

8.6 画像計測

8.6.1 計測仕様

基本情報

試験体は、CLT 構法建築物（A 棟：5 階建てと B 棟：3 階建て）2 棟であり、高さが約 12m と大きいので計測分解能は±1mm 程度となった。カメラから遠いマーカーについては±2mm 程度の雑音が発生しているものもあった。以下に計測仕様の基本的事項を示す。

- 実施場所 : 防災科学技術研究所 兵庫耐震工学センター「E-Defense」
- 実施期間 : 2015 年 2 月 9 日～18 日（3 次元計測を行ったのは 2/9, 10, 17, 18）
- 使用機材 : 別紙に記述（高速度カメラ 8 台, コンピュータ 5 台使用）
- 計測時間 : 1 回の実験に連続で計測できる枚数は最大 8455 枚
毎秒 100 枚, 最長 84.55 秒間（実験では 4000～7000 枚 40～70 秒）
- 測定分解能 : 画像(1024×992, 8 ビット), 処理により視野範囲の約 10,000 分の 1
本計測では±1.0mm～±2.0mm
- 測定点数 : A 棟 87 点, B 棟 99 点（振動台上に A 棟が 3 点, B 棟が 4 点）

カメラ配置と座標系

8 台のカメラは、実験棟の 1 階に設置した。A 棟のカメラ配置を図 8.6.1 に、B 棟のカメラ配置を図 8.6.2 に示す。A 棟と B 棟の実験期間はそれぞれ 2 日間であり、カメラはそれぞれの 2 日間の実験で基本的に移動させなかった。座標原点は試験体の中央で Z 方向＝ゼロが振動台上の鉄骨架台レベルになるように、座標変換している。X 方向は試験体から制御室に向う方向、Y 方向は制御室から見て右側が正の方向になるように取った。カメラ座標は表 8.6.1 に示す。

表 8.6.1 使用したカメラレンズと設置位置座標

カメラ	A 棟				B 棟			
	使用レンズ	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)	Z 座標 (mm)	使用レンズ	X 座標 (mm)	Y 座標 (mm)	Z 座標 (mm)
1	25mm	19261	-10560	1090	25mm	19355	-9660	1066
2	16mm	19029	-18977	722	25mm	20141	-17589	1193
3	12.5mm	18434	16469	1188	25mm	19668	16481	1140
4	25mm	20822	11253	588	25mm	20482	11669	535
5	12.5mm	-19287	8631	2152	16mm	-18489	7779	1829
6	16mm	-17995	19705	960	16mm	-14429	13607	1177
7	16mm	-17165	-20865	1215	25mm	-21662	-18617	1650
8	12.5mm	-17961	-9570	757	16mm	-17736	-7357	1404

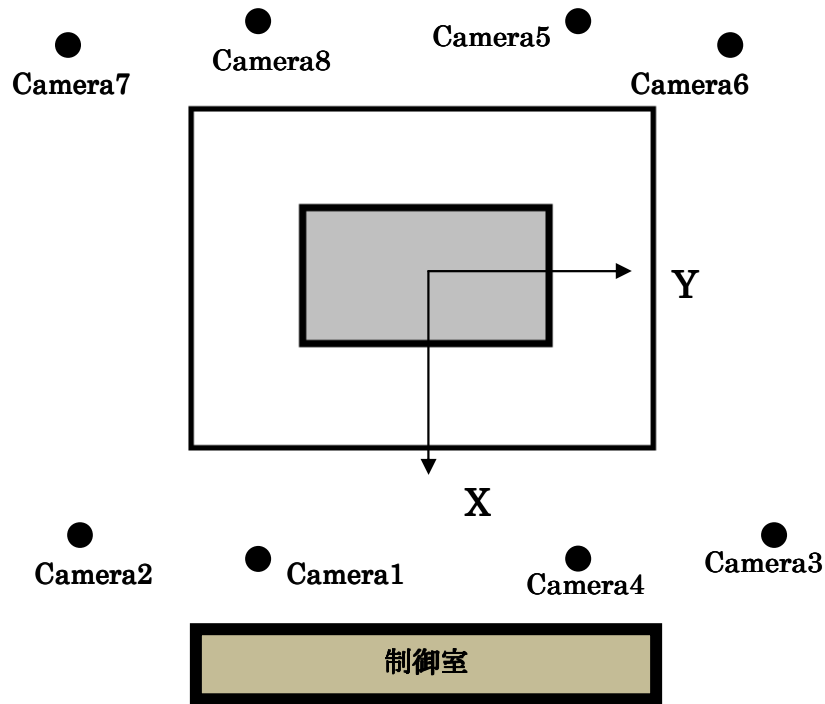


図 8.6.1 A 棟のカメラ配置と座標系

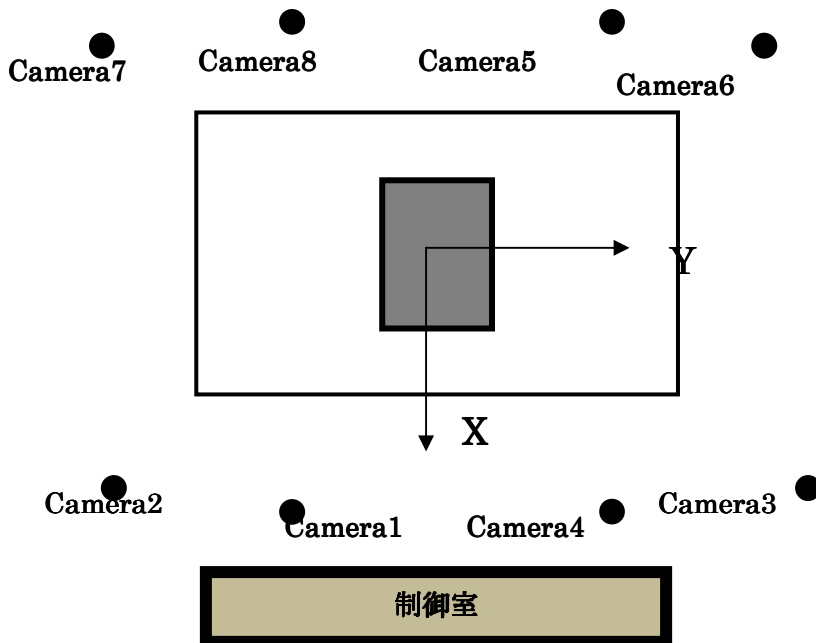
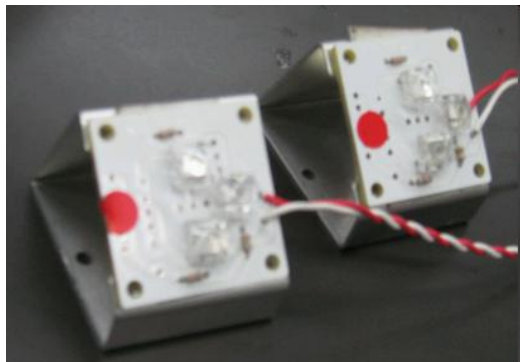


図 8.6.2 B 棟のカメラ配置と座標系

計測に使用した LED 発光マーカー

測定点に相当する LED 発光マーカーは 6 個の赤色高輝度 LED を搭載したものと 4 個の LED を搭載した 2 種類を使用した。A 棟には 6 個の LED タイプ (50mm×50mm) を使用し、

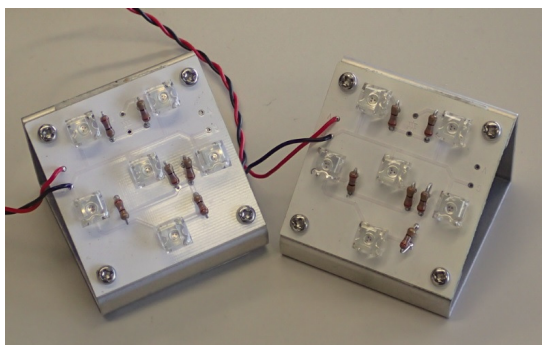
B棟には4個のLEDタイプ(28×28mm)のものを主に使用した。である。どちらも6Vの電池または直流電源で駆動されている。図8.6.3に使用した4個LEDタイプのマーカの形状を示す。



小型マーカ

基板サイズ	: 28×28×8 mm
相当直径	: 約 20mm
ランプ数	: 4
重さ	: 20 g
測定可能分解能	: 0.5mm (最適条件時)

(a) 主に B 棟の計測に使用した小型 LED マーカ(LED4 個使用)



中型マーカ

基板サイズ	: 50×50×8 mm
相当直径	: 約 50mm
ランプ数	: 6
重さ	: 40 g
測定可能分解能	: 1.0mm (最適条件時)

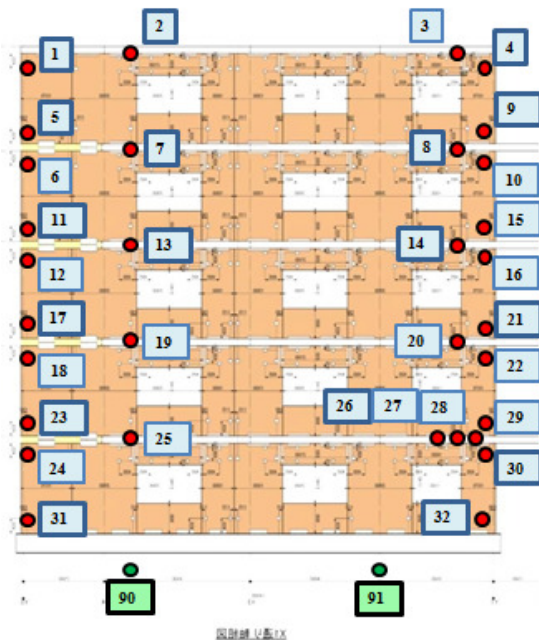
(b) 主に A 棟の計測に使用した中型 LED マーカ(LED6 個使用)

図 8.6.3 LED 発光マーカ

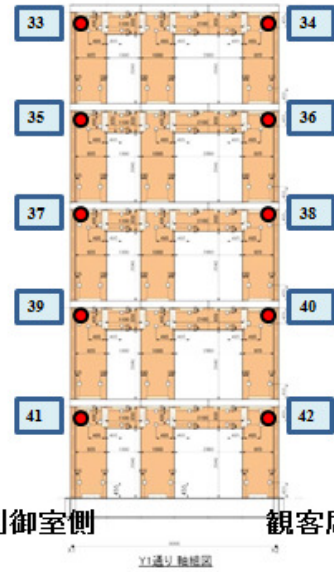
マーカ設置位置とマーカ番号割り振り

図 8.6.4 に A 棟の 87 個のマーカ位置と番号割り振りを、図 8.6.5 に B 棟のマーカ位置と番号割り振りを示す。計測されたマーカの座標値や変位データは、この番号で識別されてファイルに保存されている。調べたい位置のデータを参照する場合は、その位置のマーカ番号を図 8.6.4, 8.6.5 から見つけ、エクセルデータのその番号に対応する列のデータを参照する必要がある。設置数と位置は委員らの意見と指示によるものである。図 8.6.5 の B 棟では、約 20 個のマーカが追加されたため、追加されたマーカ番号は大きい数字のものになっている。単純に上から順番になっていないので注意してほしい。

3次元画像計測した各マーカの初期座標値は、データを参照してほしい。なお、座標原点は試験体のほぼ中央の鉄骨製架台上である。

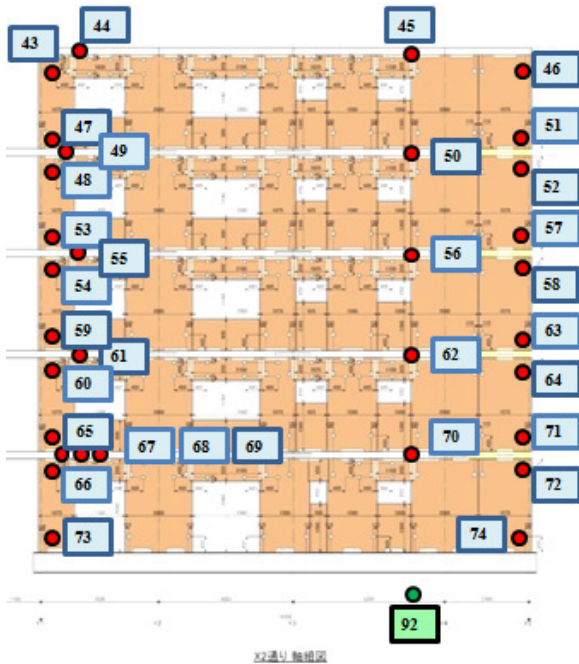


北側（制御室側）

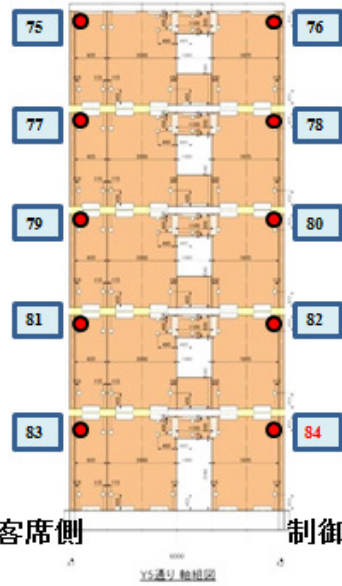


制御室側 観客席側

西側（準備棟側）



南側（観客席側）



観客席側 制御室側

東側（床木口下）

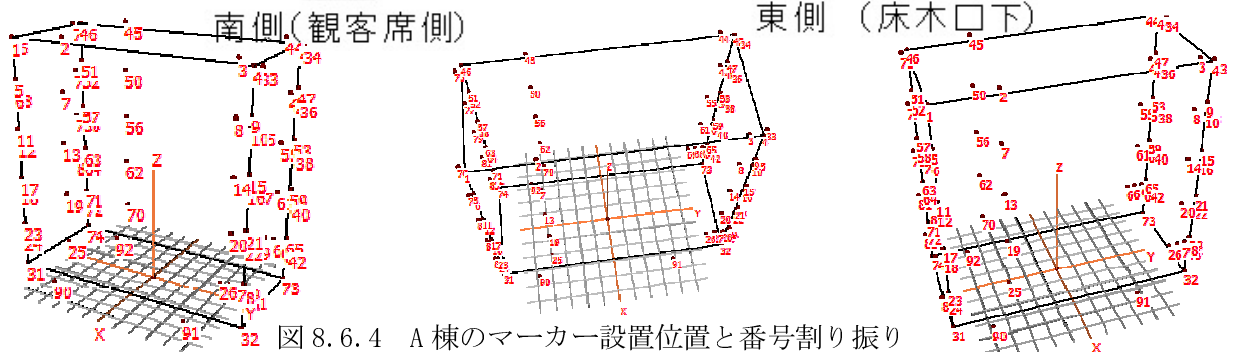


図 8.6.4 A棟のマーカ―設置位置と番号割り振り

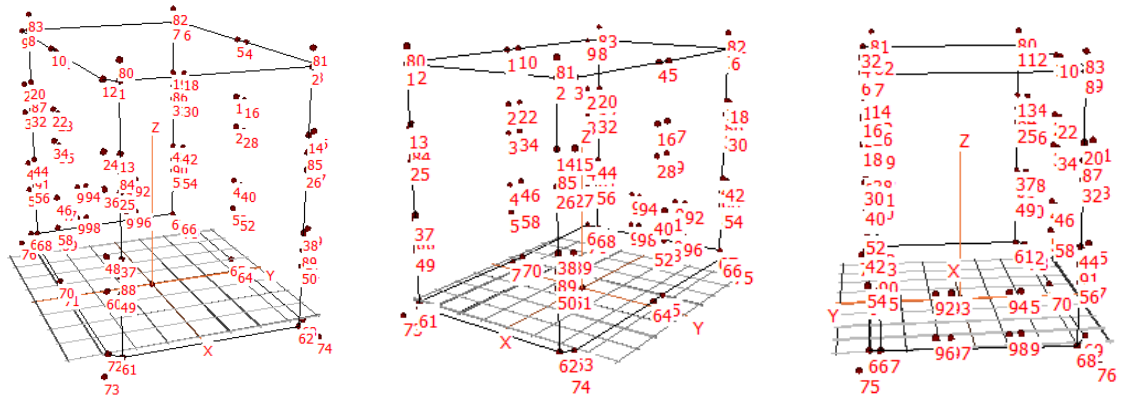
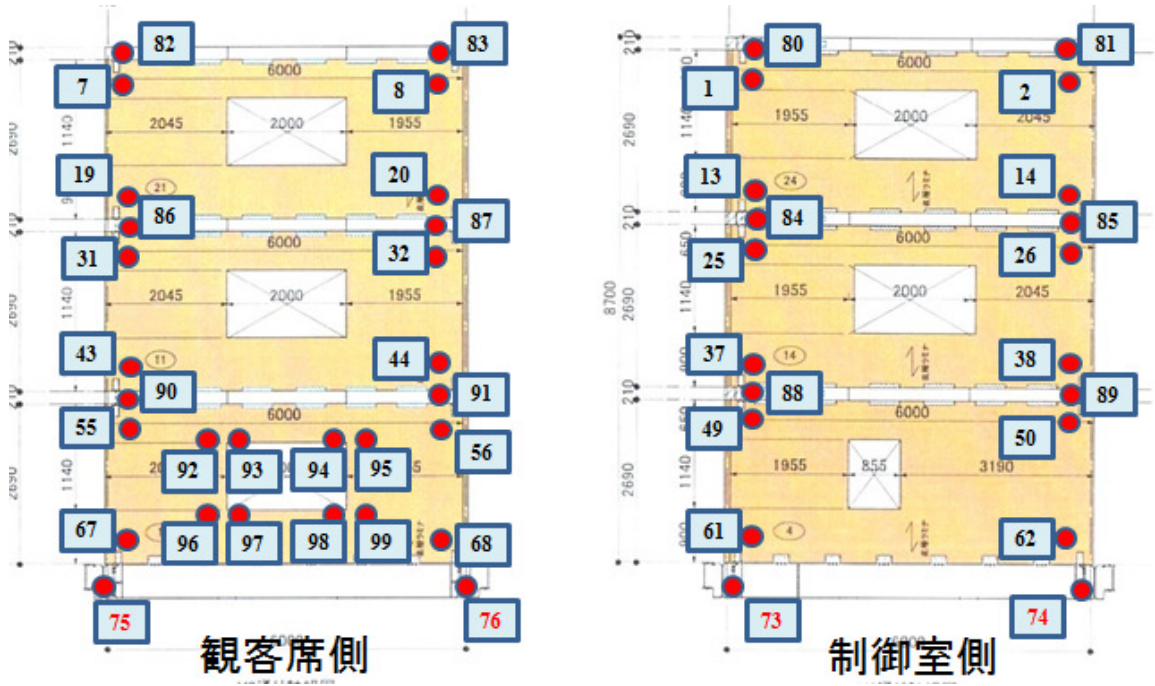
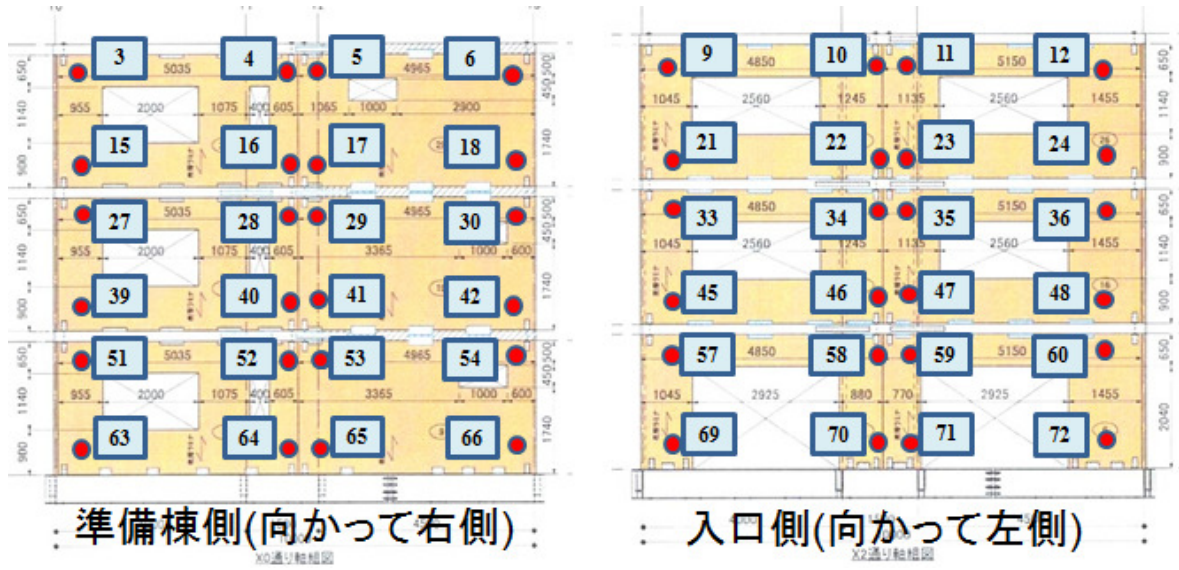


図 8.6.5 B 棟のマーカー設置位置と番号割り振り

8.6.2 解析結果

解析データとファイル名の関係

解析データは、画像解析から得られた各マーカーの絶対座標時系列データから、以下の5種類のファイルを作成した。それらは、日付のフォルダの中に実験時間を示すフォルダを製作しその中に格納されている。

絶対座標データ(静止座標系からの3次元座標)	→ 「試験名.csv」
変位データ(初期座標からの移動量)	→ 「～Ostart.csv」
振動台からの相対変位(73番マーカーからの相対変位)	→ 「～M73fixed.csv」
相対変位(73番マーカーからの相対変位)変位データ	→ 「～M73fixed_Ostart.csv」
加速度データ(参考データ:単位GAL)	→ 「～Acc.csv」

表 8.6.2 と表 8.6.3 に、絶対座標データと変位データの CSV ファイルを開いた画面を示す。A列はフレーム番号、B,C,D列はそれぞれ1番マーカーのX,Y,Z座標値(mm単位)の時系列値を示している。以下、E,F,G列が2番マーカーの時系列データであり、120番マーカーまで360列が存在する。マーカー番号が割り振られていない場合や計測ができなかったフレームでは、座標値は(-1,-1,-1)を取っている。変位データは第一フレームの数値がすべてゼロから始まっている。すなわち、第一フレームを静止状態として、そこからの各マーカーの変位の時系列データを表している。画像計測を行った実験を表 8.6.4 に示す。画像計測のスタートタイミングは、施設側計測システムのA/Dがスタートしてから1秒以内に行っている。

表 8.6.2 絶対座標データのフォーマット

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Marker	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
2	1	3083.03	-7024.17	14032.83	3065.22	-3736.24	14365.29	3072.08	6260.96	14328.35
3	2	3082.96	-7024.04	14033.35	3066.72	-3736.42	14366.43	3070.68	6261.58	14328.97
4	3	3081.74	-7023.79	14032.7	3063.62	-3734.66	14363.6	3072.53	6261.68	14327.15
5	4	3080.44	-7023.67	14032.6	3063.54	-3735.07	14364.51	3071.67	6262.87	14326.94
6	5	3080.6	-7023.45	14032.83	3064.4	-3735.01	14364.12	3070.84	6261.6	14328.31
7	6	3082.8	-7024.04	14033.33	3064.8	-3736.28	14365.22	3071.54	6261.03	14328.82
8	7	3082.91	-7023.97	14033.38	3066.85	-3736.97	14365.95	3072.05	6260.83	14328.56
9	8	3081.26	-7023.52	14033.08	3064.94	-3735.16	14364.28	3071.48	6262.63	14327.08

表 8.6.3 変位データのフォーマット

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Marker	1X	1Y	1Z	2X	2Y	2Z	3X	3Y	3Z
2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	2	1.37	-0.15	0.49	0.03	-0.55	1.27	1.17	-1.59	0.65
4	3	0.76	0.14	0.96	1.27	-1.96	2.36	0.55	-2.82	2.18
5	4	-0.41	0.43	0.39	-0.06	-1.97	2.52	0.7	-1	0.89
6	5	-1.42	0.48	0.06	0.25	0.29	0.66	1.33	-0.3	-0.58
7	6	-0.28	0.15	0.2	-0.11	0.48	0.35	0.14	-0.08	0.12
8	7	-0.55	0.45	0.23	-0.07	-0.01	0.88	1.59	-1.25	0.13
9	8	0.47	0.36	1.05	1.46	-1.62	2.37	0.69	-2.77	1.95
10	9	0.04	0.27	0.29	0.13	-0.97	1.89	1.28	-2.69	1.19
11	10	0.06	-0.01	0.4	0.61	-0.16	0.52	1.23	-0.36	-0.29

表 8.6.4 画像計測を行った実験

棟	日付	時間	実験名	実験内容	記録時間 (秒)	スタート時間 (秒)
A	2/9	13h30m	A-01	Sin 波	40	
	2/9	13h55m	A-03	BSL20%長辺	50	1.11
	2/9	14h05m	A-04	BSL20%短辺	50	1.10
	2/9	15h35m	A-07	BSL100%長辺	50	1.00
	2/9	17h25m	A-10	BSL100%短辺	50	1.12
	2/10	13h30m	A-13	JMA 神戸 100%	70	0.95
B	2/17	12h30m	B-01	Sin 波	40	
	2/17	12h45m	B-03	BSL18%短辺	40	0.82
	2/17	13h00m	B-04	BSL18%長辺	40	0.76
	2/17	13h25m	B-07	BSL90%短辺	40	0.77
	2/17	15h00m	B-10	BSL90%長辺	40	0.83
	2/18	13h35m	B-13	JMA 神戸 100%	60	0.27
	2/18	15h40m	B-16	JMA 神戸 140%	60	0.61

振動台テーブルの変位計測結果

図 8.6.6 に最初の実験である A 棟の Sin 波入力時のテーブル変位の画像計測結果を示す。データは振動台近くの 90 番マーカの変位である。赤色線が X 軸方向変位、青色線が Y 軸方向変位、緑色線が Z 軸方向変位を示している。さらに、図 8.6.7, 図 8.6.8, 図 8.6.9, 図 8.6.10, 図 8.6.11, 図 8.6.12, 図 8.6.13 に、A 棟の PBL100%短辺、長辺方向、JMA 神戸 100%, B 棟の PBL90%短辺、長辺方向、JMA 神戸 100%と 140%の振動台テーブル (A 棟 90 番マーカと B 棟 72 番マーカ) の変位を示す。比較として振動台テーブルのフィードバック信号を示している。

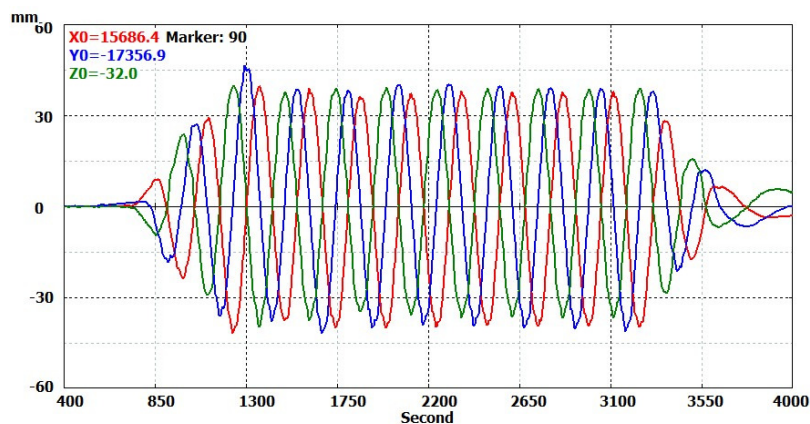


図 8.6.6 最初の A 棟 Sin 波試験の 90 番マーカ(振動台)の変位

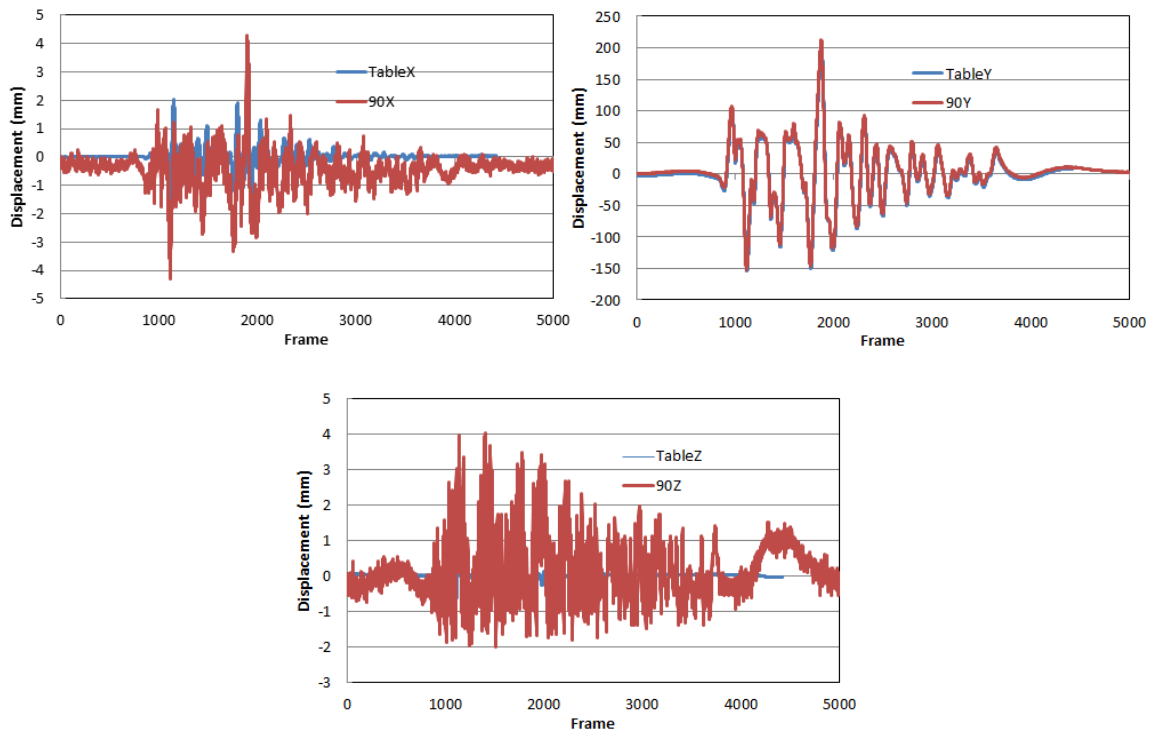


図 8.6.7 A棟BSL100%長辺負荷実験の振動台変位

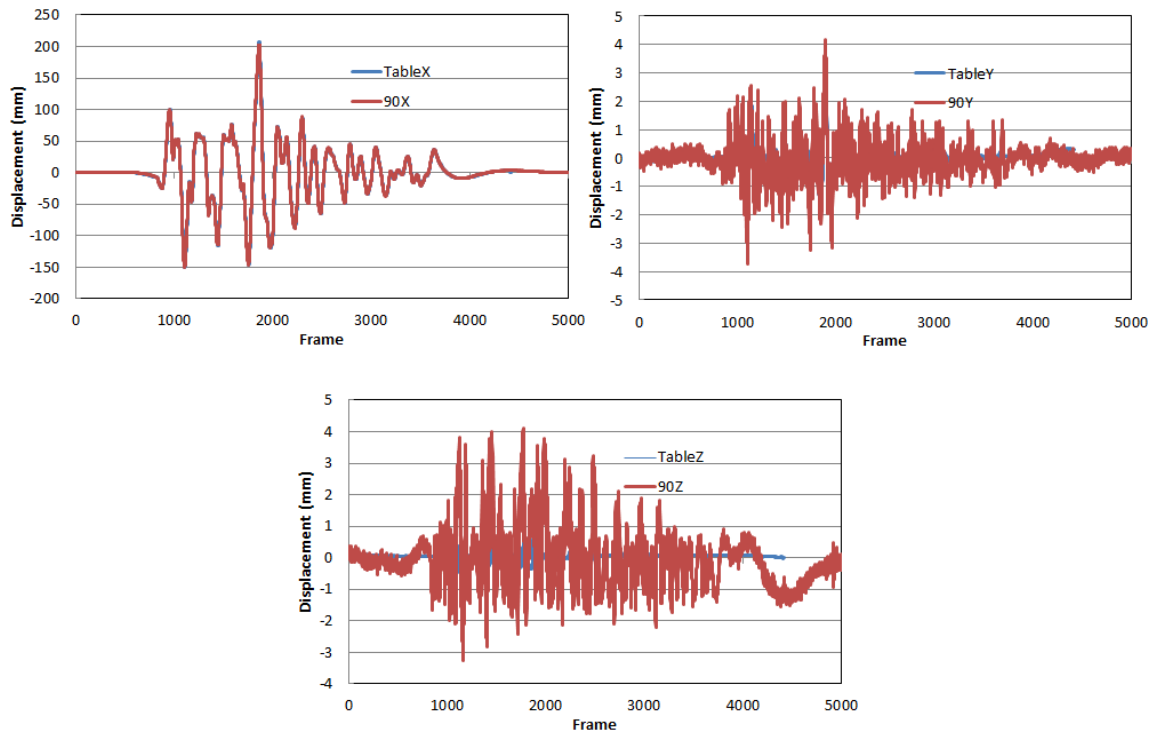


図 8.6.8 A棟BSL100%短辺負荷実験の振動台変位

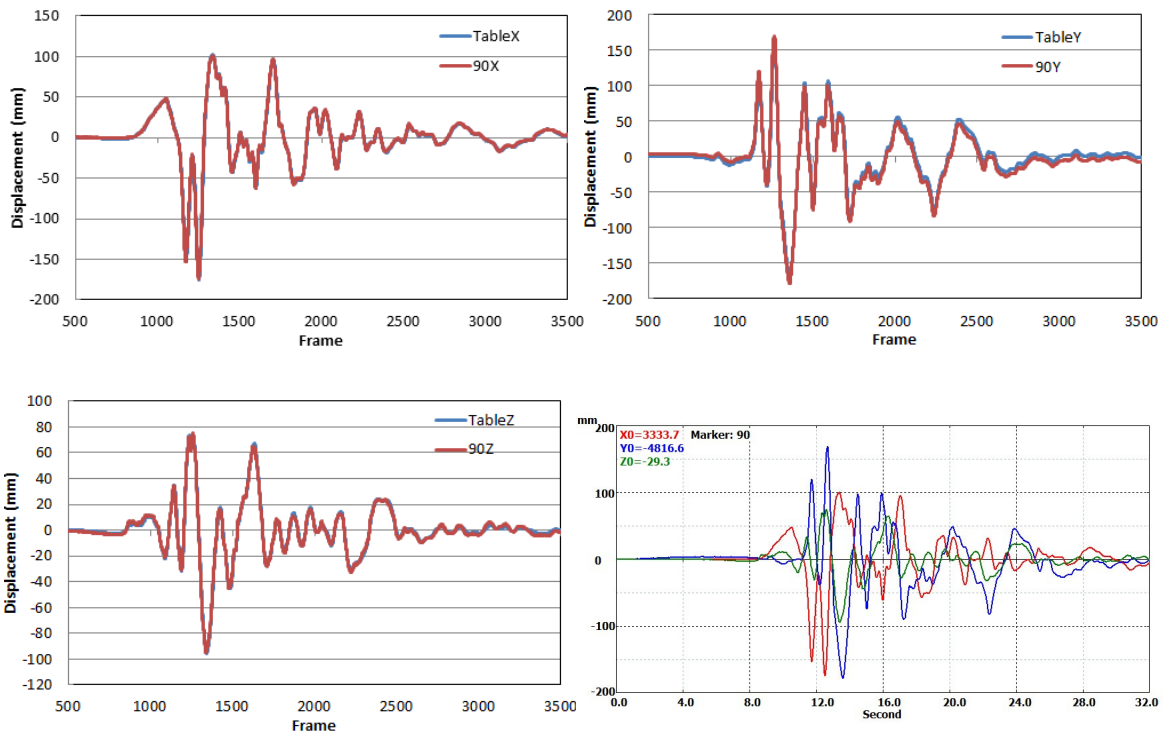


図 8.6.9 A棟 JMA 神戸 100%実験の振動台変位

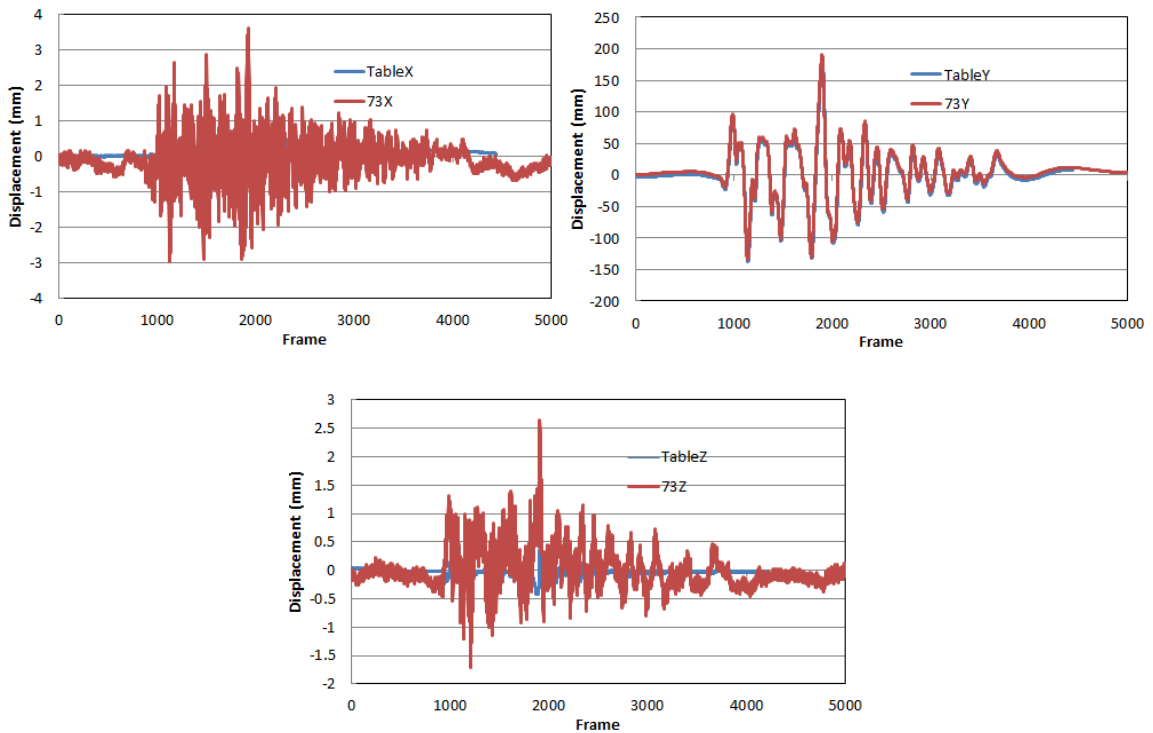


図 8.6.10 B棟 BSL 90%短辺負荷実験の振動台変位

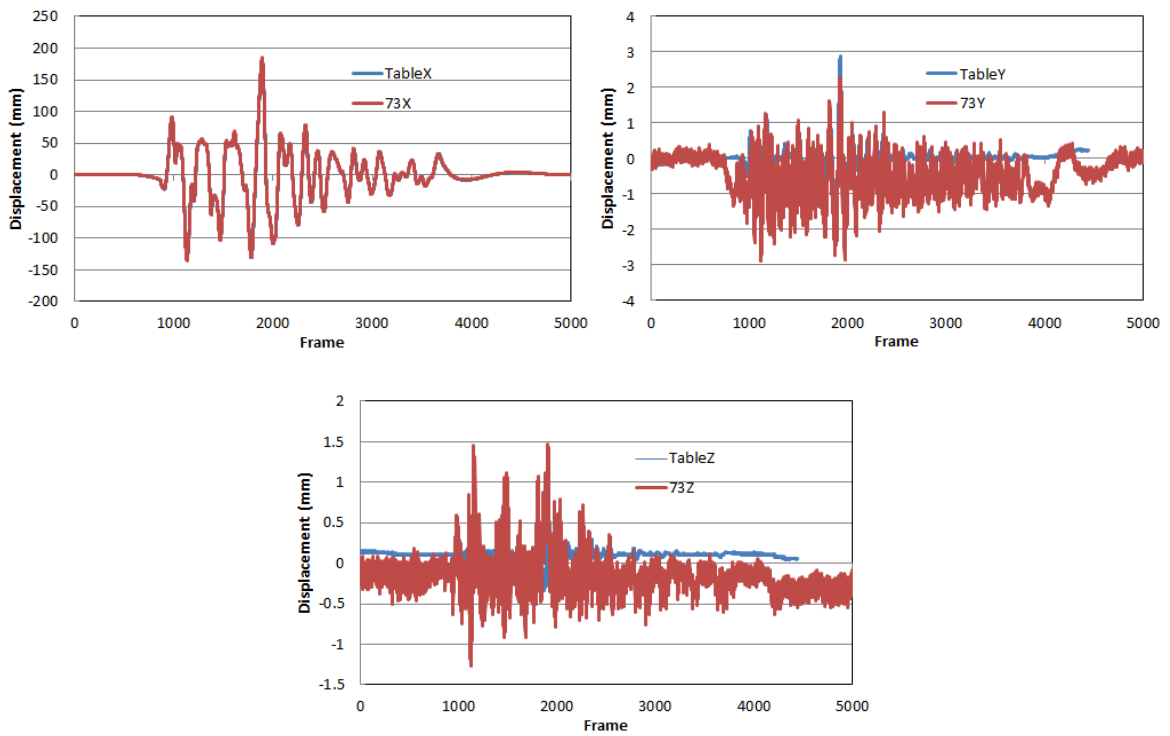


図 8.6.11 B棟BSL 9 0%長辺負荷実験の振動台変位

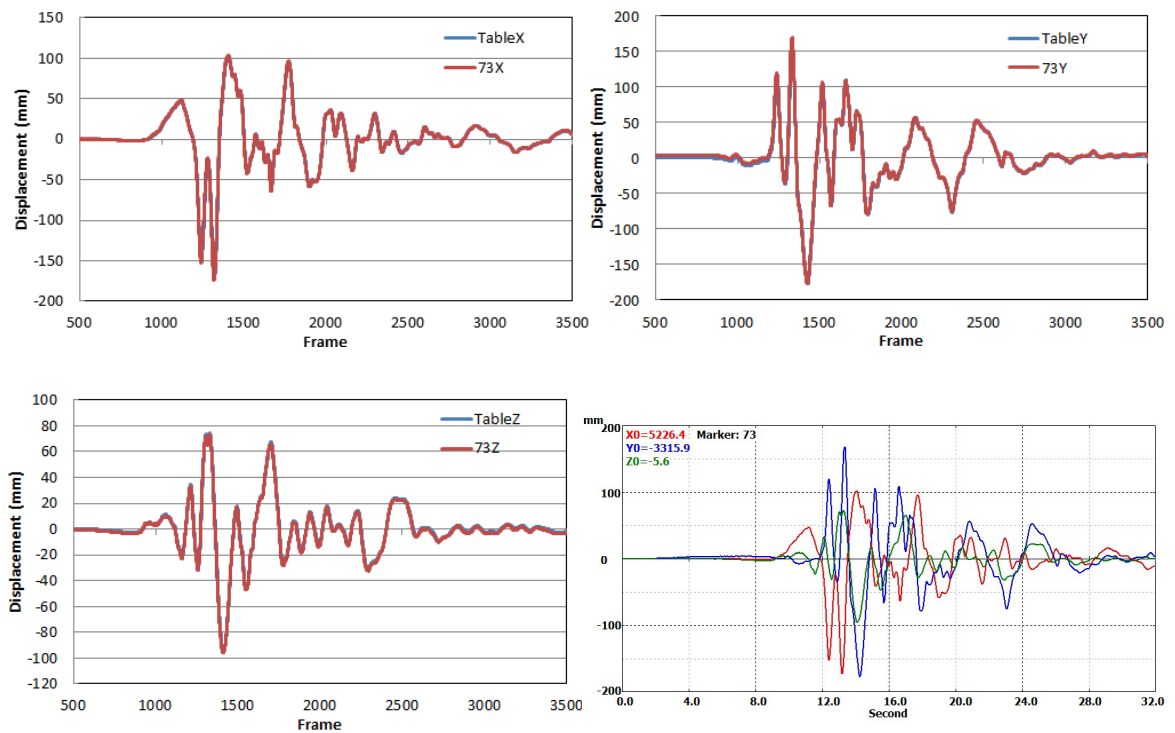


図 8.6.12 B棟JMA 神戸 1 0 0%実験の振動台変位

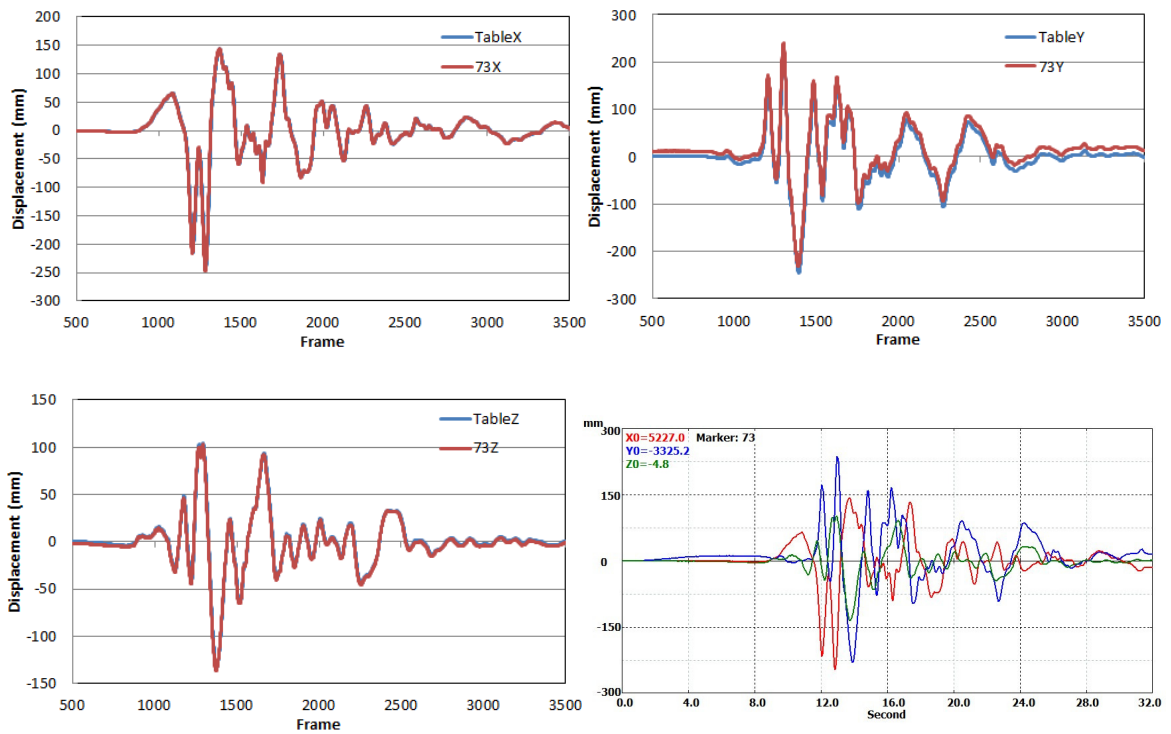


図 8.6.13 B 棟 JMA 神戸 1 4 0 % 実験の振動台変位

変位計測結果(JMA 神戸波の全体的応答)

図 8.6.14, 図 8.6.15, 図 8.6.16 に、A 棟の JMA 神戸 100%, B 棟の JMA 神戸 100% および JMA 神戸 140% の上部の最大および最小変位状態の変形状態を 3D 表示したものを示す。変位は 20 番拡大して表示している。

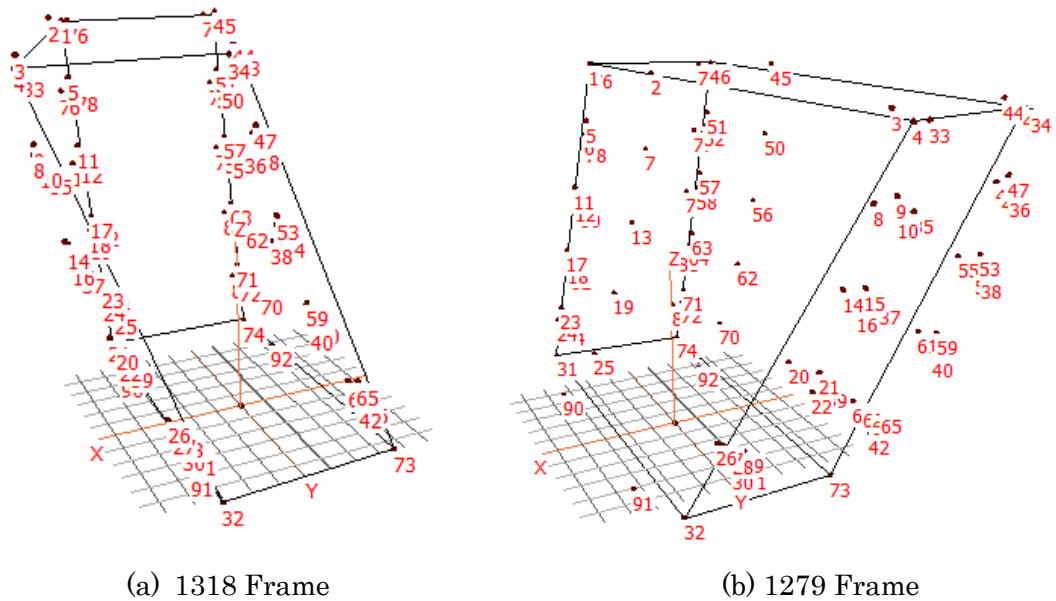


図 8.6.14 A 棟 JMA 神戸 100% 波の応答 : 5 階天井の短辺方向変位最大および最小時の形状

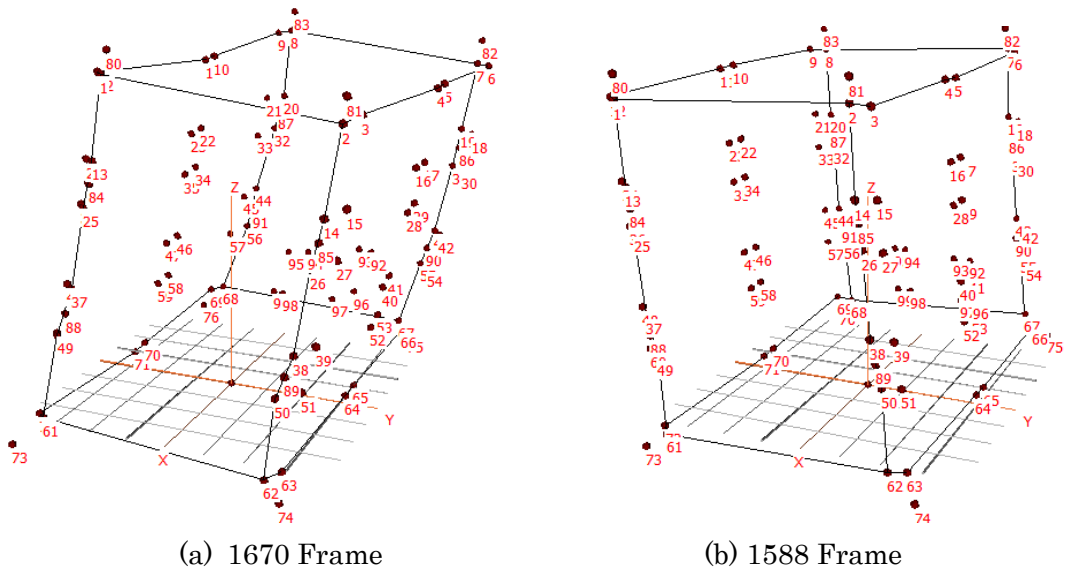


図 8.6.15 B 棟 JMA 神戸 100%波の応答：3 階天井の短辺方向変位最大および最小時の形状

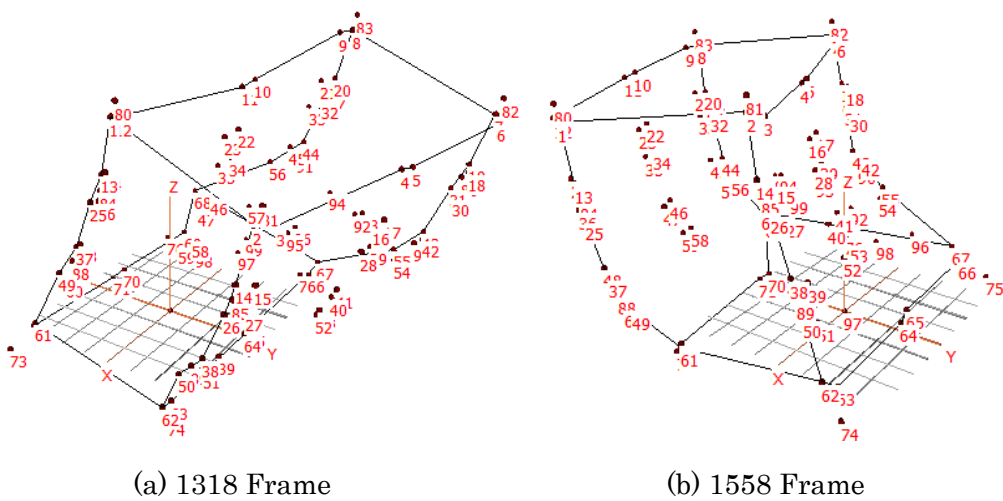


図 8.6.16 B 棟 JMA 神戸 140%波の応答：3 階天井の短辺方向変位最大および最小時の形状

変位計測結果(せん断変形)

大地震想定以上の BSL100%と JMA 神戸波について、1 階のせん断変形を示す。短辺側のせん断変形が大きく出ること、1 階の入り口辺の変形が大きくなることから、A 棟については、24 番マーカーの 31 番マーカーからの相対変位と 30 番マーカーの 32 番マーカーからの相対変位を求めた。マーカー間距離は約 1980mm である。B 棟については、50 番マーカーの 62 番マーカーからの相対変位と 55 番マーカーの 67 番マーカーからの相対変位を求めた。マーカー間距離は約 1775mm である。図 8.6.17 にそれぞれの評価位置を示す。結果は図 8.6.18～8.6.26 に示す。ここで、赤色線が X 軸方向変位、青線が Y 軸方向変位、緑色線が Z 軸方向変位を示している。

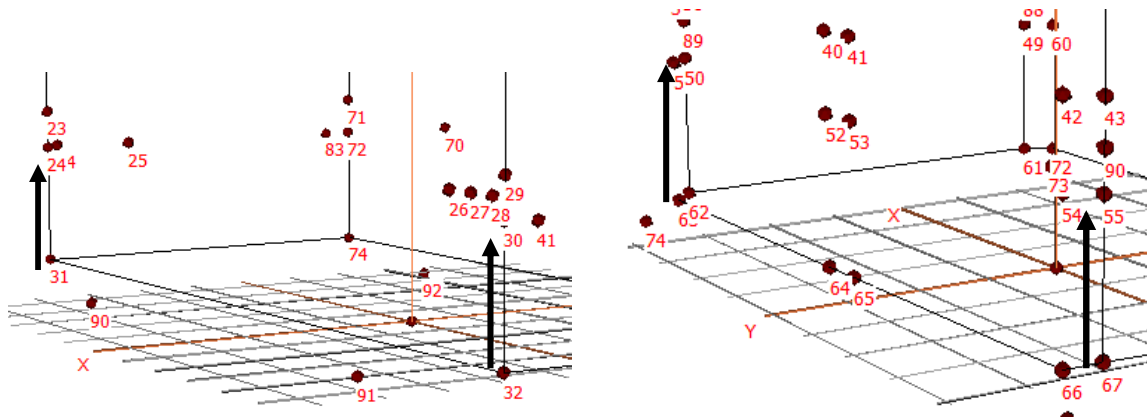


図 8.6.17 A 棟と B 棟の 1 階せん断変形評価位置

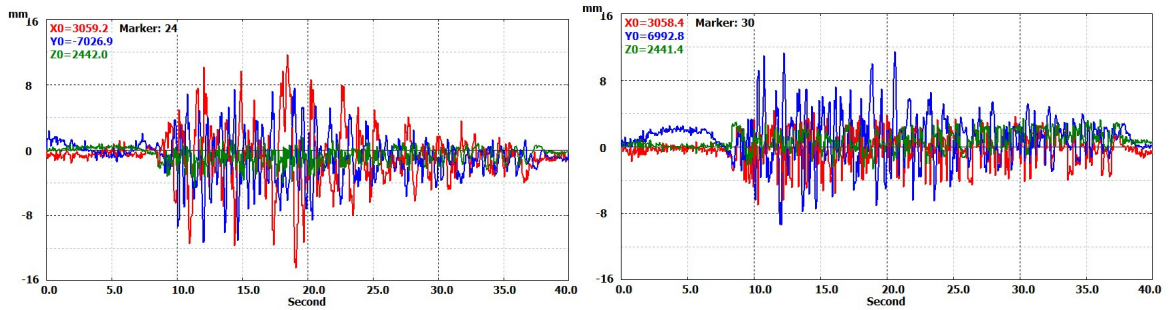


図 8.6.18 A 棟 BSL100%長辺方向振動実験時の 1 階せん断変形
(右図は 24 番 - 31 番の相対変位を、左図は 30 番 - 30 番の相対変位を示している)

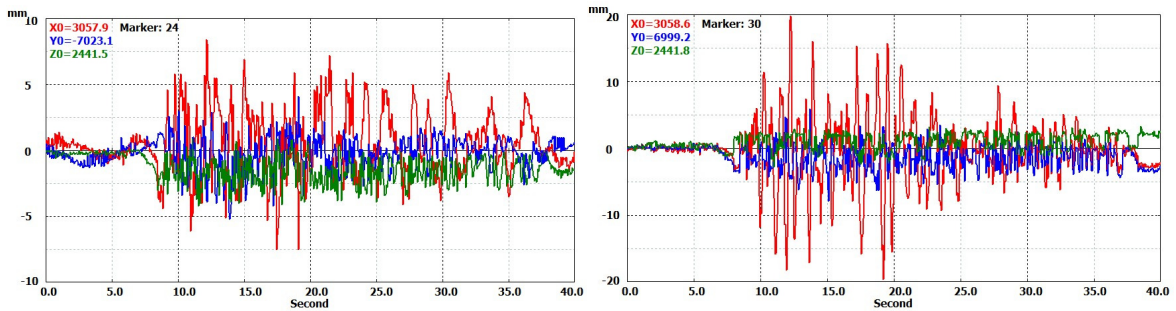


図 8.6.19 A 棟 BSL100%短辺方向振動実験時の 1 階せん断変形

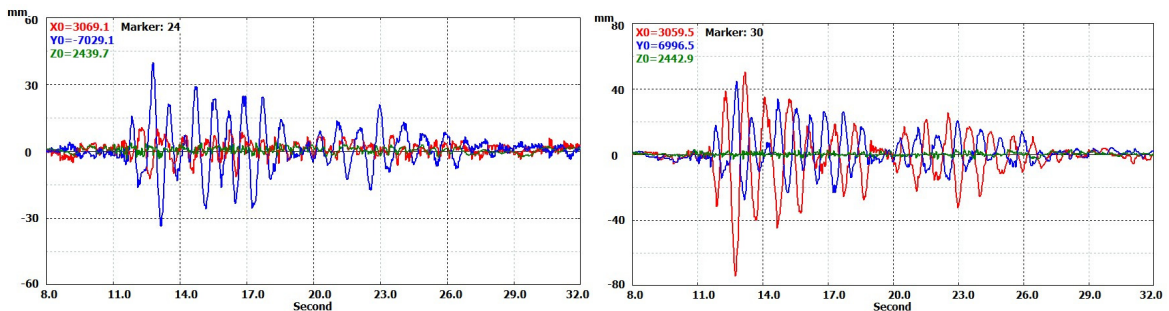


図 8.6.20 A 棟 JMA 神戸 100%振動実験時の 1 階せん断変形

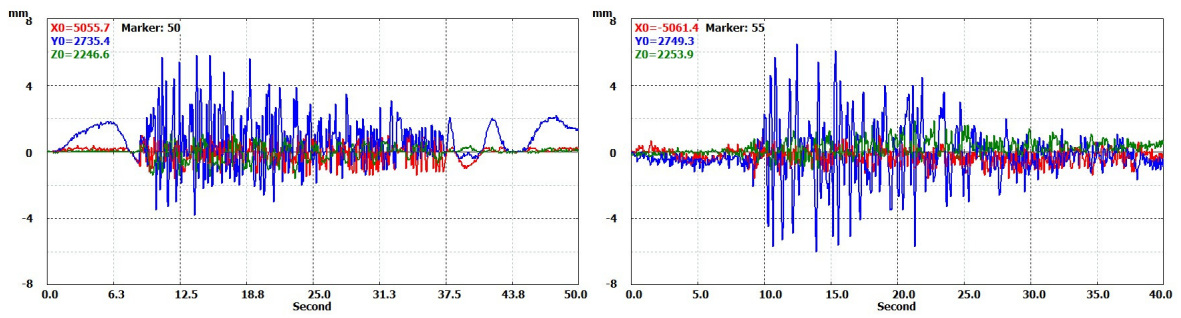


図 8.6.21 B 棟 BSL90 短辺方向振動実験時の 1 階せん断変形
(右図は 50 番 - 62 番の相対変位を、左図は 55 番 - 67 番の相対変位を示している)

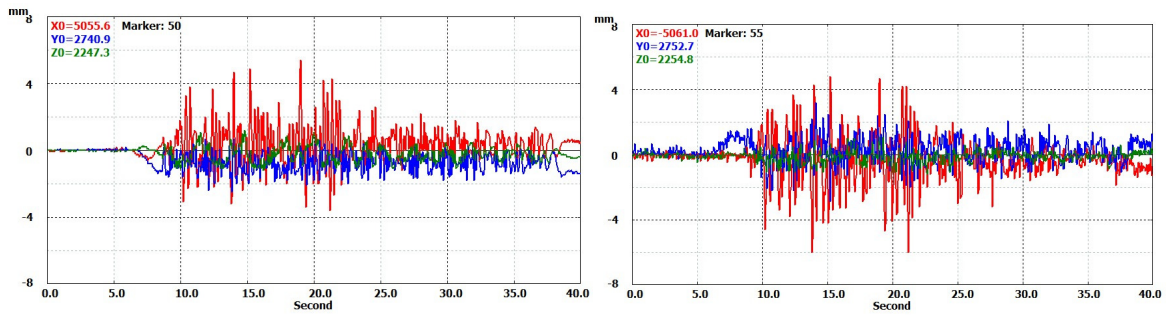


図 8.6.22 B 棟 BSL90 長辺方向振動実験時の 1 階せん断変形

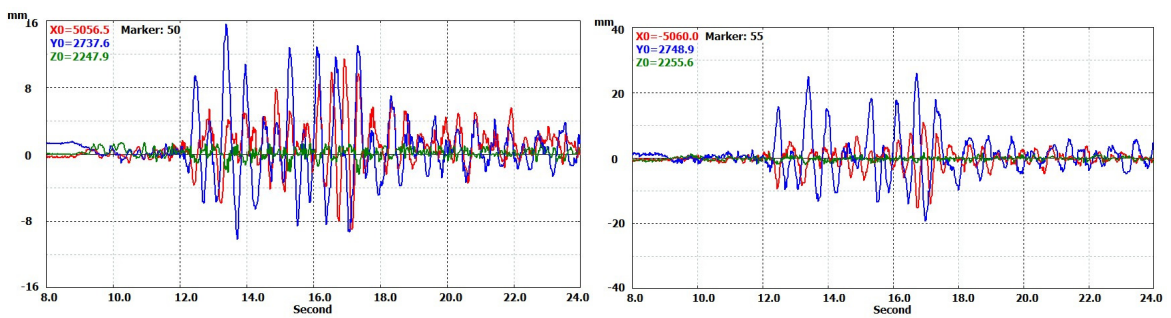


図 8.6.23 B 棟 JMA 神戸 100%振動実験時の 1 階せん断変形

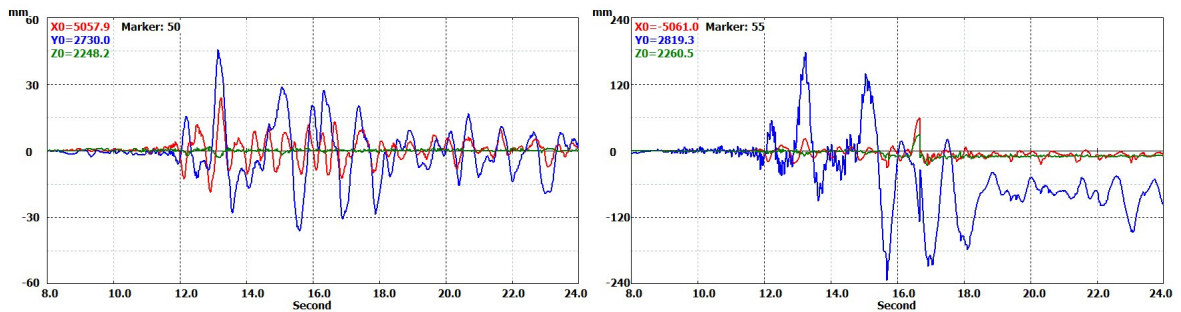


図 8.6.24 B 棟 JMA 神戸 140%振動実験時の 1 階せん断変形

変位計測結果(床・天井材の変位)

1階上部と2階床材のせん断変形をBSL100%とJMA神戸波について示す。相対変位を求める位置は、図8.6.25、図8.6.26に示す。A棟については図8.6.25に示すように30番から見た27番マーカの変位と66番から見た68番マーカの変位を求めた。B棟については、図8.6.26に示すように49番から見た88番マーカの変位と55番から見た90番マーカの変位を求めた。A棟の結果を図8.6.27、8.6.28に、B棟の結果を図8.6.29、8.6.30、8.6.31に示す。

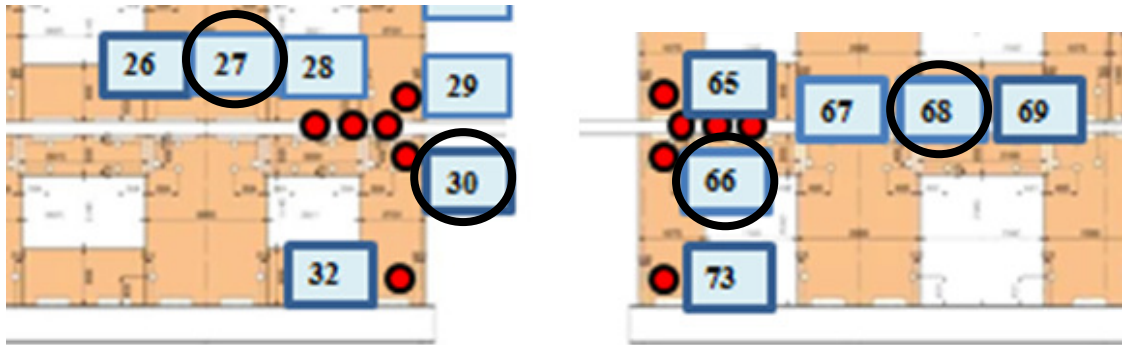


図 8.6.25 A棟の2階床の相対変位計算位置

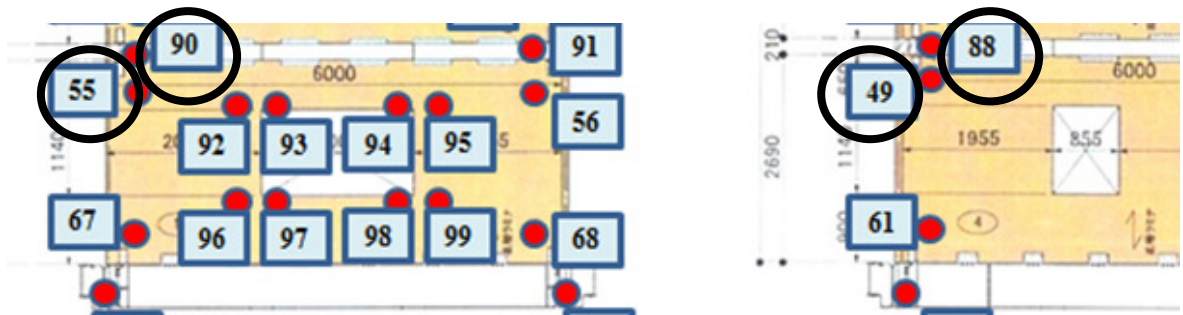


図 8.6.26 B棟の2階床の相対変位計算位置

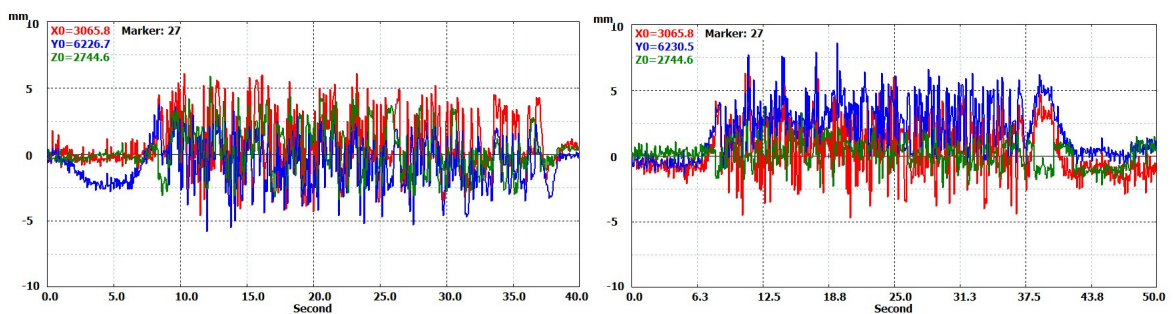


図 8.6.27 BSL100%短辺方向負荷(左図)とBSL100%長辺方向負荷時(右図)の27番マーカの相対変位

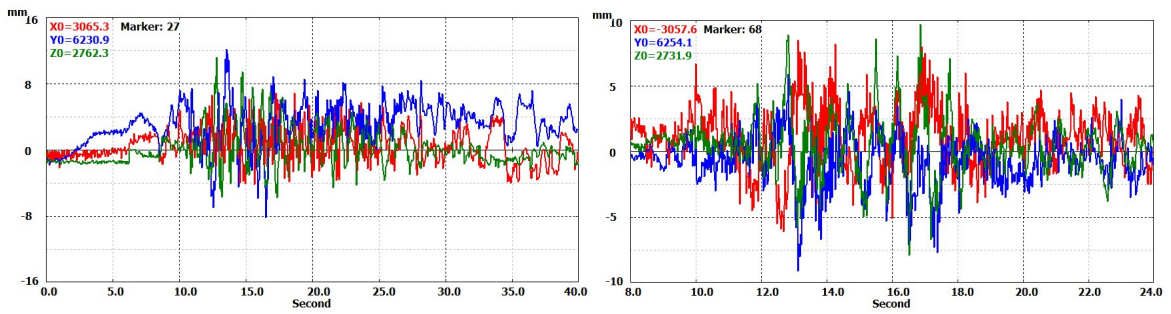


図 8.6.28 JMA 神戸 100%負荷時の 27 番マーカーと 68 番マーカーの相対変位
(68 番マーカーの変位に Z 方向成分が大きく見られる)

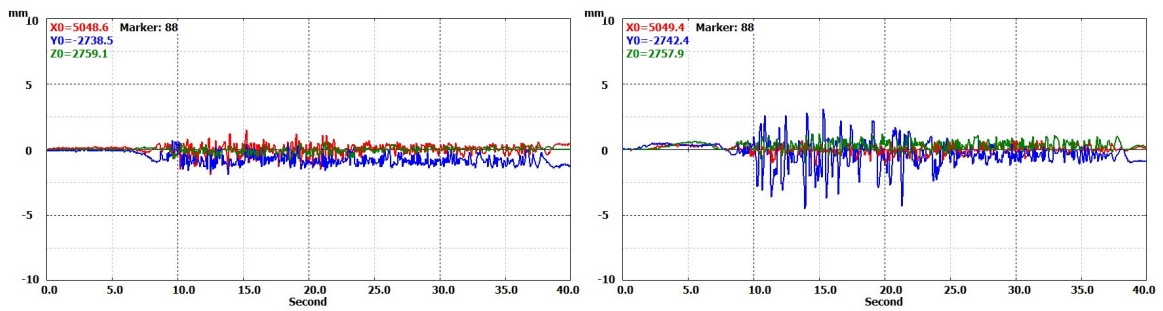


図 8.6.29 BSL90%長辺方向負荷(左図)と BSL100%短辺方向負荷時(右図)の 88 番マーカーの
相対変位

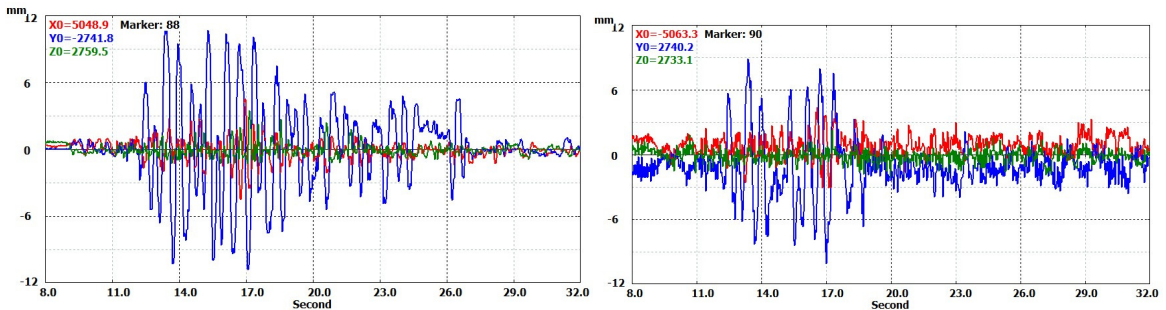


図 8.6.30 JMA 神戸 100%負荷時の 88 番マーカーと 90 番マーカーの相対変位

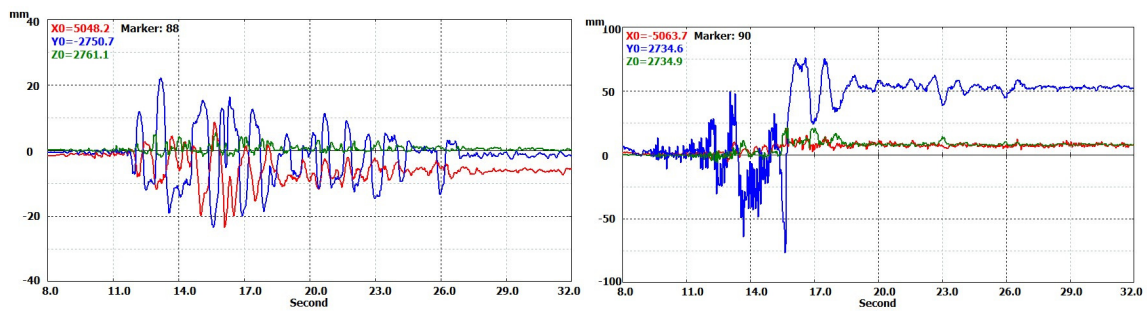
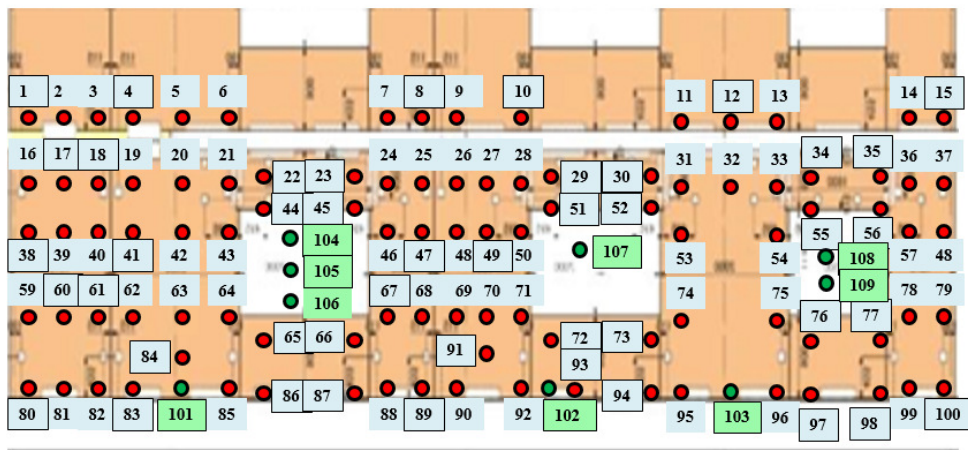


図 8.6.31 JMA 神戸 140%負荷時の 88 番マーカーと 90 番マーカーの相対変位

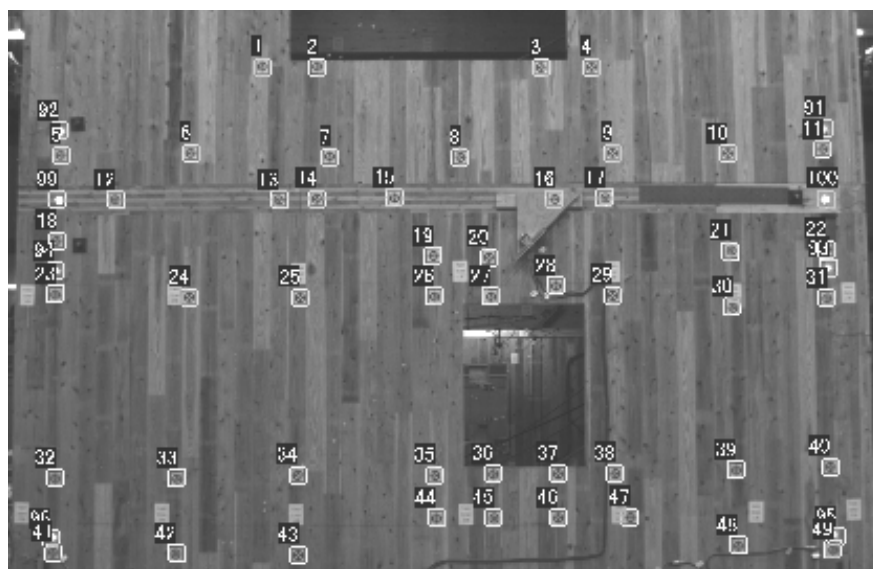
8.6.3 紙マーカースの画像計測結果

今回の計測ではLED マーカーに加えて紙製のマーカーを用いた3次元計測を行った。測定点はA棟が制御室側の面の100点、B棟が同じく制御室側の面の49点である。計測には2台の高精細高速度カメラを2台用いた。追跡したマーカーの形状には2重の円形形状のものを使用した。A棟には外径80mm、B棟には外径60mmのものを印刷し貼った。A棟とB棟の測定点を図8.6.32に示す。A棟の101~109番マーカーは壁面以外に設置したマーカーである。

パターン（テクスチャ）の追跡は、静的実験では有効であるが、画像がぶれるため動的試験では困難と考えられている。特に照明の条件が悪くシャッタースピードを上げられない条件では不可能と考えられている。今回、マーカーのサイズや追跡プログラムコードの改良を行い、ほぼ満足できる結果が得られた。



(a) A棟のマーカー設置位置



(b) B棟のマーカー設置位置

図8.6.32 紙製マーカーの測定点

A棟の計測では1台のカメラ画像から3次元座標を求める擬似3次元計測を行っている。この場合、X方向変位をLEDマーカーの4点の計測結果を利用した。このため、A棟の結果はX,Z座標が計測された情報である。B棟の計測では、2台のカメラで同じ面を観測しており、通常の三角測量の原理で3次元計測を行った。このため、X,Y,Z座標が計測された情報である。図8.6.33にA棟のJMA神戸波100%時の計測結果を3次元表示で示す。1面の計測のため、図のように壁状に表示されている。図8.6.32(a)は変形前の測定点の位置関係を示している。図(b),(c)はそれぞれ、図8.6.14(a),(b)に示した同時刻の振動台相対変位の変形状態を示している。変位は20倍拡大表示されている。図8.6.34にはB棟の同様の結果を示す。図(b),(c)は図8.6.15(a),(b)と同時刻の変形状態を示したものである。この速度になると一部のマーカーは追跡できず、マーカーから外れた位置を追跡するものがあつた。

紙マーカーの計測結果は、「DIC解析結果」フォルダに、日時の示すフォルダを作成し、その中にLEDマーカーの結果を同様のファイル名で格納している。

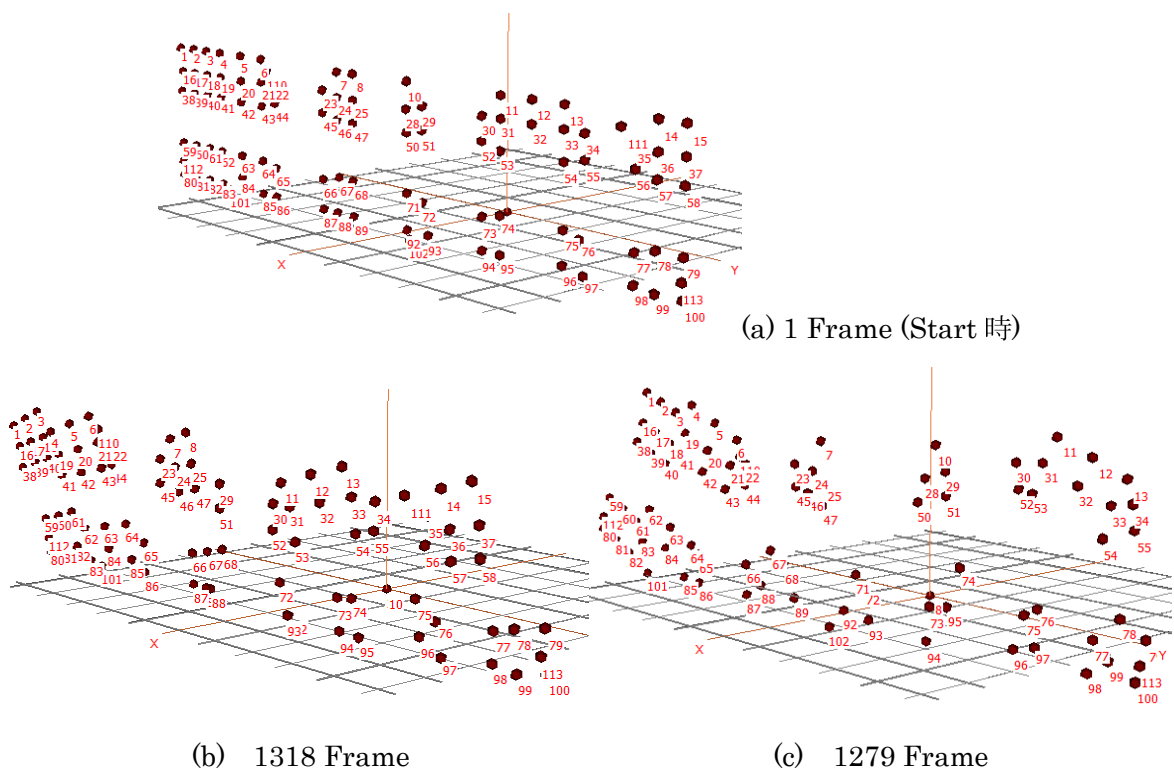


図8.6.33 A棟 JMA神戸波100%波の応答：5階天井の短辺方向変位最大および最小時の形状

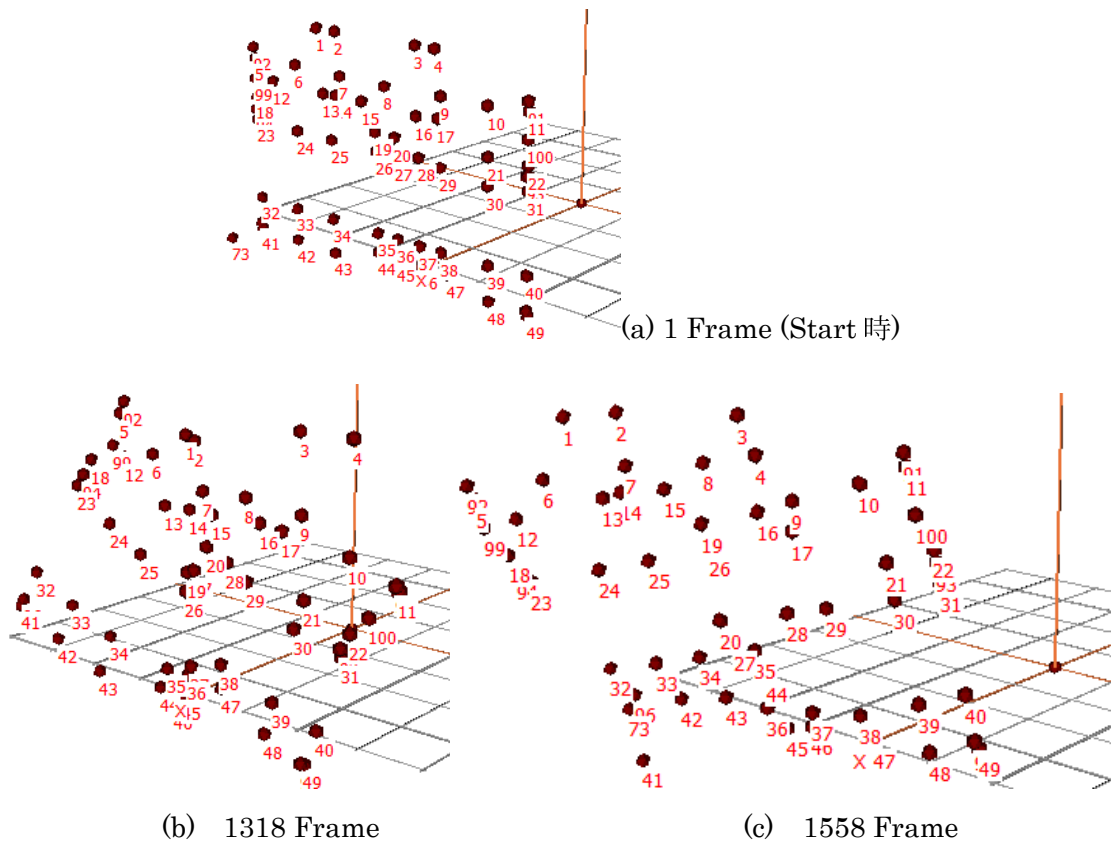


図 8.6.34 B 棟 JMA 神戸 140%波の応答：3 階天井の短辺方向変位最大および最小時の形状

8.6.4 使用機材

画像変位計測に用いた主要な機材は高速度カメラ 8 台である。それ以外にはマーカー座標を計測するための 3 次元測器（ノンプリズムタイプトータルステーション）などがある。表 8.6.5 に計測に使用した機材を示す。

表 8.6.5 使用機材

No.	品 名 ・ 仕 様	個数	備 考
1	高速高解像度デジタルカメラ(HAS-500) + 10m ケーブル 1024×992,8bits, 100~500fps	8 台	
2	画像入力・メモリボード (8GB 搭載) Full Configuration Camera-Link 仕様 外部同期入力, 8GB 画像メモリ	8 個	
3	高速高解像度デジタルカメラ(HAS-L2) + 5m ケーブル 1920×1080,8bits, 100fps	2 台	コンピュータ 2 セット
4	カメラレンズ (4 種[35mm,25mm,16mm, 12.5mm]6 セット)	24 個	
5	計測用コンピュータ, 19 インチ液晶ディスプレイ Core i5, 3.0GHz CPU, WindowsXP 2GB メモリ, 2000GB-HDD, 1000BaseT, DVD-RW/CD-RW	4 台	
6	制御用ノートコンピュータ Core i7, 4GB, 500GB-HDD, 1000BaseT, DVD-RW	1 台	
7	外付けハードディスク (1000GB)	2 台	データバックア ップ用
8	LED 発光マーカー	160 個	10 個予備
9	マーカー取付け治具	80 個	
10	カメラ同期スタータースイッチボックス	1 台	
11	ネットワーク機材, スイッチングハブ, Net ケーブル	一式	
12	カメラ三脚(GITZO-G1504 他) + 雲台	8 脚	
13	ノンプリズム 3 次元測器(ソキア製 JIS-2A 級 3 次元測量 器 SET330RS,三脚,反射シート)	1 式	
14	ソフトウェア一式 高速高解像度画像入力基本ソフトウェア キャプチャー・画像保存ソフトウェア カメラパラメータ設定ソフトウェア カメラコントロールソフトウェア 高精度三次元座標計算・画像処理ソフトウェア 3次元表示ソフトウェア	1 式	

消耗品：単三アルカリ電池 100 個, 接着剤, 配線類, はんだ, ゴムシート, ねじ類他

工具類：配線用工具, ドライバー, レンチ類