られた振動台実験では，必ずしも基礎は正負対称の履歴挙動を示さない．また，図–3.157 に

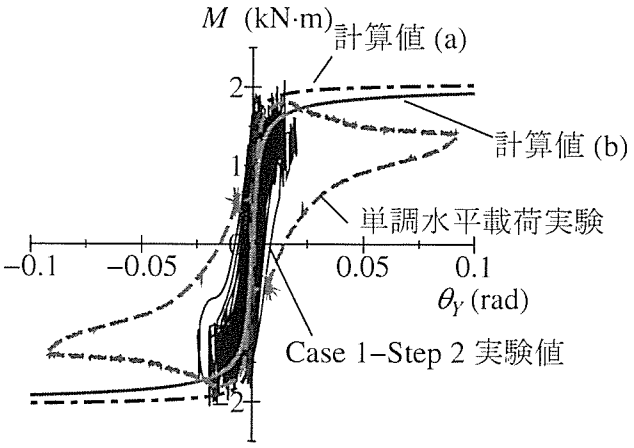
示す概念図のように，交番載荷実験結果では基礎両端部下の地盤の沈下量はほぼ等しくなるのに対して，振動台実験では基礎両端部下の地盤の沈下量は偏った分布になる．そこで，地盤の沈下形状の幾何学的な非対称性の影響で，回転方向ごとにループ形状が異なったと考えられる．

図–3.166～3.168 には，Case 1-Step 5 の神戸波加振の M-θ_Y 関係を示す．このケースは最も回転変位および基礎端部地盤の塑性化が大きく，最終的に転倒したケースである．そのため，弾性範囲では振動台実験結果と静的載荷実験結果および計算値は一致しているが，それ以後の時刻では類似性は見られなかった．

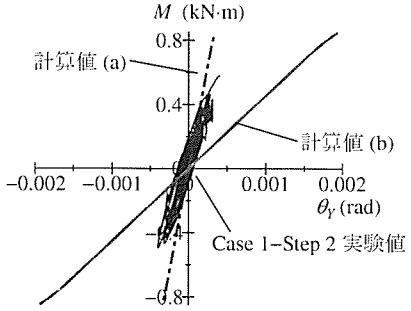
図–3.169～3.171 には，Case 2-Step 2 の神戸波 (振幅 80 %) 加振の M-θ_Y 関係を示す．他のケースと同様，図–3.170 の弾性範囲における剛性は，振動台実験結果と計算値がほぼ一致した．しかし，図–3.171 に示すように，最大変位が発生した時刻付近で計測されたモーメントの上限値は，計測値および静的水平載荷実験結果のものよりも小さな値となった．これは，「3.10 地盤の支持力」で検討したように，基礎底面に作用するモーメント M および水平力 H に加えて鉛直力 V も変動するため，その組合せでの支持力も変動するものと考えられる．



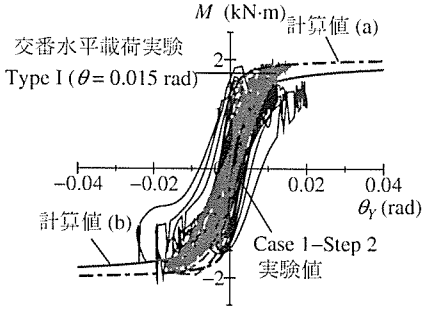
図–3.157 交番載荷実験と振動台実験の地盤沈下量に関する概念図



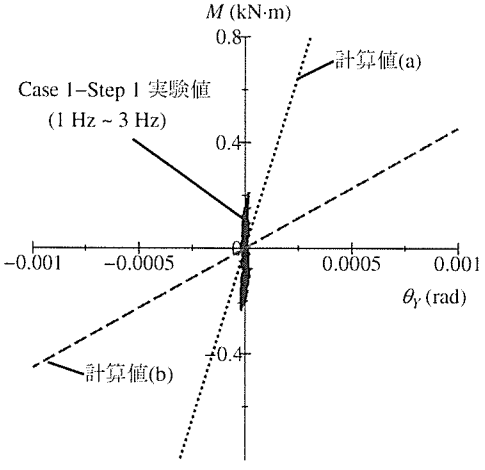
図–3.158 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較



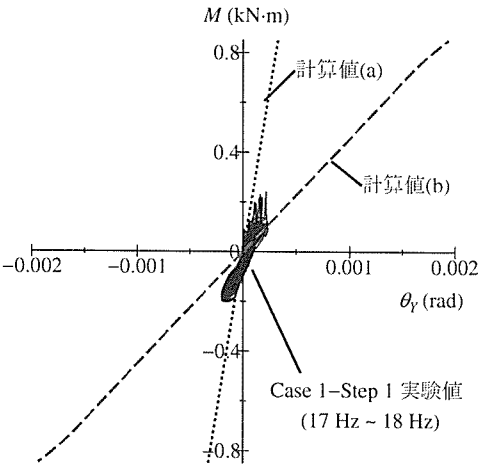
図–3.159 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲)



図–3.160 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近)

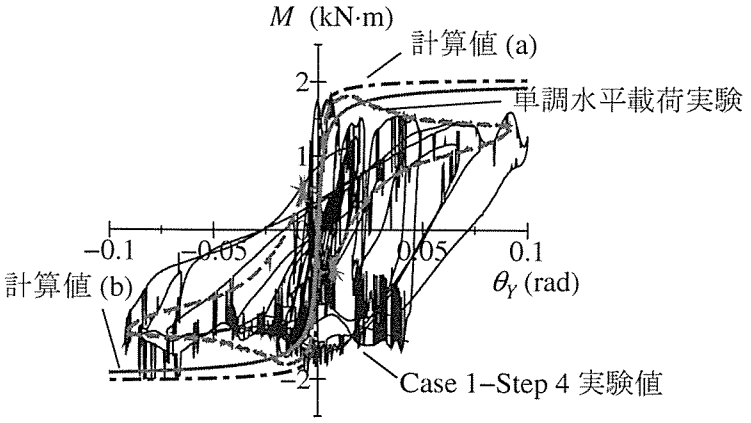


(a) 1~3 Hz

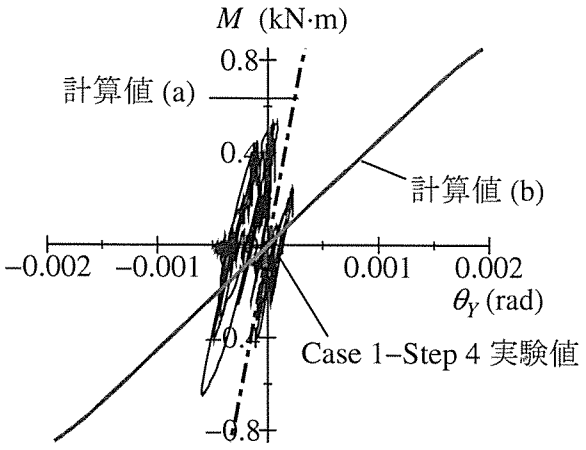


(b) 17~18 Hz

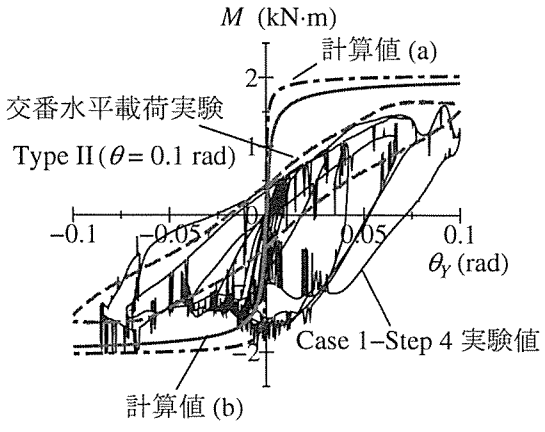
図–3.161 Case 1-Step 1, Sweep 波, M-θ_Y 関係の比較



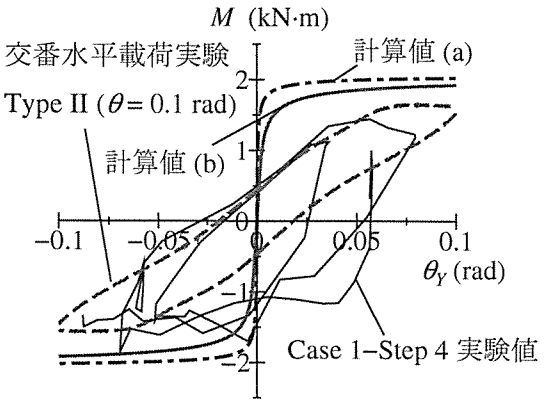
図–3.162 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較



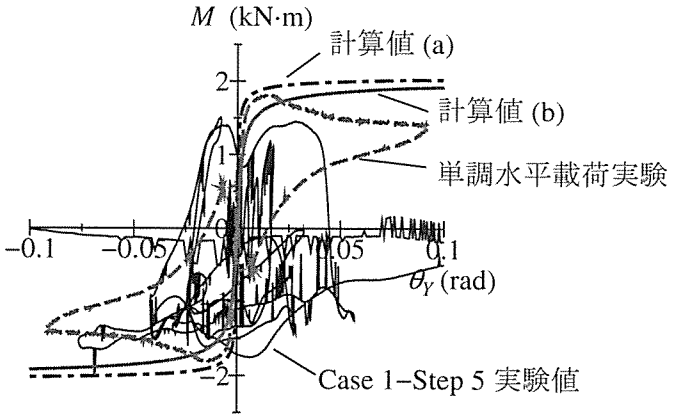
図–3.163 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲)



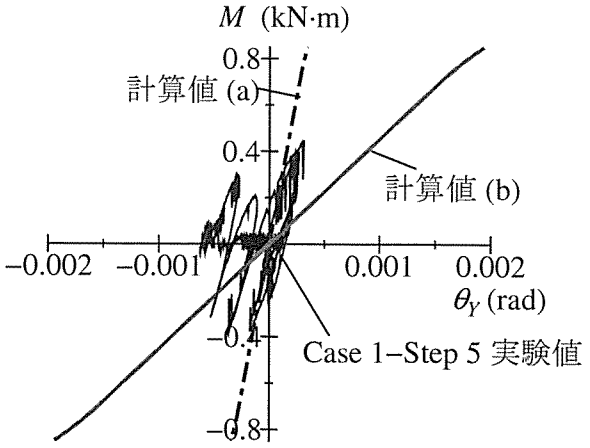
図–3.164 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近)



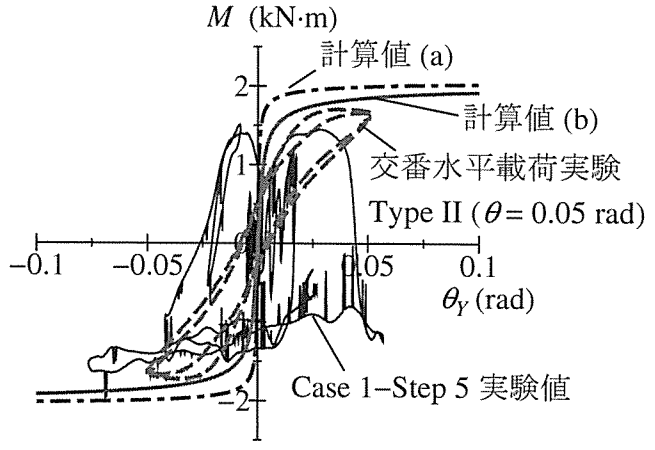
図–3.165 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y(画像解析による変位) 関係の比較 (最大変位発生時付近)



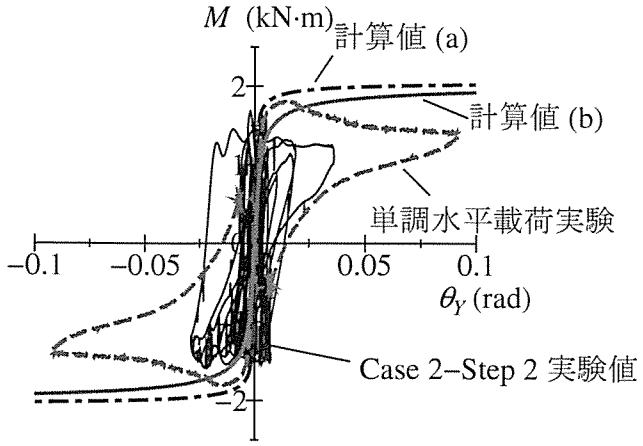
図–3.166 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較



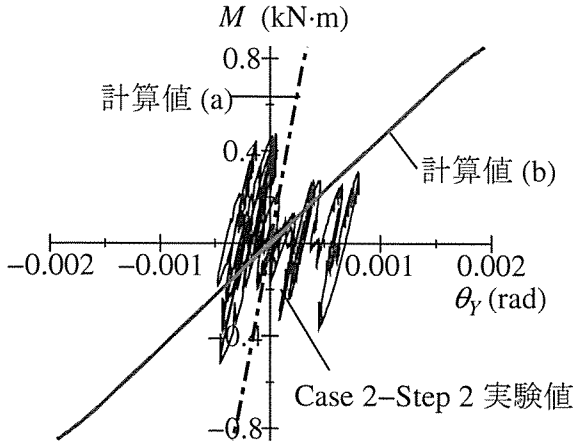
図–3.167 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲)



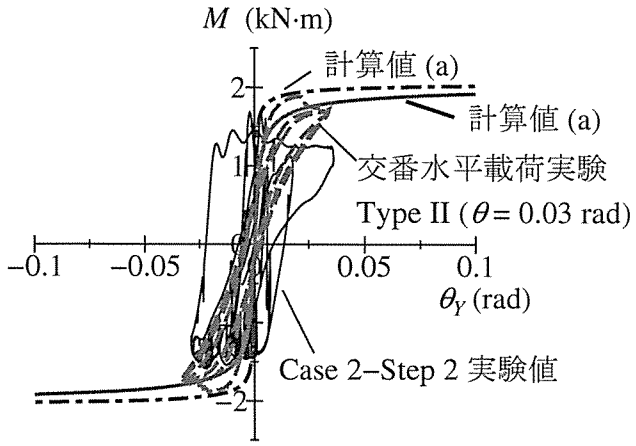
図–3.168 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近)



図–3.169 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較



図–3.170 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較 (弾性範囲)



図–3.171 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係の比較 (最大変位発生時付近)

3.13.3 基礎変位および地盤反力度分布のスナップショット

図–3.172～3.179 に各加振波において，最大回転角が生じた時の 1 ループの M-θ_Y 関係図および M-θ_Y 関係図に示す点 a~x の瞬間における模型鉛直軸位置，基礎底面位置および地盤反力度分布のスナップショットを示す．ここで，θ_Y は加速度積分変位より算出した値である．なお，各加振波により模型に生じた変位レベルが異なるため，それぞれの変位レベルに応じて図のスケールを変えている．

スナップショットに示す模型鉛直軸位置および基礎底面位置は以下のように求めた．図–3.180 に概念図を示す．スナップショットで用いる変位は加速度を 2 階積分して求めた変位であり，模型天端位置 Top，模型柱位置 Pier，基礎位置 Footing の変位は，それぞれ図に示す計測器 (XF+075M など) で計測された加速度から計算されたものである．また，X 方向の変位については，地表面に対する相対変位で示した．地表面に対する相対変位は，地表面に設置した X 方向加速度計 (XG-00W, XG-00E) の 2 つの加速度記録についてそれぞれ 2 階積分して求めた変位の平均値を各位置の X 方向変位から差し引くことにより算出した．ただし，Case 1-Step 5 については XG-00E の記録のみ用いている．

模型鉛直軸位置は，模型天端位置 Top (x_t, z_t)，模型柱位置 Pier (x_p, z_p)，基礎底面中心位置の b(x_b, z_b) を結んだものである．b(x_b, z_b) は，Footing (x_f, z_f) の値を用いて式 (3.21) より算出したものである．

基礎底面位置は c(x_c, z_c) と d(x_d, z_d) を結んだものである．c(x_c, z_c) および d(x_d, z_d) は，それぞれ式 (3.22)，式 (3.23) で算出したものである．

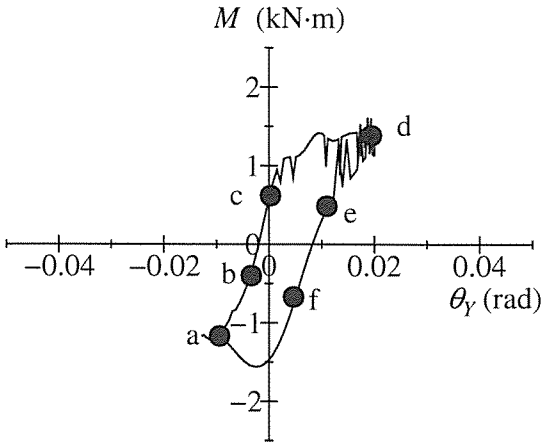
$$x_b = x_f - 250 \times \sin\theta_Y, \quad z_b = z_f + 250 \times \cos\theta_Y \tag{3.21}$$

$$x_c = x_b + 250 \times \cos\theta_Y, \quad z_c = z_b + 250 \times \sin\theta_Y \tag{3.22}$$

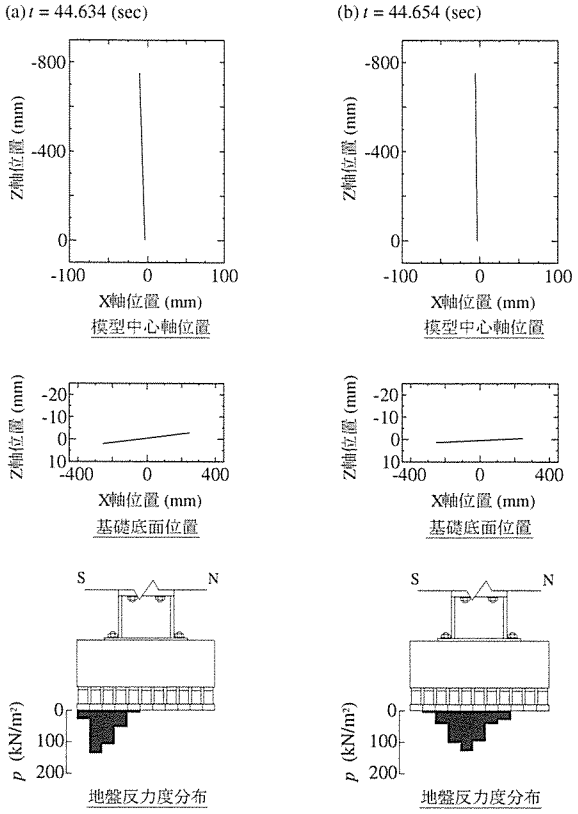
$$x_d = x_b - 250 \times \cos\theta_Y, \quad z_d = z_b - 250 \times \sin\theta_Y \tag{3.23}$$

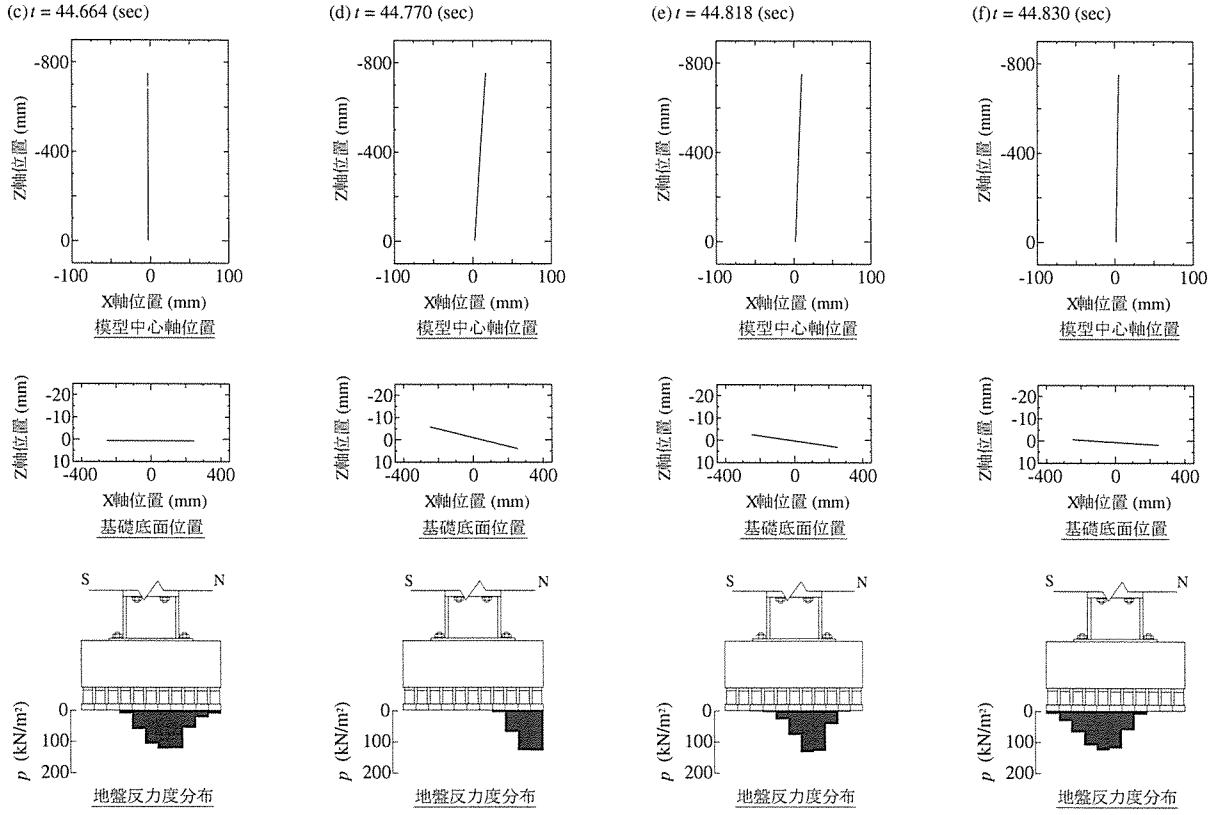
ここに単位はすべて mm である．

地盤反力度 p は，各 2 方向ロードセルで計測された鉛直力を 2 方向ロードセル底面積で除した値である．



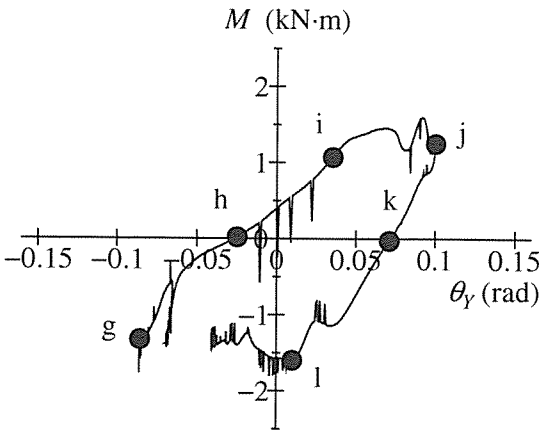
図–3.172 Case 1-Step 2, 七峰橋波, M-θ_Y 関係





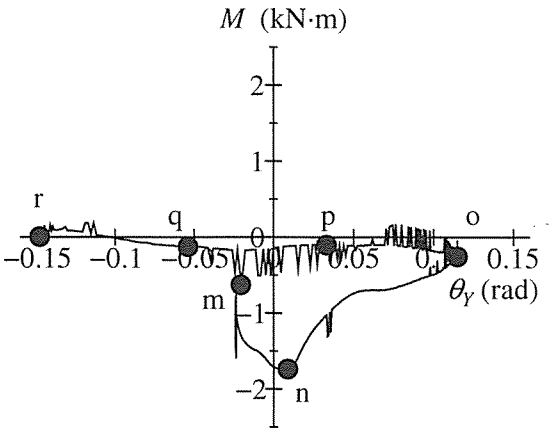
図–3.173 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 模型変位および地盤反力度スナップショット

(S = 南側, N = 北側)

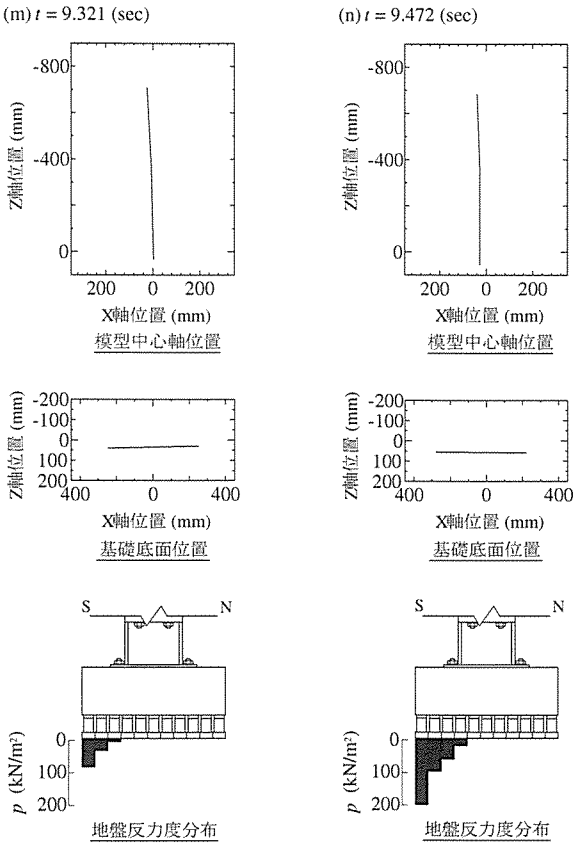


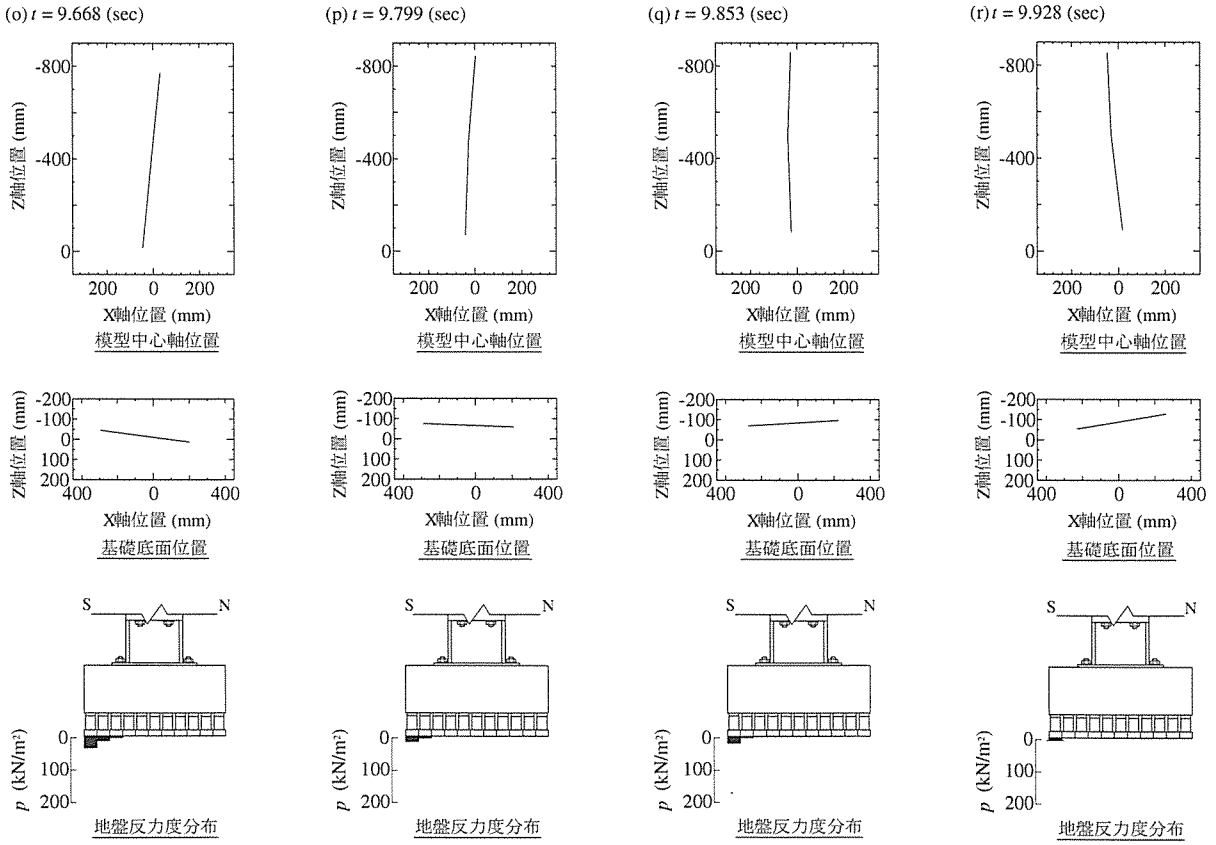
図–3.174 Case 1-Step 4, 神戸波, M-θ_Y 関係

図–3.175 Case 1-Step 4, 神戸波, 模型変位および地盤反力度スナップショット
(S = 南側, N = 北側)



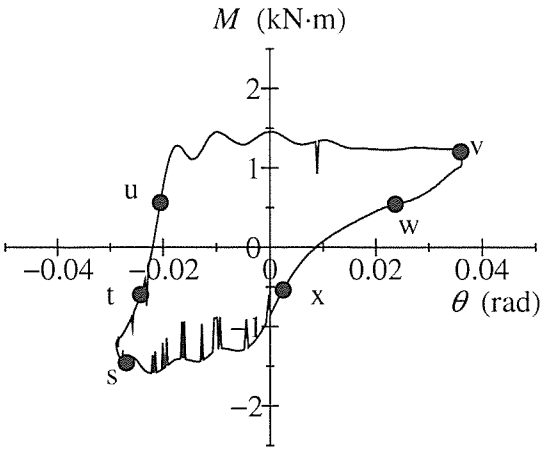
図–3.176 Case 1-Step 5, 神戸波, M-θ_Y 関係





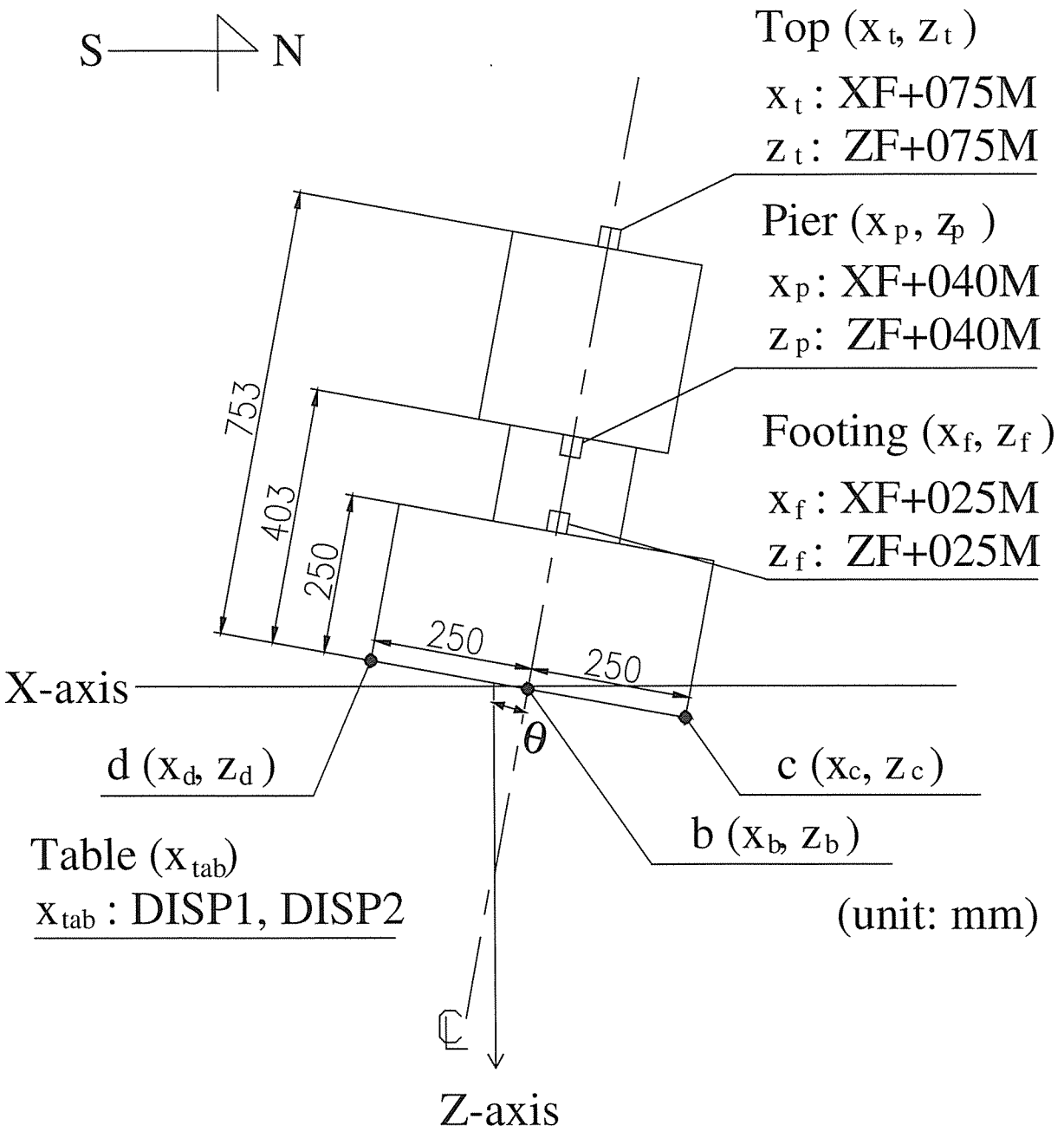
図–3.177 Case 1-Step 5, 神戸波, 模型変位および地盤反力度スナップショット

(S = 南側, N = 北側)



図–3.178 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), M-θ_Y 関係

図–3.179 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 模型変位および地盤反力度スナップショット
(S = 南側, N = 北側)



図–3.180 スナップショット変位算出概念図

3.14 模型に生じる最大変位の推定法に関する考察

模型に生じる最大変位と地震力の規模との関係を検討する．ここで，Case 1-Step 5 の神戸波による加振では模型が転倒したため，考察対象からはずす．模型天端中心位置の最大水平変位 δ_{max} は，画像解析処理により求めた模型天端中心位置水平変位の絶対値の最大値である．このとき，模型天端中心位置水平変位は地盤との相対変位としている．地震力の規模を示す指標として以下に説明する PGA，I_a，S_A，S_V を用いる．PGA は加振方向の地表面最大加速度 (gal) であり，地表面で計測した 2 点の加速度記録 (XG-00W と XG-00E) の各時間について平均値をとり，その平均値の最大値と最小値の絶対値のうち，大きい方とした．表–3.8 に各加振における PGA を示す．Arias intensity I_a (m/s^2) は式 (3.24) より算出する．

$$I_a = \frac{\pi}{2g}\int_0^D a^2(t)dt \tag{3.24}$$

ここで，π は円周率，g は重力加速度 (m/s^2)，D は全計測時間，a は時刻 t (sec) における地表面加速度 (m/s^2) である．地表面における加速度時刻歴は，2 点の加速度記録 (XG-00W と XG-00E) を各時刻に関して平均化したものである．S_A, S_V は，「3.6.4 地表面計測記録による応答スペクトル」において地表面加速度時刻歴について求めた加速度応答スペクトル，速度応答スペクトルから，模型の固有振動数に対応する模型の弾性応答加速度，弾性応答速度を求めた値である．ここでは減衰率 h が 2, 5, 20 %のときのスペクトルを用いて検討する．なお，図–3.161(a) に示すように，神戸波の M-θ_Y 関係における弾性勾配は計算値 (a) に近いので，神戸波に対する弾性応答を評価する場合には，計算値 (a) を用いるほうが望ましいと考えられる．そこで，回転ばね係数より求められる固有振動数 (=41.9 Hz) を模型の固有振動数とし，対応する S_A, S_V を求めた．表–3.9 に各加振ケースの I_a, S_A, S_V の値を示す．

図–3.181～3.184 に模型天端中心位置の最大水平変位 δ_{max} と PGA, I_a, S_A, S_V それぞれとの関係を示す．いずれの指標も，模型天端中心位置の最大水平変位との相関は無かった．したがって，模型天端中心位置の水平変位を予測するためには，地震動の強度だけでなく，基礎底面の地盤の塑性化の影響も考慮する必要があると考えられる．

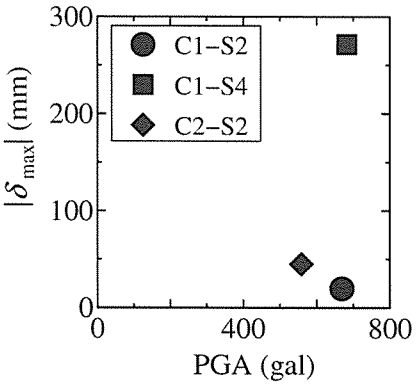
なお，以後の図の凡例に示す C i-S j は Case i-Step j を示す．

表–3.8 各加振における地表面最大加速度 (PGA)

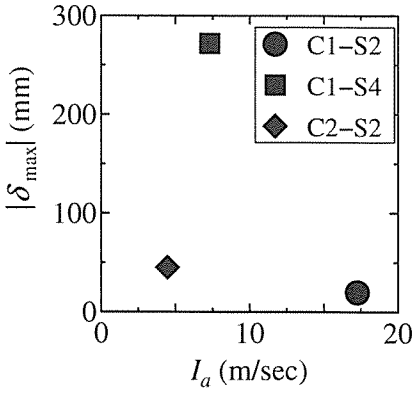
Case	Step	加振波	地表面加速度 (m/s^2) (XG-00W, XG-00E の平均値)		PGA (m/s^2)
Case 1	Step 2	七峰橋波	最大値	669.0	669.0
			最小値	–604.5	
	Step 4	神戸波	最大値	555.5	682.7
			最小値	–682.7	
Case 2	Step 2	神戸波 (振幅 80 %)	最大値	402.7	557.9
			最小値	–557.9	

表–3.9 各加振ケースの I_a, S_A, S_V

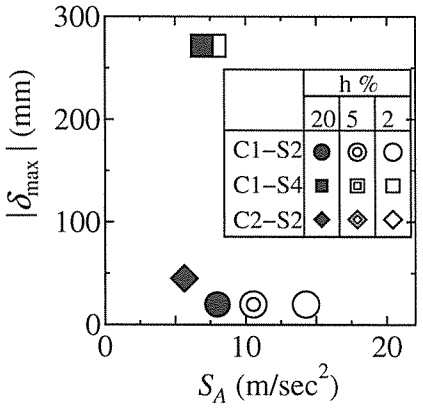
Case	Step	I_a (m/s^2)	S_A および S_V		
			h (%)	S_A (gal)	S_V (cm/s)
Case 1	Step 2	17.258	2	1426.860	3.994
			5	1053.122	2.591
			20	798.472	1.833
	Step 4	7.307	2	783.490	2.020
			5	692.475	1.624
			20	688.174	1.116
Case 2	Step 2	4.471	2	565.983	0.612
			5	562.479	0.440
			20	557.987	0.326



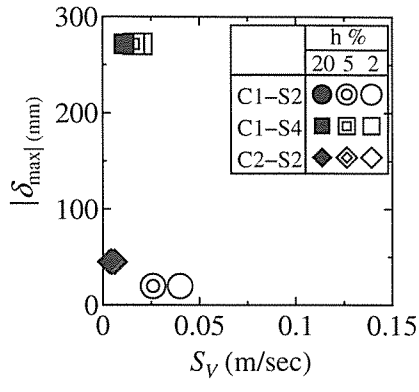
図–3.181 最大水平変位 δ_{max}-PGA 関係



図–3.182 最大水平変位 δ_{max}-I_a 関係



図–3.183 最大水平変位 δ_{max}-S_A 関係



図–3.184 最大水平変位 δ_{max}-S_V 関係

回転角についても検討する．基礎に作用するモーメントと基礎の回転角の関係にエネルギー一定則を適用することで基礎の非線形の回転応答を推定する方法が提案されている[1] (図–3.185 参照)．そこで，エネルギー一定則を用いて各加振における模型の応答回転角を推定し，実験結果と比較する．応答回転角の算出は以下の通りに行った．

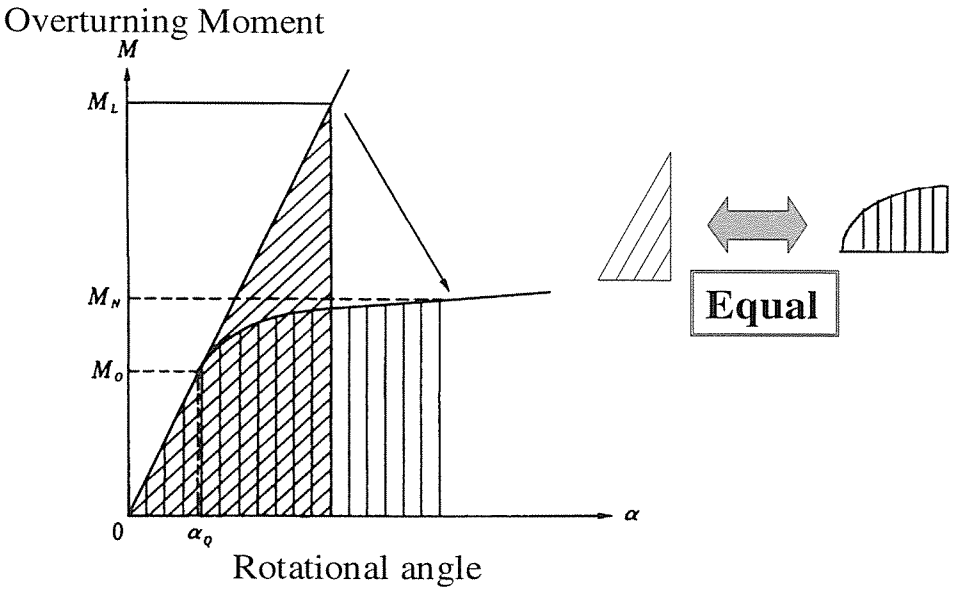
- 地表面加速度から求めた加速度応答スペクトル (減衰率 2%, 5%, 20%) にて模型の固有振動数 41.9 Hz (ロッキングモード) に対応する応答加速度を求める．
- 模型に作用する慣性力は，模型の自重 (V=8.385 kN) に応答加速度 (m/s^2) を重力加速度 (9.807 m/s^2) で除したものを乗じて算出する．
- 慣性力の作用位置を模型重心位置 (h_G=0.420 m) として，慣性力と h_G の積から基礎底面に作用するモーメント M_L を計算する．

基礎が非線形応答するときに基礎底面に生じるモーメント M_N は式 (3.25) により計算される[1]．

$$M_N = \left(3 - \frac{12}{4 + \sqrt{6\left(\frac{M_L}{M_0}\right)^2 - 2}} \right) M_0, \quad M_0 = \frac{VB}{6} \tag{3.25}$$

ここで，M_0 は式 (3.14) に示した基礎端部に浮上りが生じ始めるときの基礎底面モーメント，B は基礎幅である．応答回転角 α は，M_N を使用して式 (3.13) から逆算される．また，α_0 は式 (3.15) により求められる．α_0 の算出に用いる k_v は，固有振動数 41.9 Hz に対応する 499.255 MN/m^3 とした．

表–3.10 にエネルギー一定則により推定した応答回転角 α と加速度積分から算出した各ケースにおける最大回転角 θ_{Ymax} を示す．エネルギー一定則により推定した応答回転角 α と実験より得られた最大回転角 θ_{Ymax} を比較すると，推定した応答回転角 α の方が 1 桁以上小さな値となった．この理由は，以下のように考えられる．基礎が非線形応答するときのモーメントと応答回転角の関係式 (3.25) では地盤の塑性化による変形は考慮されていない．一方，実験にて生じる模型の回転角は押込み側基礎端部地盤の塑性化に起因する基礎の回転も含む．さらに，最大加速度が生じるまでの間も地盤の剛性が変化していると考えられる．例えば，「3.13.2 静的載荷実験および理論値との比較」の図–3.164 に示した Case 1-Step 4 のケースを例に見ると，最大回転角が生じた時の M-θ_Y ループの勾配は理論値よりも緩い勾配となっていることがわかる．また，載荷変位が大きい程，最大点指向型のループになることを静的実験により確認している[5]．以上の考察より，地盤の塑性化が伴う場合には式 (3.25) とエネルギー一定則を用いるだけでは応答回転角を推定することは困難である可能性があり，今後，基礎底面地盤の塑性化の影響なども考慮した応答評価手法を検討する必要がある．



図–3.185 エネルギー一定則概念図

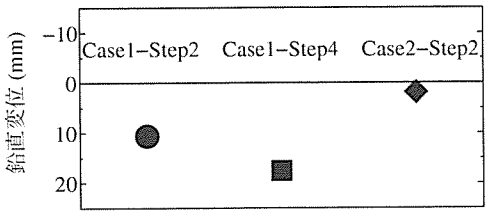
表–3.10 エネルギー一定則により推定した応答回転角と最大回転角との比較

実験ケース	地表面加速度応答スペクトル S_A		慣性力	M_L	M_N	α	$\theta_{Y\max}$
	減衰率 h (%)	応答加速度 (gal)	(kN)	(kN·m)	(kN·m)	(rad)	(rad)
Case 1-Step 2	2	1426.86	12.200	5.124	1.713	3.582×10^{-3}	24.400×10^{-3}
	5	1053.122	9.004	3.782	1.608	2.203×10^{-3}	
	20	798.472	6.827	2.837	1.495	1.453×10^{-3}	
Case 1-Step 4	2	783.49	6.699	2.814	1.487	1.413×10^{-3}	100.212×10^{-3}
	5	692.475	5.921	2.487	1.431	1.185×10^{-3}	
	20	688.174	5.884	2.471	1.428	1.175×10^{-3}	
Case 2-Step 2	2	565.983	4.839	2.032	1.333	0.900×10^{-3}	36.219×10^{-3}
	5	562.479	4.809	2.020	1.330	0.893×10^{-3}	
	20	557.987	4.771	2.004	1.326	0.884×10^{-3}	

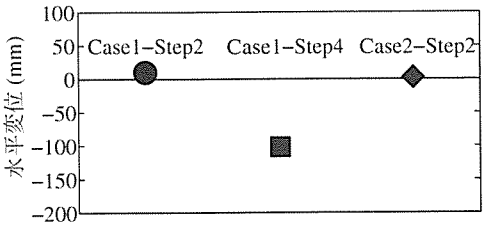
3.15 基礎に生じる残留変位性状とその推定法に関する考察

3.15.1 各加振における基礎の残留変位

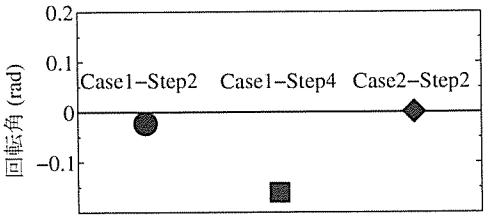
加振前の基礎位置を基準として，加振後に残留した基礎底面中心位置での鉛直変位 v_r，水平変位 u_r および回転角 θ_{Yr} を求めた．図に示した点は全て画像解析により求められた値である．ただし，Case 1-Step 5については加振途中で転倒したため残留変位に関する検討からはずした．図–3.186～図–3.188及び表–3.11 に残留変位をまとめたものを示す．



図–3.186 残留鉛直変位の比較



図–3.187 残留水平変位の比較



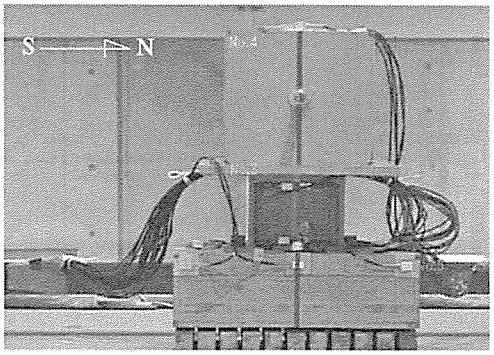
図–3.188 残留回転角の比較

表–3.11 残留変位 (画像解析処理および実測値)

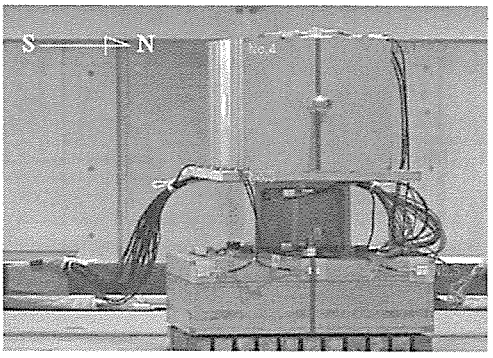
Case	Step	残留変位			
		変位計測方法	鉛直変位 v_r (mm)	水平変位 u_r (mm)	回転角 θ_{Yr} (rad)
Case 1	Step 2	画像解析	10.6	10.0	−0.023
	Step 4	画像解析	17.6	−101.6	−0.161
Case 2	Step 2	画像解析	1.9	2.4	0.001

(1) Case 1-Step 2 七峰橋波加振後の残留変位

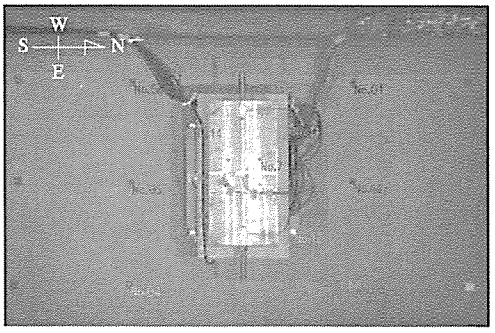
写真–3.1～3.4 に，Case 1-Step 2 の七峰橋波による加振実験前と実験後の模型の位置を定点位置からの撮影された画像を用いて示す．東から見た基礎底面位置 (X-Z 平面) を図–3.189 に示す．また，基礎 X-Y 平面位置を図–3.190 に示す．七峰橋波は，繰返し回数の多い Type I 地震動である．そのため，細かい浮上り挙動を繰返し，基礎の残留鉛直変位が生じるとともに Z 軸まわりに回転挙動が生じた．



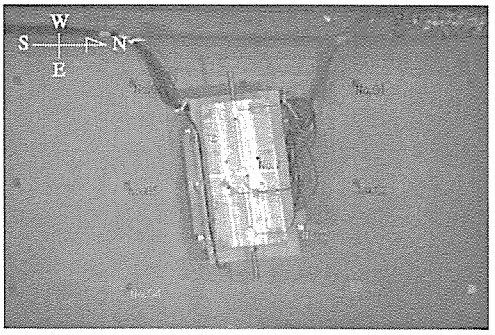
写真–3.1 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前 (X-Z 平面)



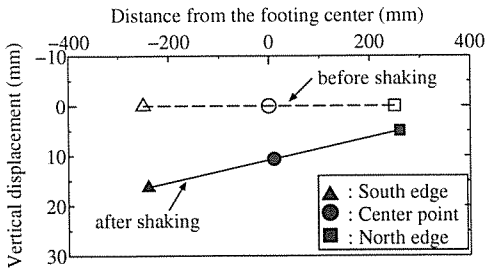
写真–3.2 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振後 (X-Z 平面)



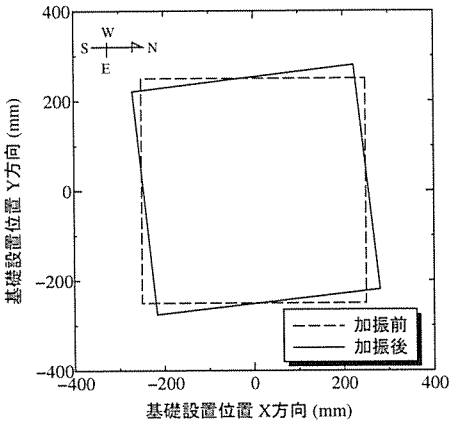
写真–3.3 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前 (X-Y 平面)



写真–3.4 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振後 (X-Y 平面)



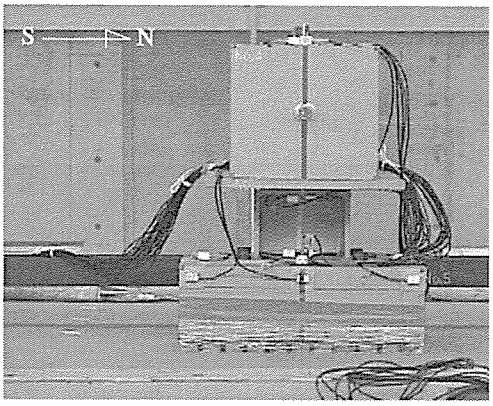
図–3.189 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前後基礎底面位置



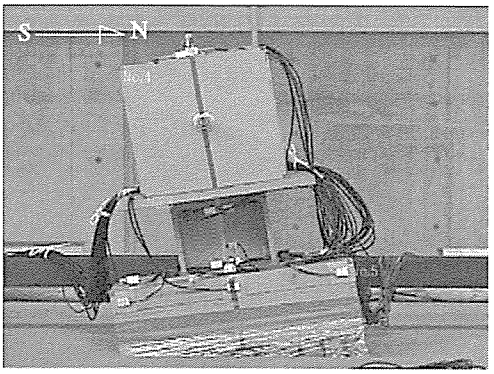
図–3.190 Case 1-Step 2, 七橋峰波, 加振前後基礎 X-Y 平面位置

(2) Case 1-Step 4 神戸波加振後の残留変位

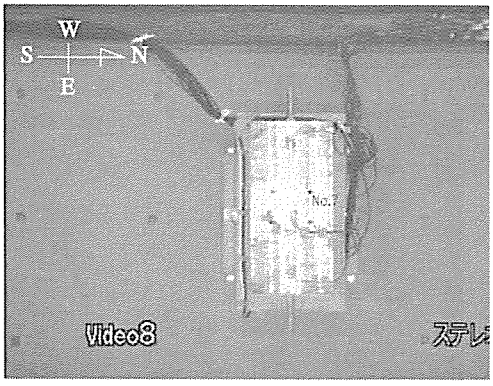
写真–3.5～3.8 に，Case 1-Step 4 の神戸波による加振実験前と実験後の模型位置を定点位置で撮影された画像を用いて示す．東から見た基礎底面位置 (X-Z 平面) を図–3.191 に示す．神戸波の原波による加振であり，実験ケースの中で最も大きな加速度を有する加振である．そのため，基礎の浮上り挙動も大きく，また，基礎南側端部下の地盤が塑性化し大きな鉛直変位が生じた．



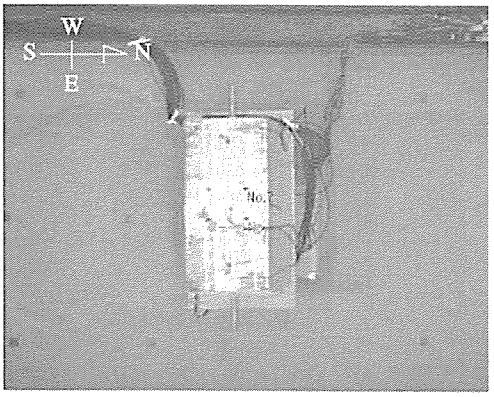
写真–3.5 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前 (X-Z 平面)



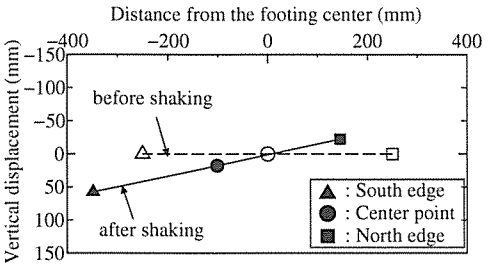
写真–3.6 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振後 (X-Z 平面)



写真–3.7 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前 (X-Y 平面)



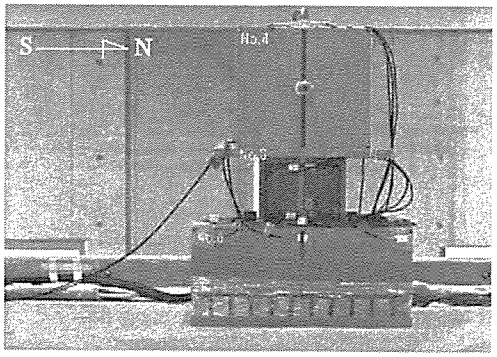
写真–3.8 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振後 (X-Y 平面)



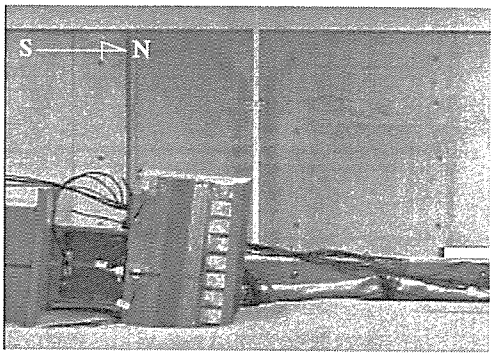
図–3.191 Case 1-Step 4, 神戸波, 加振前後基礎底面位置

(3) Case 1-Step 5 神戸波加振後の残留変位

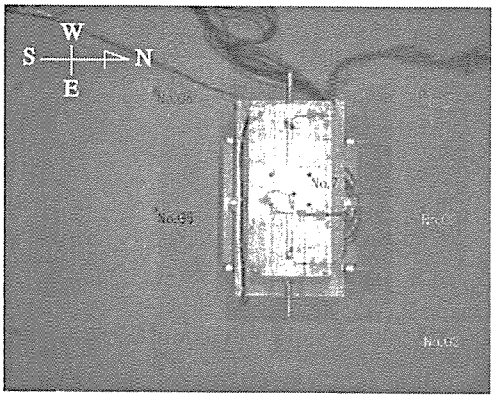
写真–3.9～3.12 に，Case 1-Step 5 の神戸波による加振実験前と実験後の模型位置を定点位置で撮影された画像を用いて示す．東から見た基礎底面位置 (X-Z 平面) を図–3.192 に示す．加振後の基礎底面位置は画像解析で追尾できた最後の座標を描いたものである．Step 4 と同じ神戸波による加振であるが，Step 5 では基礎を根入れしていない．模型天端の応答加速度を比較すると Step 4 の方が大きい (「 3.6.5 最大応答加速度分布 」参照) が，最大加速度が生じた時刻における，南側端部の沈下量は Step 4 のときよりも大きかった．その後，基礎は南側へ傾斜した状態でとどまろうとしたものの，その後の南方向への加振を受け結局転倒した．



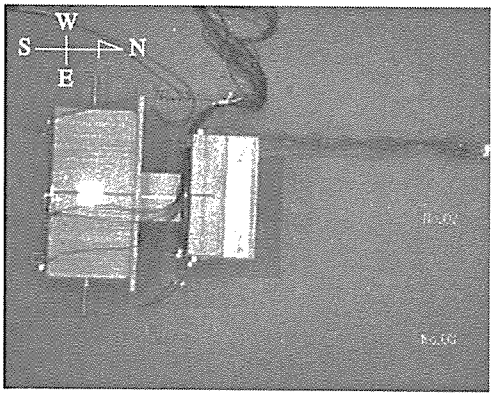
写真–3.9 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振前 (X-Z 平面)



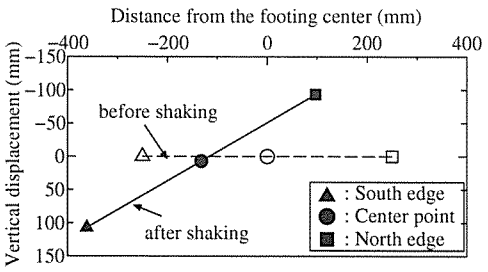
写真–3.10 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振後 (X-Z 平面)



写真–3.11 Case 1-Step 5 加振前 (X-Y 平面)



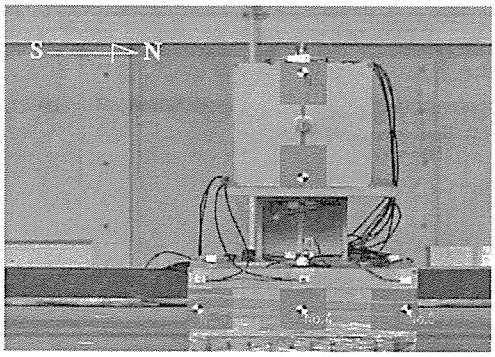
写真–3.12 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振後 (X-Y 平面)



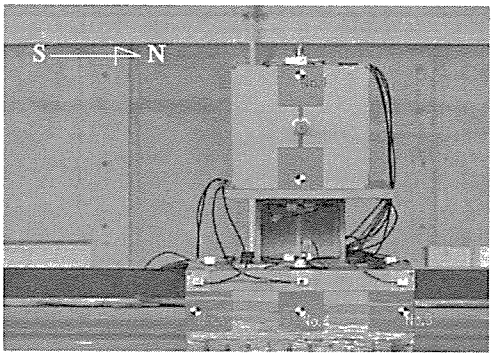
図–3.192 Case 1-Step 5, 神戸波, 加振前後基礎底面位置

(4) Case 2-Step 2 神戸波 (入力加速度振幅を 80 %にした場合) 加振後の残留変位

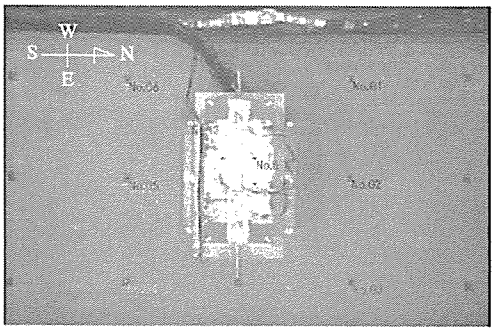
写真–3.13～3.16 に，Case 2-Step 2 の神戸波 (入力加速度振幅を 80 %にした場合) による加振実験前と実験後の模型位置を定点位置で撮影された画像を用いて示す．東から見た基礎底面位置 (X-Z 平面) を図–3.193 に示す．また，基礎 X-Y 平面位置を図–3.194 に示す．Type I 地震動である七峰橋波を入力した場合に比べて，基礎の残留鉛直変位は小さかったが，最大変位は大きかった．また，Z 軸まわりの回転挙動はほとんど生じなかった．



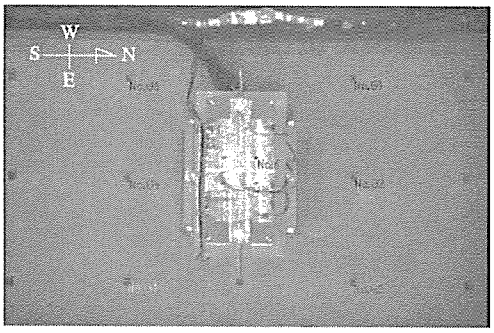
写真–3.13 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前 (X-Z 平面)



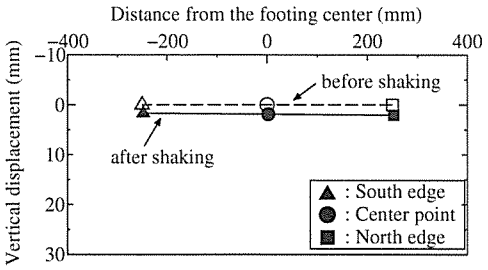
写真–3.14 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振後 (X-Z 平面)



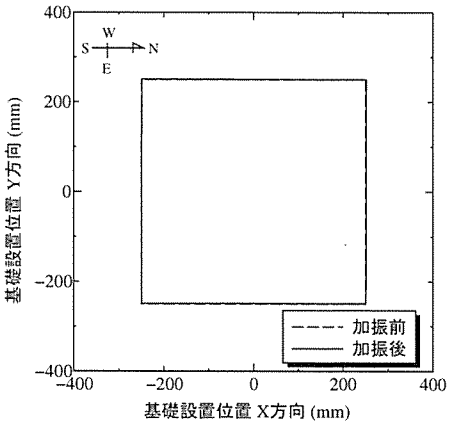
写真–3.15 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前 (X-Y 平面)



写真–3.16 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振後 (X-Y 平面)



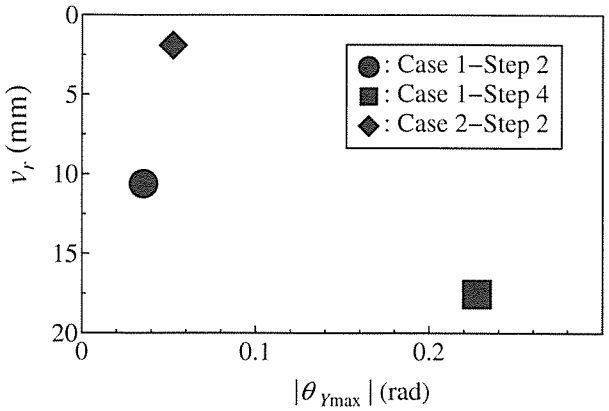
図–3.193 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前後基礎底面位置



図–3.194 Case 2-Step 2, 神戸波 (振幅 80 %), 加振前後基礎 X-Y 平面位置

(5) 最大回転角 θ_{max}-残留鉛直変位関係 v_r

図–3.195 に各加振における最大回転角 θ_{max} と残留鉛直変位 v_r の関係を示す．ここに最大回転角 θ_{max} は，絶対値の最も大きい値とした．最大回転角 θ_{max} と残留鉛直変位関係 v_r の間には明確な相関関係が見られなかった．



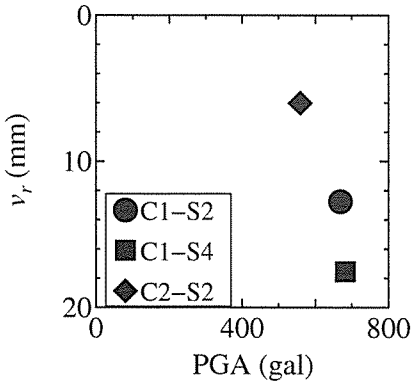
図–3.195 最大回転角-残留鉛直変位関係

3.15.2　地震力の規模と残留変位の関係

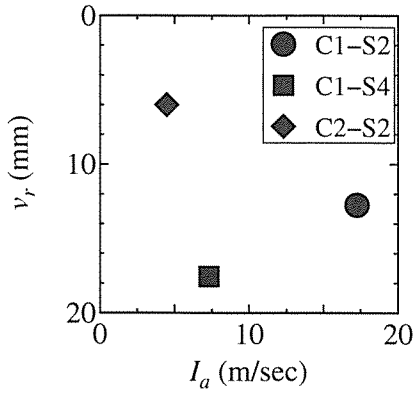
「3.14 模型に生じる最大変位の推定法に関する考察」と同様に地震力の規模を示す指標のパラメターと残留変位の関係を調べる．なお，ここで示す残留変位は画像解析によって得られたものである．

(1)　地震力の規模を示す指標と残留鉛直変位 v_r の関係

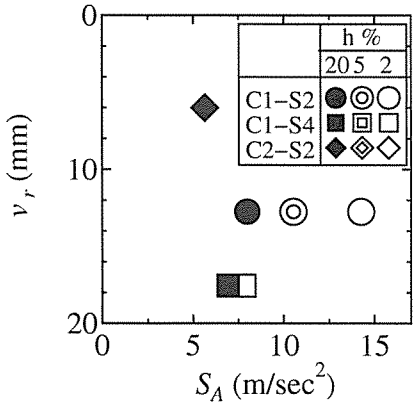
図–3.196～3.199 に各加振における地震力を示す指標と残留鉛直変位 v_r との関係を示す．PGA が大きい程，残留鉛直変位 v_r が大きくなる傾向が見られた．一方，I_a, S_A, S_V については，明確な相関関係は見られなかった．



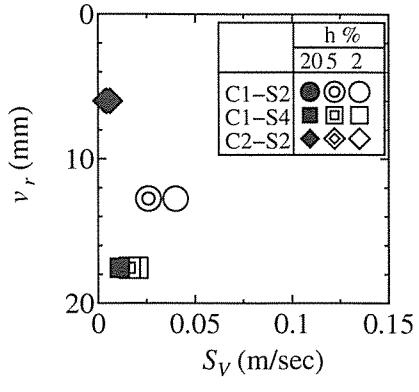
図–3.196 v_r-PGA 関係



図–3.197 v_r-I_a 関係



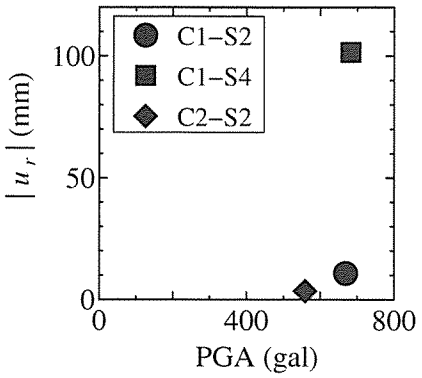
図–3.198 v_r-S_A 関係



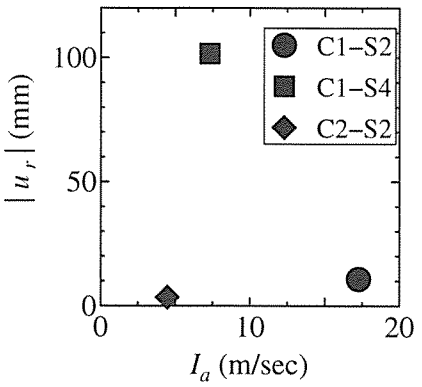
図–3.199 v_r-S_V 関係

(2) 地震力の規模を示す指標と残留水平変位 u_r の関係

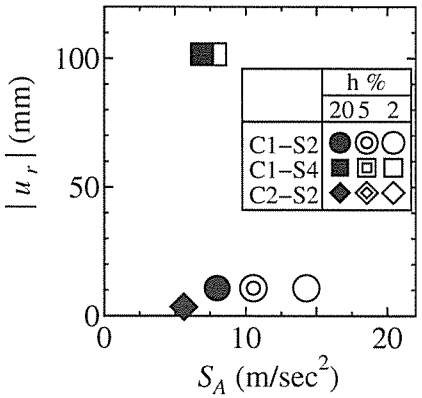
図–3.200～3.203 に各加振における地震力を示す指標と残留水平変位 u_r との関係を示す．PGA が大きい程，残留水平変位 u_r が大きくなる傾向が見られた．一方，I_a, S_A, S_V については，明確な相関関係は見られなかった．



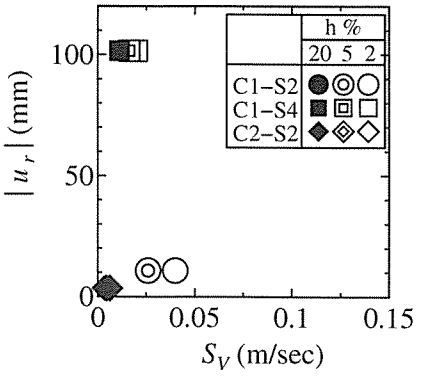
図–3.200 u_r-PGA 関係



図–3.201 u_r-I_a 関係



図–3.202 u_r-S_A 関係

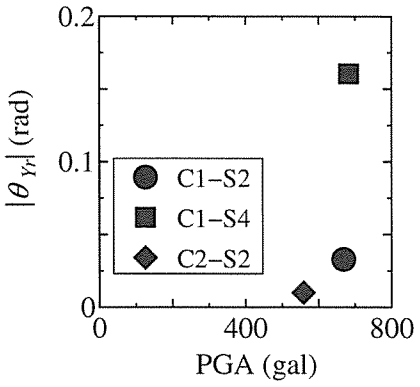


図–3.203 u_r-S_V 関係

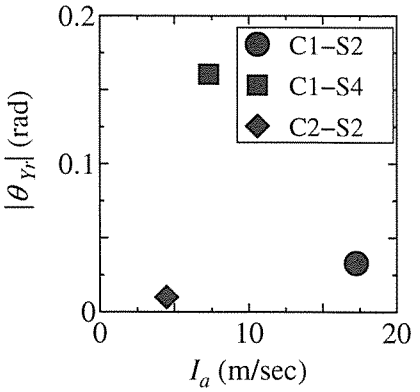
(3) 地震力の規模を示す指標と残留回転角 θ_{Yr} の関係

図–3.204～3.207 に各加振における地震力を示す指標と残留回転角 θ_{Yr} との関係を示す．他の残留変位と同様に PGA が大きい程，残留回転角 θ_{Yr} が大きくなる傾向が見られた．

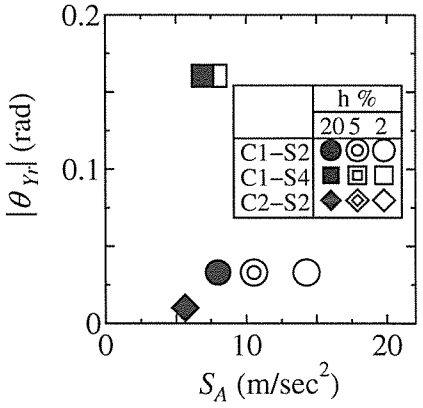
以上 (1)～(3) において，PGA については，v_r，u_r，θ_{Yr} の全ての残留変位と相関関係が見られた．しかし，静的繰返し載荷実験[5]にて，残留変位量は，基礎底面に作用する荷重の大きさだけでなく，繰返し回数によっても異なることを確認している．一方，I_a, S_A, S_V については，いずれの残留変位とも相関関係は見られなかった．



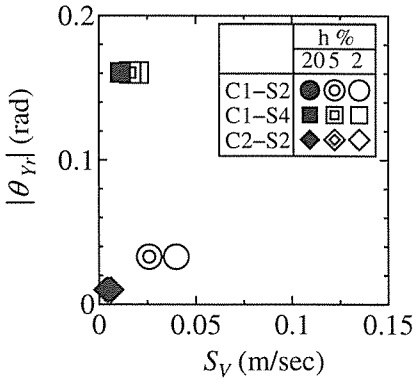
図–3.204 θ_{Yr}-PGA 関係



図–3.205 θ_{Yr}-I_a 関係



図–3.206 θ_{Yr}-S_A 関係



図–3.207 θ_{Yr}-S_V 関係

3.15.3 地震動による基礎の仕事量と残留変位量の関係

地震動に起因する基礎の全仕事量 E_d (kN·m) と残留変位の関係を調べる．

$$E_d = \int_0^D M(t)d\theta_Y(t) + \int_0^D H(t)du(t) + \int_0^D V(t)dv(t) \tag{3.26}$$

ここで，$M(t)$, $H(t)$, $V(t)$ は時刻 t に基礎底面に作用するモーメント (kN·m)，水平力 (kN)，鉛直力 (kN) であり $d\theta_Y(t)$, $du(t)$, $dv(t)$ は基礎底面中心位置における回転角 (rad)，水平変位 (mm)，鉛直変位 (mm) の増分である．本研究では式 (3.27) で算出した．式 (3.27) の $(t-1)$ の変位は時刻 t の直前の時刻における変位であることを示す．

$$\begin{aligned} d\theta_Y &= \theta_Y(t) - \theta_Y(t-1) \\ du &= u(t) - u(t-1) \\ dv &= v(t) - v(t-1) \end{aligned} \tag{3.27}$$

ここで，地盤が塑性化する過程を整理すると以下の通りとなる．

- 地盤の極限支持力は，基礎底面に作用する V-H-M の組合せにより決まる支持力曲面で近似できる．
- 作用荷重が支持力曲面上の組み合わせ荷重に達した後は，荷重一定のもとに地盤の塑性化 (基礎の変位) が進む．

E_d は荷重とそのときの増分変位を掛け合わせた仕事であり，かつ地震動の繰返し回数の違いも考慮できる．したがって，残留変位と相関を有すると考えられる．

ただし，著者らは静的載荷実験[5]において，水平変位および回転角は，荷重の載荷方向に累積されることを確認している．E_d の計算で，$H(t)du$ と $M(t)d\theta_Y$ については，正負両方向の載荷がプラスで累積される (例えば，マイナスの水平力によりマイナスの水平変位増分があった場合も $H(t)du$ はプラスとなる) ため，一方向に累積される水平変位や回転角との相関は低いと予測される．そこで，水平運動，回転運動について特化して考察を行う場合は，仕事量を E_{du}，$E_{d\theta_Y}$ としてそれぞれ式 (3.28)，式 (3.29) により再定義する．両式は，水平変位および回転角増分の符号が計算結果に反映されるために，一方向に累積される水平変位や回転角を予想すると考えられる．

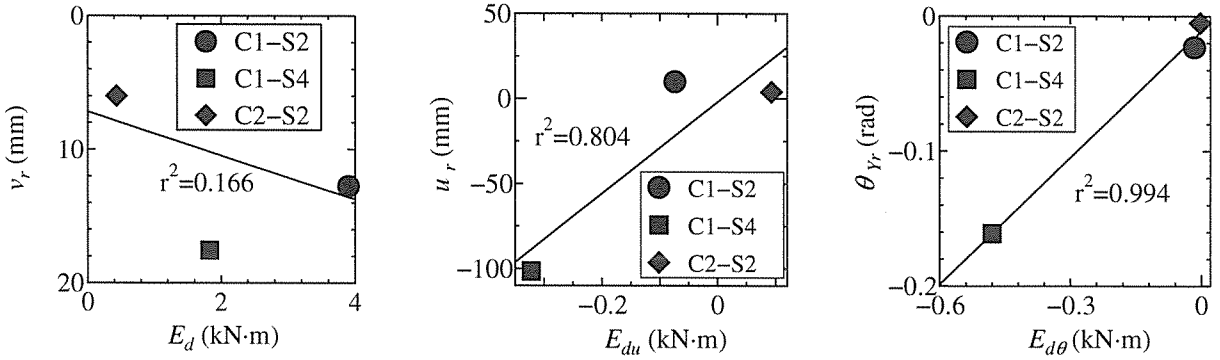
$$E_{du} = \int_0^D |H(t)|du(t) \tag{3.28}$$

$$E_{d\theta_Y} = \int_0^D |M(t)|d\theta_Y(t) \tag{3.29}$$

図–3.208 に E_d-v_r 関係，E_{du}-u_r 関係，$E_{d\theta_Y}$-θ_{Yr} 関係を示す．図中の直線はデータを最小二乗近似したものである．ここに示す E_d，E_{du}，$E_{d\theta_Y}$ は画像解析変位を用いて計算したものであり，計算結果は表–3.12 に示す通りである．E_d と残留鉛直変位 v_r の関係において，E_d が大きいほど残留鉛直変位 v_r が大きくなる傾向が見られる．また，E_{du} と残留水平変位 u_r および $E_{d\theta_Y}$ と残留回転角 θ_{Yr} の関係についても，それぞれ E_{du}，$E_{d\theta_Y}$ が大きいほど，その符号と同じ方向に残留水平変位 u_r および残留回転角 θ_r は大きくなる傾向が見られた．すなわち，支持力曲面，基礎底面に繰返し作用する外力の大きさや方向，地震動の繰返し回数を同時に適切に考慮することにより塑性変形量が予測できると考えられる．よって，図–3.208 の結果は，残留変位量を推定するためには動的解析を行うことが有効であり，荷重の組み合わせにともなう地盤の塑性化の判定を考慮し，かつ地震動の繰返し回数を考慮できる手法を開発する必要性を示している．

表–3.12 E_d，E_{du}，$E_{d\theta_Y}$ 計算結果

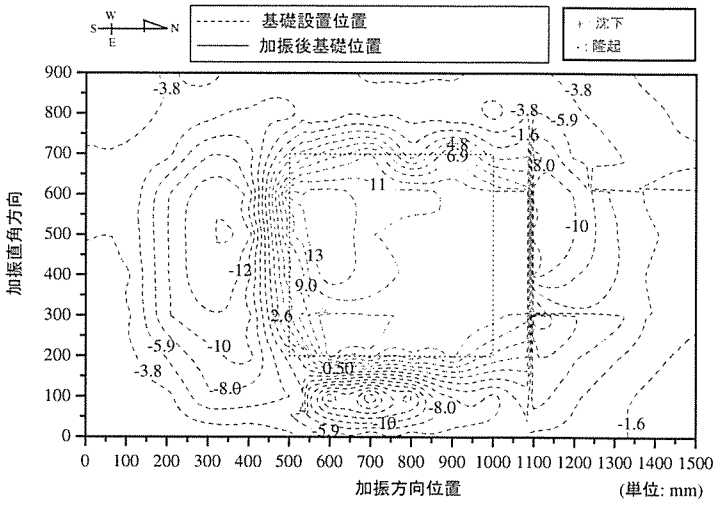
Case	Step	E_d (kN·m)	E_{du} (kN·m)	$E_{d\theta_Y}$ (kN·m)
Case 1	Step 2	3.901	−0.074	−0.016
Case 1	Step 4	1.828	−0.322	−0.480
Case 2	Step 2	0.433	0.093	−0.003



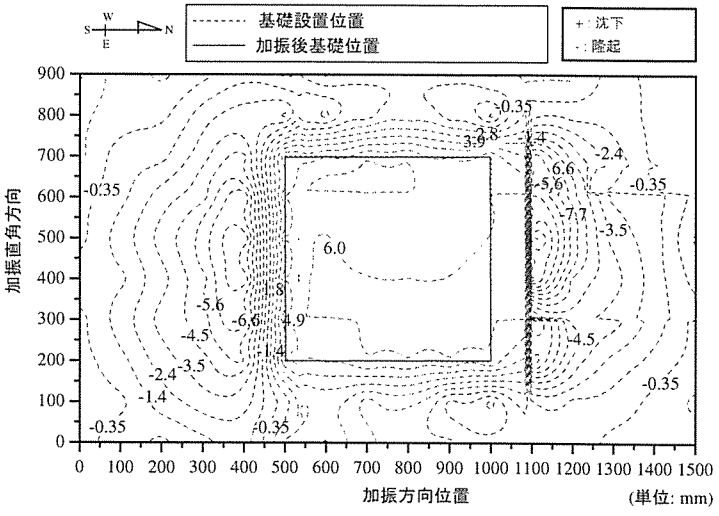
図–3.208 残留変位量-E_d 関係 (画像解析処理分変位使用)

3.16 加振後の基礎周辺地盤高さ計測結果

図–3.209，3.210 に，それぞれ Case 1-Step 3 および Case 2-Step 3 の加振が終了した時の基礎底面および周辺地盤の地盤高さのコンタ図を示す．残留変位量の大きい Case 1 の方が周辺地盤の隆起が大きく，広範囲に及んでいることがわかる．



図–3.209 Case 1, 加振後地盤コンタ図



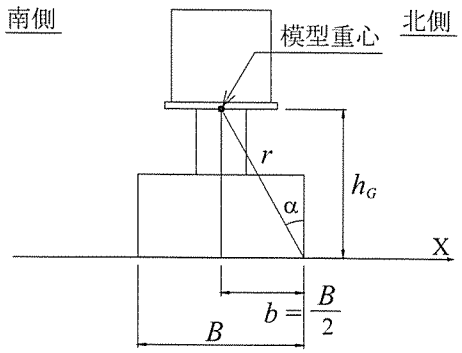
図–3.210 Case 2, 加振後地盤コンタ図

3.17 転倒限界速度の検討

基礎の転倒は，基礎の終局限界状態の一つである[17]．剛体の転倒条件について，式 (3.30) が提案されている[18]．ここで，v_0 は重心位置における転倒限界速度 (m/s)，g は重力加速度 (9.8 m/s^2)，i は回転 2 次半径 ($=\sqrt{J_G/m}$)，J_G は重心点まわりの慣性モーメント (kg·m^2)，m は質量 (kg)，μ は補正係数で 0.4 が提案されている[18]．図–3.212～3.215 に模型重心位置の X 方向速度の時刻歴と限界転倒速度を示す．模型重心位置の X 方向速度は，加速度計 XF+040M (基礎底面から高さ 0.409 m 位置) の加速度を 1 階積分して算出されたものである．ここで，速度の符号は加速度および変位と同様に，北側方向への速度を正とする．

Case 1-Step 5 は加振中に転倒したケースである．図–3.214 を見ると約 10 秒付近で負の速度 (南側方向の速度) が転倒限界速度を超えていることがわかる．模型はこの時，南側に転倒した．Case 1-Step 4 でも正の速度 (北側方向の速度) で転倒限界速度を超えている．しかし，このとき模型は南側に傾斜をしていた (図–3.69 参照)．そのため，模型は転倒しなかったと考えられる．その他のケースではほぼ転倒限界速度内での挙動であった．

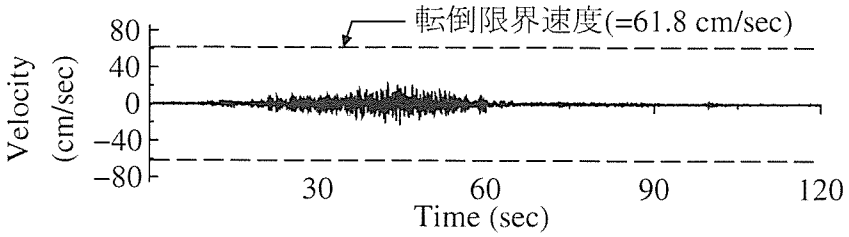
$$v_0(t) = \mu\sqrt{\frac{2g(i^2+r^2)}{r}\cdot\frac{1-\cos\alpha}{\cos^2\alpha}} \tag{3.30}$$



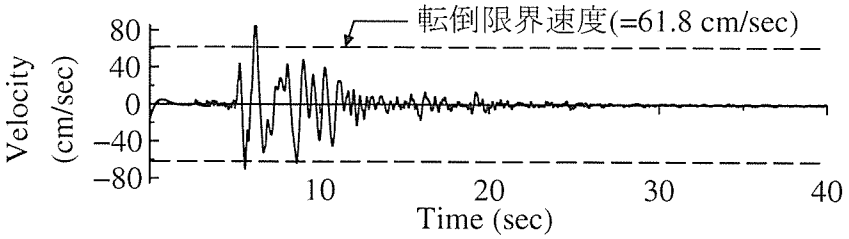
図–3.211 転倒限界速度算出概念図

表–3.13 限界転倒速度に用いた算出諸元

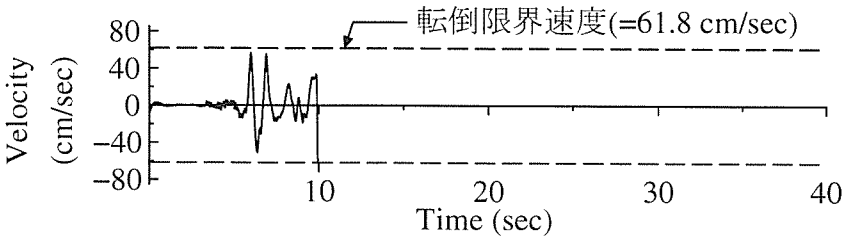
v_0		m	J_G	i	h_G	r	α	μ
(cm/s)	(m/s)	(kg)	(kg·m^2)	(m)	(m)	(m)	(rad)	
61.8	0.618	855	57.447	0.260	0.420	0.490	0.860	0.4



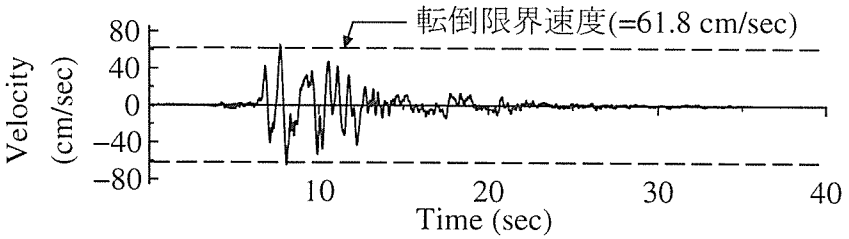
図–3.212 Case 1-Step 2, 七峰橋波, 模型重心位置速度



図–3.213 Case 1-Step 4, 神戸波, 模型重心位置速度



図–3.214 Case 1-Step 5, 神戸波, 模型重心位置速度



図–3.215 Case 2-Step 2, 神戸波 (80 %), 模型重心位置速度

4. まとめ

本研究では，動的な地震力に対する直接基礎の挙動および残留変位を把握する目的で，直接基礎模型を用いた振動台実験を行った．その結果，以下のことが明らかになった．

- 水平方向のみの地震力に対しても，基礎の浮上り挙動が繰返されることにより，鉛直方向にも加速度が生じる．その結果，地盤に作用する鉛直力の増減が生じる．
- *V-H-M* の組合せ荷重による地盤の極限支持力は，支持力曲面でモデル化できる可能性があることを実験的に確認した．
- 地盤の塑性化は降伏支持力に達した後に急増する．すなわち，降伏支持力に達している時間が長い程，地盤の塑性化が進む．
- モーメント・回転角関係の履歴曲線はS字の曲線となり，静的な繰返し載荷試験の結果ともよく一致した．
- 基礎の浮上り挙動により，基礎中央よりも基礎端部地盤で大きく沈下が生じる．そして，基礎下の地盤沈下の形状が基礎の復元力特性を変化させ，正負交番載荷では見られないような非対称な履歴ループ形状を示す場合もある．
- 基礎底面地盤が塑性化する場合の基礎の最大応答回転角の予測には，エネルギー一定則の適用性は低い可能性がある．
- 残留鉛直変位量は，地震動により基礎が行う全仕事量 E_d と相関を持つ傾向が見られた．これは，モーメント・回転角関係のみを考慮した数値解析では基礎に最終的に生じる残留変位量を予測できないことを示している．
- 繰返しモーメントや水平力が載荷されることによる生じる残留変位量を予測するためには，非線形数値解析等の手法の検討を進める必要がある．
- また，転倒の照査に必要な応答速度を予測するためにも，非線形数値解析等の手法の検討を進める必要がある．
- 本資料に示した実験の様々な分析結果は，直接基礎の地震時挙動に関する非線形動的解析モデルの開発においてベンチマークとなるものである．
- 今後は，地盤の加速度が地盤の極限支持力に与える影響や，根入れが基礎の支持力や残留変位に及ぼす効果についても検討を進めるのがよいと考えられる．

参考文献

1) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 丸善, 2002.
2) (財) 日本規格協会: JIS R 6001 研摩材の粒度, JIS ハンドブック工具, pp. 503-504, 1973.
3) 谷和夫: 砂地盤上の浅い基礎の支持力機構, 東京大学大学院工学系研究科修士論文, pp. IV. 1-14, 1986.
4) 岡原美知夫, 高木章次, 木村嘉冨, 森浩樹, 浅井健一, 渡会正晃, 井上昭夫, 龍田昌毅: 剛体基礎の支持力に関する実験的研究, 土木研究所資料, 第 3087 号, pp. 12-15, 1992.
5) 福井次郎, 中谷昌一, 白戸真大, 河野哲也, 野々村佳哲, 浅井隆一, 齋藤隆: 直接基礎の地震時残留変位に関する繰返し載荷実験, 土木研究所資料, 第 4027 号, 2006.
6) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 丸善, 2002.
7) Paolucci, R.: Simplified evaluation of earthquake-induced permanent displacements of shallow foundations, *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 1, No. 3, pp. 563-579, 1997.
8) 岡村未対, 竹村次郎, 木村孟: 砂地盤上の円形及び帯基礎の支持力特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 463/III-22, pp.85-94, 1993.
9) 岡村未対, 三原淳慎, 竹村次郎, 桑野二郎: 偏心荷重を受ける砂地盤の支持力・変形特性に及ぼす基礎の形状と寸法の影響, 第 45 回地盤工学シンポジウム, pp. 61-64, 2000.
10) Okamura, M., and Matsuo, O.: A displacement prediction method for retaining walls under seismic loading, *Soils and foundations*, Vol. 42, No. 1, pp. 131-138, 2002.
11) Faccioli, E., Paulucci, R., and Vivero, G.: Investigation of seismic soil-footing interaction by large scale cyclic tests and analytical models, Proc. 4th Int. Conf. on *Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, Special Presentation Lecture, March, SPL-05, pp. 26-31, 2001.
12) Nova, R. and Montrasio, L.: Settlements of shallow foundations on sand, *Geotechnique*, Vol. 41, No. 2, pp. 243-256, 1991.
13) Butterfield, R. and Gottardi, G.: A complete threedimensional failure envelope for shallow footings on sand, *Geotechnique*, Vol. 44, No. 1, pp. 181-184, 1994.
14) Gottardi, G. and Butterfield, R.: The displacement of a model rigid surface footing on dense sand under general planar loading, *Soil and Foundations*, Vol. 35, No. 3, pp. 71-82, 1995.
15) (社) 土質工学会: わかりやすい土質力学原論 [第 1 回改訂版], pp. 179-185, 1992.
16) Paolucci, R. and Pecker, A.: Seismic bearing capacity of shallow strip foundations on dry soils, *Soils and Foundations*, Vol. 37, No. 3, pp. 95-105, 1997.

17) 福井次郎, 木村嘉富, 石田雅博, 貴志友基: 直接基礎の大地震時の挙動に関する検討, 土木研究所資料, 第 3627 号, pp. 11-12, 1999.

18) Ishiyama, Y.: Motions of rigid bodies and criteria for overturning by earthquake excitations, *Earthquake Engineering and Structual Dynamics*, Vol. 10 , No. 5, pp. 635-650, 1982.

資料 A　CD-ROM収録データ

土木研究所資料第 4028 号の巻末 DVD-ROM に収録された計測データは制限なく使用することができます．ただし，データの利用されている実績を蓄積することによってデータ提供の必要性・有益性を把握するため，次の 2 点についてご協力をお願い致します．

- 計測データを利用したときは，利用したことを参考文献等に明示して下さい．
- 計測データを用いて作成された学術論文・報告書等で，印刷物等が出版・公開された場合は，コピーを下記に送って下さい．これには，大学等における卒業論文，学会講演の予稿集・商用利用時の報告書等も含まれます．お送りいただくのは，年度末にまとめてお送りいただいても，随時お送りいただいても構いません．

〒 305-8516 茨城県つくば市南原 1 番地 6
独立行政法人 土木研究所
構造物研究グループ　基礎チーム

A.1　データファイル一覧

本資料付属の CD-ROM のフォルダ構成は以下の通りである．

```
CD-ROM
├ data
│   ├ 計測データ                  : 加速度計，2 方向ロードセル，変位計による計測データ
│   ├ 加速度 2 階積分変位データ  : 加速度計記録を 2 階積分することにより求められた変位
│   └ 画像解析変位                : 加速度計記録と同期を取った画像の解析により求められ
│     および荷重データ              た変位と，それらの変位が生じた時刻においてロードセル
│                                   により計測された荷重
├ spectrumn                       : スペクトル解析結果
├ Swave                           : S 波計測結果
└ transfer-function               : 伝達関数計算結果
```

A.2 data

A.2.1 加速度計，2方向ロードセル，変位計による計測データ

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.1 計測データ一覧

データ	実験ケース		サンプリング	サンプリング	サンプリング	データ	データ
ファイル名	Case	Step	周波数 (Hz)	時間間隔 (sec)	時間 (sec)	列数	行数
Case1-1.txt	Case 1	Step 1	1000	0.001	50	95	50000
Case1-2.txt	Case 1	Step 2	500	0.002	120	95	60000
Case1-3.txt	Case 1	Step 3	1000	0.001	50	95	50000
Case1-4.txt	Case 1	Step 4	1000	0.001	50	95	50000
Case1-5.txt	Case 1	Step 5	1000	0.001	50	95	50000
Case2-1.txt	Case 2	Step 1	1000	0.001	50	95	50000
Case2-2.txt	Case 2	Step 2	1000	0.001	50	95	50000
Case2-3.txt	Case 2	Step 3	1000	0.001	50	95	50000

表–A.2 計測データファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 1					
加振波名 →	Wave name: Sweep					
サンプリングタイム →	Sampling time: 0.001(sec)					
データ行数 →	number of data lines: 50000					
データ列数 →	number of data columns: 69					
計測器名 →	Time	Ch-001	Ch-002	·····	Ch-244	Ch-245
データ単位 →	sec	gal	gal	·····	mm	mm
データ →	0.000	0.483	−3.795	·····	0.296	0.315
	0.002	−0.058	−0.058	·····	−0.132	−0.204
	.	.	.	·····	.	.
	.	.	.	·····	.	.
	.	.	.	·····	.	.
	.	.	.	·····	.	.
	.	.	.	·····	.	.

A.2.2 加速度計記録の2階積分による変位データ

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.3 加速度の2階積分による変位データ一覧

データ	実験ケース		サンプリング	サンプリング	解析	データ	データ
ファイル名	Case	Step	周波数 (Hz)	時間間隔 (sec)	時間 (sec)	列数	行数
Case1-2-46-70d.txt	Case 1	Step 2	500	0.002	120	26	60000
Case1-4-46-70d.txt	Case 1	Step 4	1000	0.001	50	26	50000
Case1-5-46-70d.txt	Case 1	Step 5	1000	0.001	50	26	10000
Case2-2-46-70d.txt	Case 2	Step 2	1000	0.001	50	26	50000

表–A.4 加速度の2階積分による変位データファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 2				
加振波名 →	Wave name: Shichihou-bridge				
サンプリングタイム →	Sampling time: 0.002(sec)				
データ行数 →	number of data lines: 6000				
データ列数 →	number of data columns: 25				
計測器名 →	Time	Ch-046	Ch-047	·····	Ch-070
データ単位 →	(sec)	(mm)	(mm)	·····	(mm)
データ →	0.000	2.7000E-02	−1.2900E-02	·····	−0.0133
	0.002	3.7300E-02	−3.2200E-03	·····	0.014
	.	.	.	·····	.
	.	.	.	·····	.
	.	.	.	·····	.
	.	.	.	·····	.
	.	.	.	·····	.

A.2.3 計測荷重および画像解析による変位データー覧

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.5 計測荷重と画像解析処理変位の同期補正データファイル一覧

データ ファイル名	実験ケース		サンプリング タイム (sec)	データ開始 時刻 (sec)	データ終了 時刻 (sec)	データ 列数	データ 行数
	Case	Step					
Case1-2-VHM--vutheta-Image.txt	Case 1	Step 2	0.033	8.570	95.670	8	2614
Case1-4-VHM--vutheta-Image.txt	Case 1	Step 4	0.033	1.592	44.892	8	1300
Case1-5-VHM--vutheta-Image.txt	Case 1	Step 5	0.033	2.782	9.082	8	190
Case2-2-VHM--vutheta-Image.txt	Case 2	Step 2	0.033	3.115	31.315	8	847

表–A.6 同期補正データファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 2			
加振波名 →	Wave name: Shichihou-bridge			
サンプリングタイム →	Sampling time: 0.033(sec)			
データ行数 →	Number of data lines: 2614			
データ列数 →	Number of data columns: 8			
データ名 →	Time	V	H	M
データ単位 →	sec	kN	kN	kN·m
データ →	0.000	8.570	−0.141	−0.044
	0.002	8.604	0.182	0.114
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	.	.	.	.
	↑	↑	↑	↑
	時刻	鉛直力	水平力	モーメント
		↑	↑	↑
		2 方向ロードセルによる計測値		

v	u	theta Y	theta Z
mm	mm	rad	rad
0.000	0.000	0.000	0.000
0.109	−0.130	0.000	−0.002
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
↑	↑	↑	↑
鉛直変位	水平変位	X-Z 平面上の回転角	X-Y 平面上の回転角

A.3 スペクトル

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.7 スペクトルデータファイル一覧

	データ ファイル名	実験ケース	サンプリング 周波数 (Hz)	サンプリング 時間 (sec)	データ 列数	データ 行数
加速度応答 スペクトル	Case12accGround-rsa.txt	Case 1-Step 2	500	120	5	5000
	Case14accGround-rsa.txt	Case 1-Step 4	1000	50	5	5000
	Case15accGround-rsa.txt	Case 1-Step 5	1000	50	5	5000
	Case22accGround-rsa.txt	Case 2-Step 2	1000	50	5	5000
速度応答 スペクトル	Case12accGround-rsv.txt	Case 1-Step 2	500	120	5	5000
	Case14accGround-rsv.txt	Case 1-Step 4	1000	50	5	5000
	Case15accGround-rsv.txt	Case 1-Step 5	1000	50	5	5000
	Case22accGround-rsv.txt	Case 2-Step 2	1000	50	5	5000

表–A.8 スペクトルデータファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 2				
加振波名 →	Wave name: Shichihou-bridge				
データ行数 →	Number of data lines: 5000				
データ列数 →	Number of data columns: 5				
データ名 →	Frequency	h=0.02	h=0.05	h=0.10	h=0.20
データ単位 →	Hz	gal	gal	gal	gal
データ →	0	0	0	0	0
	0.01	1.65853	1.50008	1.29147	1.3839
	↑	↑	↑	↑	↑
	周波数	減衰率 h=2%	減衰率 h=5%	減衰率 h=10%	減衰率 h=20%

A.4 S 波計測記録

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.9 S 波計測記録データファイル一覧

データ ファイル名	計測実施時	計測 地点	サンプリング 周波数 (Hz)	サンプリング 時間 (sec)	データ 列数	データ 行数
C1-1-Before-E.txt	Case 1-Step 1 加振前	東	2000	0.1805	11	362
C1-1-Before-W.txt	Case 1-Step 1 加振前	西	2000	0.7645	11	1530
C1-1-After-E.txt	Case 1-Step 1 加振後	東	2000	1.2145	11	2430
C1-1-After-W.txt	Case 1-Step 1 加振後	西	2000	0.7030	11	1407
C1-2-After-E.txt	Case 1-Step 2 加振後	東	2000	0.7270	11	1455
C1-2-After-W.txt	Case 1-Step 2 加振後	西	2000	1.4950	11	2991
C2-1-Before-E.txt	Case 2-Step 1 加振前	東	2000	1.3090	11	2619
C2-1-Before-W.txt	Case 2-Step 1 加振前	西	2000	0.8385	11	1678
C2-2-After-E.txt	Case 2-Step 2 加振後	東	2000	1.4120	11	2825
C2-2-After-W.txt	Case 2-Step 2 加振後	西	2000	1.7555	11	3512

表–A.10 S 波計測記録データファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 1				
加振波名 →	Wave name: Sweep				
サンプリングタイム →	Sampling time: 0.0005(sec)				
データ行数 →	Number of data lines: 364				
データ列数 →	Number of data columns: 10				
計測器名 →		XG-02E	XG-04E	· · ·	XG-20E
計測位置 →		GL-0.2m	GL-0.4m	· · ·	GL-0.20m
単位 →	sec	gal	gal	· · ·	gal
データ →	0	20.295	39.9004	· · ·	199.9767
	0.0005	20.29747	39.77695	· · ·	201.3599
	·	·	·	· · ·	·
	·	·	·	· · ·	·
	·	·	·	· · ·	·

A.5 伝達関数

保存形式: MS-DOS Text 形式

データ列区切り方法: スペース区切り

表–A.11 伝達関数データファイル一覧 (1/2)

データ ファイル名	計測実施時	計測地点 *		サンプリング 周波数 (Hz)	サンプリング 時間 (sec)	データ 列数	データ 行数
		A	B				
C1-1H-groundX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	地盤 (X 方向)	1000	50	60	3278
C1-1H-groundZ -tableZ.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (Z 方向)	地盤 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C1-1H-modelX -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	11	3278
C1-1H-modelX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	13	3278
C1-1H-modelZ -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C1-1H-modelZ -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	21	3278
C1-3H-groundX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	地盤 (X 方向)	1000	50	60	3278
C1-3H-groundZ -tableZ.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (Z 方向)	地盤 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C1-3H-modelX -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	11	3278
C1-3H-modelX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	13	3278
C1-3H-modelZ -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C1-3H-modelZ -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	21	3278

表–A.11 伝達関数データファイル一覧 (2/2)

データ ファイル名	計測実施時	計測地点 *		サンプリング 周波数 (Hz)	サンプリング 時間 (sec)	データ 列数	データ 行数
		A	B				
C2-1H-groundX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	地盤 (X 方向)	1000	50	60	3278
C2-1H-groundZ -tableZ.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (Z 方向)	地盤 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C2-1H-modelX -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	11	3278
C2-1H-modelX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	13	3278
C2-1H-modelZ -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C2-1H-modelZ -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	21	3278
C2-3H-groundX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	地盤 (X 方向)	1000	50	60	3278
C2-3H-groundZ -tableZ.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (Z 方向)	地盤 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C2-3H-modelX -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	11	3278
C2-3H-modelX -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (X 方向)	1000	50	13	3278
C2-3H-modelZ -groundX.txt	Case 1-Step 2 加振前	地盤 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	11	3278
C2-3H-modelZ -tableX.txt	Case 1-Step 2 加振前	振動台 (X 方向)	模型 (Z 方向)	1000	50	21	3278

*: 伝達関数は計測地点 B で計測された加速度を，計測地点 A で計測された加速度で除すことで求めた.

表–A.12 伝達関数データファイル様式例

ケース名 →	Case name: Case 1 Step 1					
加振波名 →	Wave name: Sweep					
サンプリングタイム →	Sampling time: 0.001(sec)					
データ行数 →	Number of data lines: 3278					
データ列数 →	Number of data columns: 60					
計測位置 →		台加速度 X 方向				GL-0 m ···
計測器名 →	Frequency	ch001	ch002	···	平均値	Ch013 ···
単位 →	Hz	gal	gal	···	gal	gal ···
データ →	0	0.094106	0.030699	···	0.049371	0.01595 ···
	0.015259	20.29747	39.77695	···	0.028320	0.00875 ···
	.	.	.	.	.	. .
	.	.	.	.	.	. .
	.	.	.	.	.	. .

GL-2.0 m	···	伝達関数				
ch023	···	Frequency	GL-0 m	GL-0.2 m	···	GL-2.0 m
gal	···	Hz	gal/Hz	gal/Hz	···	gal/Hz
0.033189	···	0	1.500305	1.738219	···	0.70272
0.019922	···	0.015259	1.382896	1.635821	···	0.773916
.	···	.	.	.	···	.
.	···	.	.	.	···	.
.	···	.	.	.	···	.

資料 B　計測器校正値一覧

B.1　加速度計

表–B.1 に加速度計の検定結果を示す．表中の定格容量 (gal)，定格出力 (μ) は計測器の検査成績表に示された値である．加速度の検定は，加速度の + 方向および – 方向を下向きにして 1 G の加速度を与えた時のひずみを測定することで行った．それぞれの計測値を，表中の+1 G，–1 G のカラムに示す．校正値は，定格容量を，表中の 2 G のカラムに示すこれらの計測値の差で除したものである．また，誤差は校正値と定格出力の差を定格出力で除したものである．

表–B.1 加速度計校正値一覧 (1/2)

Ch	計測器名	Serial No.	定格容量 (gal)	定格出力 (gal/μ)	+1G A (μ)	−1G B (μ)	2G A−B (μ)	校正値 (gal/μ)	誤差 (%)
1	XT-NW	EQ14200111960	1960	1.525	274	−958	1232	1.591	4.32
2	XT-NE	EQ14200121960	1960	1.583	2173	989	1184	1.655	4.57
3	XT-SW	EQ14200101960	1960	1.542	1409	175	1234	1.588	3.00
4	XT-SE	EQ14200041960	1960	1.564	1332	121	1211	1.618	3.48
5	YT-NW	EQ58900061960	1960	1.467	995	−301	1296	1.512	3.09
6	YT-NE	EQ58900071960	1960	1.471	508	−780	1288	1.522	3.45
7	YT-SW	EQ58900031960	1960	1.454	285	−1020	1305	1.502	3.30
8	YT-SE	EQ58900021960	1960	1.559	1122	−96	1218	1.609	3.22
9	ZT-NW	EQ58900101960	1960	1.493	270	−100	1272	1.541	3.21
10	ZT-NE	EQ58900111960	1960	1.465	−681	−201	1336	1.467	0.14
11	ZT-SW	EQ58900091960	1960	1.462	1116	−190	1306	1.501	2.65
12	ZT-SE	EQ58900081960	1960	1.446	1006	−308	1314	1.492	3.16
13	XG-00W	EQ58900121960	1960	1.407	561	−789	1350	1.452	3.19
14	XG-02W	EQ58900131960	1960	1.428	349	−981	1330	1.474	3.20
15	XG-04W	EQ58900141960	1960	1.454	257	−1047	1304	1.503	3.37
16	XG-06W	EQ58900161960	1960	1.417	622	−717	1339	1.464	3.30
17	XG-08W	EQ58900171960	1960	1.467	−118	−1414	1296	1.512	3.09
18	XG-10W	EQ58900181960	1960	1.462	109	−1188	1297	1.511	3.36
19	XG-12W	EQ58900191960	1960	1.454	914	−387	1301	1.507	3.61
20	XG-14W	EQ58900201960	1960	1.454	173	−1132	1305	1.502	3.30
21	XG-16W	ER91200021960	1960	1.576	901	−300	1201	1.632	3.55
22	XG-18W	ER91200041960	1960	1.545	−126	−1354	1228	1.596	3.31
23	XG-20W	ER91200051960	1960	1.562	686	−528	1214	1.614	3.36
24	XG-00E	ER91200061960	1960	1.562	2528	1315	1213	1.616	3.45
25	XG-02E	ER91200181960	1960	1.567	973	−237	1210	1.620	3.37
26	XG-04E	ER91200191960	1960	1.586	446	−751	1197	1.637	3.24
27	XG-06E	ER91200201960	1960	1.620	−595	−1765	1170	1.675	3.41
28	XG-08E	ES24900021960	1960	1.706	−129	−1238	1109	1.767	3.60
29	XG-10E	ES24900031960	1960	1.640	1412	259	1153	1.700	3.65
30	XG-12E	ES24900041960	1960	1.650	1001	−145	1146	1.710	3.65
31	XG-14E	ES24900051960	1960	1.685	−17	−1140	1123	1.745	3.58
32	XG-16E	ES24900061960	1960	1.625	787	−378	1165	1.682	3.53
33	XG-18E	ES24900071960	1960	1.536	−522	−1753	1231	1.592	3.66
34	XG-20E	ES24900081960	1960	1.579	−307	−1505	1198	1.636	3.61
35	XG-04M	ES24900091960	1960	1.653	−643	−1785	1142	1.716	3.83
36	XG-06M	ES24900101960	1960	1.661	−520	−1664	1144	1.713	3.15

表–B.1 加速度計校正値一覧 (2/2)

Ch	計測器名	Serial No.	定格容量 (gal)	定格出力 (gal/μ)	+1G A (μ)	−1G B (μ)	2G A−B (μ)	校正値 (gal/μ)	誤差 (%)
37	XG-08M	ES24900111960	1960	1.642	612	−540	1152	1.701	3.62
38	XG-10M	ES24900121960	1960	1.637	1070	−86	1156	1.696	3.57
39	XG-12M	ES24900131960	1960	1.693	783	−333	1116	1.756	3.74
40	XG-14M	ES24900141960	1960	1.660	457	−684	1141	1.718	3.48
41	XG-16M	ES24900151960	1960	1.646	751	−401	1152	1.701	3.37
42	XG-18M	ES45900021960	1960	1.643	−6	−1160	1154	1.698	3.37
43	XG-20M	ES45900041960	1960	1.646	658	−487	1145	1.712	4.00
44	ZG-02W	ES45900051960	1960	1.631	351	−810	1161	1.688	3.51
45	ZG-02E	ES45900061960	1960	1.596	712	−475	1187	1.651	3.46
46	XF+075M	ES45900071960	1960	1.534	380	−854	1234	1.588	3.54
47	XF+040M	ES45900081960	1960	1.596	1939	753	1186	1.653	3.55
48	XF+025M	ES45900091960	1960	1.595	1863	677	1186	1.653	3.61
49	XF+025N	ES45900111960	1960	1.627	526	−639	1165	1.682	3.41
50	XF+025S	ES45900121960	1960	1.628	1076	−83	1159	1.691	3.88
51	XF+025W	EB65300301960	1960	1.478	−384	−1702	1318	1.487	0.61
52	XF+025E	EK22700021960	1960	1.514	1097	−193	1290	1.519	0.39
53	YF+075M	EK22700121960	1960	1.604	143	−1069	1212	1.617	0.83
54	YF+040M	EK87100051960	1960	1.624	−60	−1261	1201	1.632	0.50
55	YF+025M	EK87100151960	1960	1.646	1148	−43	1191	1.646	0.00
56	YF+025N	EK87100171960	1960	1.551	−2058	−3320	1262	1.553	0.16
57	YF+025S	EX39000011960	1960	1.672	−576	−1746	1170	1.675	0.17
58	YF+025W	EX39000021960	1960	1.647	903	−282	1185	1.654	0.42
59	YF+025E	EX39000031960	1960	1.480	752	−568	1320	1.485	0.30
60	ZF+075M	EX39000041960	1960	1.529	2100	826	1274	1.538	0.63
61	ZF+040M	EX39000051960	1960	1.678	819	−341	1160	1.690	0.69
62	ZF+025M	EX39000061960	1960	1.647	739	−445	1184	1.655	0.51
63	ZF+02WN	EX39000071960	1960	1.635	−259	−1449	1190	1.647	0.76
64	ZF+02WM	EX39000081960	1960	1.756	1705	596	1109	1.767	0.63
65	ZF+02WS	EX39000091960	1960	1.700	471	−676	1147	1.709	0.52
66	ZF+02EN	EX39000101960	1960	1.698	1215	63	1152	1.701	0.17
67	ZF+02EM	EX39000111960	1960	1.604	580	−635	1215	1.613	0.58
68	ZF+02ES	EX39000121960	1960	1.703	616	−529	1145	1.712	0.52
69	ZF+075W	EX39000131960	1960	1.687	1373	215	1158	1.693	0.35
70	ZF+075E	EX39000141960	1960	1.704	632	−515	1147	1.709	0.26

B.2　2方向ロードセル

表–B.2 2方向ロードセル校正値一覧

Ch	計測器名	Serial No.	校正値 (kN/μ)
72	P-01	No.1	7.30
73	P-02	No.2	7.20
74	P-03	No.3	7.35
75	P-04	No.4	7.30
76	P-05	No.5	7.31
77	P-06	No.6	7.22
78	P-07	No.7	7.40
79	P-08	No.8	7.36
80	P-09	No.9	7.21
81	P-10	No.10	7.34
82	P-11	No.11	7.38
83	S-01	No.1	9.42
84	S-02	No.2	9.56
85	S-03	No.3	9.20
86	S-04	No.4	9.40
87	S-05	No.5	9.58
88	S-06	No.6	9.37
89	S-07	No.7	8.92
90	S-08	No.8	9.26
91	S-09	No.9	9.39
92	S-10	No.10	9.34
93	S-11	No.11	9.55

B.3　レーザー変位計

表–B.3 レーザー変位計校正値一覧

Ch	計測器名	型番	定格容量 (mm)	校正値 (mm/V)
244	DISP1	LK-500	250	50
245	DISP2	LK-500	250	50

資料 C　サウンディング試験結果

表–C.1 サウンディング試験結果 (Case 1)

深度 GL (m)	北西		南西		北東	南東
	加振前 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振前 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)
±0.0	-	-	-	-	-	-
−0.1	-	-	-	-	-	-
−0.2	-	1.8	-	2.4	2.0	2.4
−0.3	2.6	4.2	3.6	4.0	5.0	4.8
−0.4	5.0	6.8	5.4	6.2	7.0	6.3
−0.5	6.0	8.5	6.2	9.0	8.2	8.4
−0.6	7.8	11.8	7.2	11.2	11.9	11.4
−0.7	9.2	12.8	10.4	11.6	12.4	12.0
−0.8	13.0	15.2	13.4	15.2	14.2	14.2
−0.9	15.0	16.0	14.4	16.0	16.2	16.0
−1.0	16.0	17.2	15.6	17.4	17.2	17.6
−1.1	17.0	18.6	17.4	18.4	18.8	19.0
−1.2	18.0	19.2	18.6	19.2	19.6	20.0
−1.3	19.0	19.8	19.4	19.4	20.0	20.0
−1.4	20.0	20.0	19.8	20.0	20.0	20.0
−1.5	20.4	20.2	20.2	20.4	20.2	20.4
−1.6	20.7	20.7	20.5	20.5	20.9	20.7
−1.7	20.9	20.9	20.7	20.7	20.9	21.1
−1.8	21.1	21.5	21.1	21.1	22.1	21.3

表–C.2 サウンディング試験結果 (Case 2)

深度 GL (m)	北西		南西		北東	南東
	加振前 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振前 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)	加振後 (MN/m^2)
±0.0	-	-	-	-	-	-
−0.1	-	-	-	-	-	-
−0.2	-	2.2	-	3.5	4.0	4.5
−0.3	3.8	4.8	3.6	5.0	6.0	5.0
−0.4	5.0	7.0	5.4	7.0	8.0	7.0
−0.5	6.8	8.0	7.0	10.0	9.0	8.0
−0.6	7.6	11.5	7.4	11.0	10.0	11.0
−0.7	11.2	13.0	10.6	12.0	13.0	12.0
−0.8	14.2	15.0	13.6	15.0	14.0	14.0
−0.9	14.8	15.5	15.0	16.0	15.0	17.0
−1.0	15.8	18.0	16.4	17.0	17.0	18.5
−1.1	18.2	18.5	18.4	18.0	19.0	19.0
−1.2	18.6	19.0	19.0	20.0	20.0	20.0
−1.3	18.8	20.0	19.2	20.0	20.0	20.0
−1.4	19.6	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
−1.5	20.0	21.0	20.0	21.0	21.0	20.0
−1.6	20.7	21.3	20.3	21.1	21.1	21.1
−1.7	21.1	22.1	21.1	21.1	21.1	22.1
−1.8	21.1	22.5	22.1	22.1	22.1	22.1

資料 D　地盤沈下量

以下の表中の各 No. の計測位置については，図–2.33 を参照のこと．

表–D.1 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 1)(1/2)

No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)	No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)
1	225	222	−3	39	223	215	−8
2	225	222	−3	40	222	220	−2
3	226	222	−4	41	226	221	−5
4	226	222	−4	42	225	219	−6
5	226	222	−4	43	225	216	−9
6	226	223	−3	44	225	213	−12
7	226	223	−3	45	225	211	−14
8	225	222	−3	46	225	214	−11
9	225	222	−3	47	224	213	−11
10	225	222	−3	48	224	213	−11
11	225	222	−3	49	223	216	−7
12	225	222	−3	50	222	220	−2
13	225	221	−4	51	225	221	−4
14	225	221	−4	52	225	218	−7
15	225	221	−4	53	225	226	1
16	225	222	−3	54	225	240	15
17	225	222	−3	55	225	236	11
18	224	221	−3	56	224	231	7
19	224	221	−3	57	224	229	5
20	224	221	−3	58	223	220	−3
21	225	221	−4	59	223	217	−6
22	225	221	−4	60	222	219	−3
23	225	220	−5	61	226	222	−4
24	225	215	−10	62	226	220	−6
25	225	215	−10	63	225	231	6
26	225	215	−10	64	225	240	15
27	225	215	−10	65	225	240	15
28	224	218	−6	66	224	239	15
29	224	221	−3	67	224	237	13
30	223	221	−2	68	223	236	13
31	225	222	−3	69	223	204	−19
32	225	220	−5	70	223	220	−3
33	225	215	−10	71	226	223	−3
34	224	210	−14	72	226	221	−5
35	224	210	−14	73	226	236	10
36	224	210	−14	74	226	238	12
37	224	212	−12	75	226	237	11
38	223	214	−9	76	225	237	12

表–D.1 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 1) (2/2)

No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)	No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)
77	225	236	11	119	227	220	−7
78	224	235	11	120	226	223	−3
79	223	201	−22	121	228	225	−3
80	223	220	−3	122	228	224	−4
81	227	224	−3	123	227	222	−5
82	227	222	−5	124	227	217	−10
83	227	225	−2	125	227	217	−10
84	227	239	12	126	226	218	−8
85	227	237	10	127	226	218	−8
86	226	237	11	128	226	220	−6
87	226	236	10	129	226	222	−4
88	226	235	9	130	226	223	−3
89	226	210	−16	131	227	225	−2
90	225	221	−4	132	226	223	−3
91	228	225	−3	133	226	222	−4
92	228	222	−6	134	226	221	−5
93	228	236	8	135	226	220	−6
94	227	238	11	136	226	220	−6
95	227	238	11	137	226	219	−7
96	227	238	11	138	225	221	−4
97	226	236	10	139	225	223	−2
98	226	236	10	140	225	223	−2
99	226	220	−6	141	226	225	−1
100	226	221	−5	142	226	224	−2
101	229	225	−4	143	225	223	−2
102	229	222	−7	144	225	222	−3
103	229	228	−1	145	225	221	−4
104	229	238	9	146	225	222	−3
105	228	239	11	147	225	222	−3
106	228	239	11	148	225	223	−2
107	228	238	10	149	225	224	−1
108	228	232	4	150	225	224	−1
109	227	220	−7	151	226	225	−1
110	227	222	−5	152	225	224	−1
111	229	225	−4	153	225	223	−2
112	229	223	−6	154	224	222	−2
113	229	218	−11	155	224	222	−2
114	229	217	−12	156	225	223	−2
115	228	216	−12	157	225	223	−2
116	228	217	−11	158	225	224	−1
117	228	215	−13	159	225	224	−1
118	227	219	−8	160	225	224	−1

表–D.2 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 2) (1/2)

No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)	No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)
1	226	228	2	41	228	227	−1
2	224	225	1	42	227	224	−3
3	224	225	1	43	227	222	−5
4	224	224	0	44	227	219	−8
5	223	223	0	45	226	217	−9
6	222	221	−1	46	226	217	−9
7	221	221	0	47	225	217	−8
8	220	220	0	48	224	218	−6
9	220	220	0	49	223	220	−3
10	222	222	0	50	225	223	−2
11	228	228	0	51	275	275	0
12	226	226	0	52	274	270	−4
13	225	224	−1	53	238	243	5
14	224	223	−1	54	238	243	5
15	223	221	−2	55	238	243	5
16	221	220	−1	56	238	243	5
17	221	219	−2	57	238	243	5
18	220	219	−1	58	238	243	5
19	220	220	0	59	275	275	0
20	223	222	−1	60	275	277	2
21	227	228	1	61	275	276	1
22	226	226	0	62	273	270	−3
23	225	224	−1	63	238	243	5
24	224	221	−3	64	238	243	5
25	224	220	−4	65	237	243	6
26	222	219	−3	66	237	243	6
27	221	217	−4	67	238	243	5
28	220	217	−3	68	238	243	5
29	220	218	−2	69	276	278	2
30	222	222	0	70	276	279	3
31	228	228	0	71	275	275	0
32	227	225	−2	72	273	272	−1
33	227	224	−3	73	237	243	6
34	226	222	−4	74	237	243	6
35	226	220	−6	75	237	242	5
36	225	220	−5	76	237	243	6
37	224	219	−5	77	237	243	6
38	222	218	−4	78	237	243	6
39	221	218	−3	79	278	278	0
40	223	222	−1	80	278	279	1

表–D.2 基礎周辺地盤高さ計測結果 (Case 2) (2/2)

No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)	No.	初期値 (mm)	加振後 (mm)	沈下量 (mm)
81	275	275	0	121	225	226	1
82	271	271	0	122	223	222	−1
83	237	243	6	123	223	219	−4
84	237	243	6	124	224	218	−6
85	237	242	5	125	225	218	−7
86	237	243	6	126	226	221	−5
87	237	243	6	127	226	222	−4
88	237	243	6	128	226	222	−4
89	278	279	1	129	226	225	−1
90	280	280	0	130	227	226	−1
91	274	274	0	131	227	226	−1
92	271	270	−1	132	225	224	−1
93	238	243	5	133	225	223	−2
94	238	243	5	134	225	223	−2
95	238	243	5	135	226	223	−3
96	237	243	6	136	227	223	−4
97	237	243	6	137	227	223	−4
98	237	243	6	138	226	224	−2
99	279	277	−2	139	226	225	−1
100	278	278	0	140	227	227	0
101	273	274	1	141	226	226	0
102	272	269	−3	142	223	223	0
103	237	243	6	143	224	224	0
104	237	243	6	144	225	223	−2
105	237	243	6	145	226	224	−2
106	236	243	7	146	226	224	−2
107	237	243	6	147	226	224	−2
108	237	243	6	148	226	225	−1
109	278	275	−3	149	225	225	0
110	277	276	−1	150	226	226	0
111	225	226	1	151	226	226	0
112	223	222	−1	152	224	224	0
113	222	213	−9	153	225	225	0
114	223	212	−11	154	226	226	0
115	225	211	−14	155	226	227	1
116	225	212	−13	156	227	227	0
117	225	214	−11	157	226	226	0
118	226	216	−10	158	226	226	0
119	226	225	−1	159	225	226	1
120	226	225	−1	160	225	225	0