

4. 2 柱脚部動摩擦実験

4. 2. 1 脚部モデルの加振実験

(1) 目的

石場建て構法木造建築物の耐震設計を考えるに当たって、柱脚の滑りや浮き上がりといった、地震時挙動を振動台実験によって把握しておく必要がある。本実験は、礎石と柱底面の滑り摩擦係数を明らかにすることを目的として行った。

(2) 試験体の概要

試験体は、平面寸法 1,820×1,820mm の4本柱の木造軸組とし、柱脚部にダボ等は設けずに直接設置した。柱は 120mm 角、胴差しは 120×270mm、柱-胴差し接合部には雇いほぞ接合を用いた。また、出来るだけ剛体的な振動性状となるように、礎石の上面から胴差し天端までを 570mm とし、接合部は構造用合板で補強した。試験体伏せ図および立面図を図 4.2.1-1 に示す。主要材の樹種はスギである。水平構面は構造用合板 24mm 厚を根太にビス止めした。試験体の製作状況と振動台に設置した様子を写真 4.2.1-1、4.2.1-2 に示す。屋根荷重に相当する柱軸力を与えるため、木造軸組の上に鋼製の錘 (4tonf) を設置した。



写真 4. 2. 1-1 試験体の製作状況

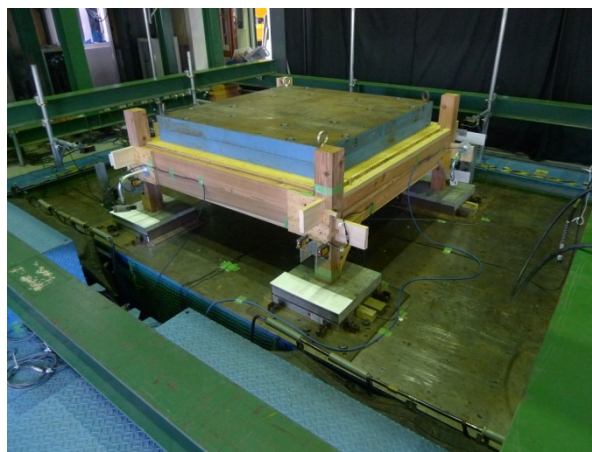


写真 4. 2. 1-2 試験体を振動台に設置した様子

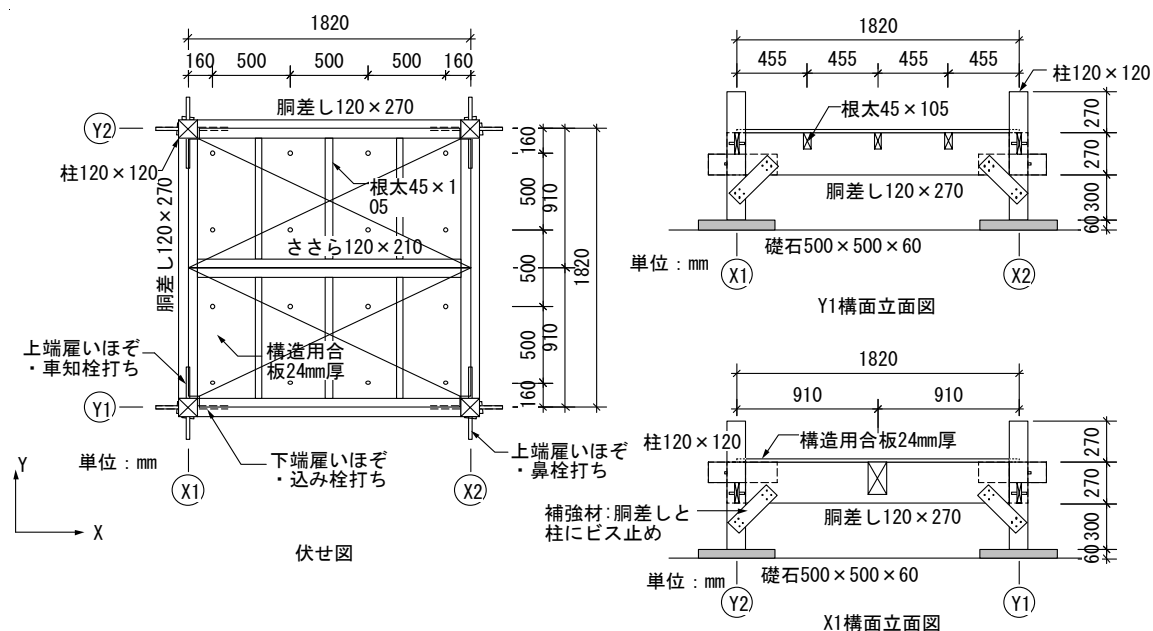


図 4. 2. 1-1 試験体伏せ図及び立面図

礎石のサイズは、500mm 角、厚さ 60mm とし、6 枚びしゃん（細）、3 枚びしゃん（粗）、切り出しま、の礎石（花崗岩）およびコンクリートを用いた。また、低摩擦材料であるテフロンボードも比較の対象として実験した。なお、木造軸組は、礎石の種類ごとに新しいものに交換した。実験途中のそれぞれの礎石の様子を写真 4.2.1-3～4.2.1-7 に示す。



写真 4.2.1-3 礎石・細 (6 枚びしゃん)

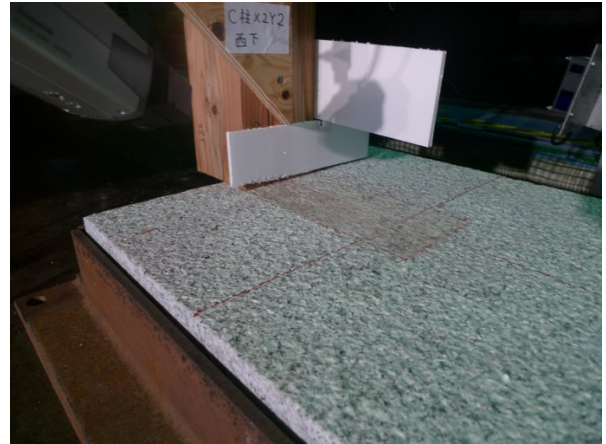


写真 4.2.1-4 礎石・粗 (3 枚びしゃん)



写真 4.2.1-5 礎石・切り出し



写真 4.2.1-6 コンクリート



写真 4.2.1-7 テフロンボード

礎石として用いた各材料を 100mm 角に整形し、表面の粗さをキーエンス製高精度形状測定システム KS-1100 によって計測した。計測データから描画された表面の凹凸の様子を図 4.2.1-2～4.2.1-7 に示す。比較として、柱底面の粗さも計測している。

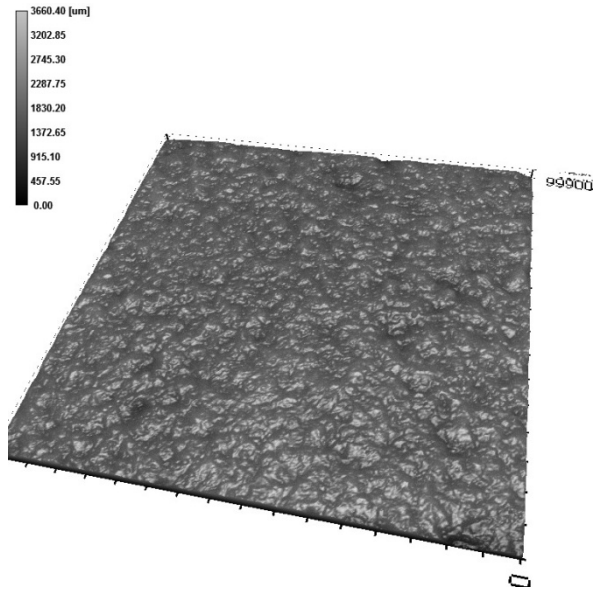


図 4.2.1-2 礎石・細の表面形状

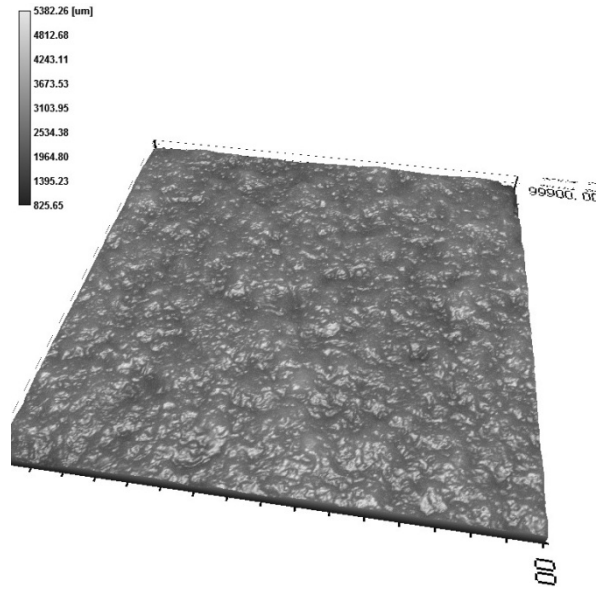


図 4.2.1-3 礎石・粗の表面形状

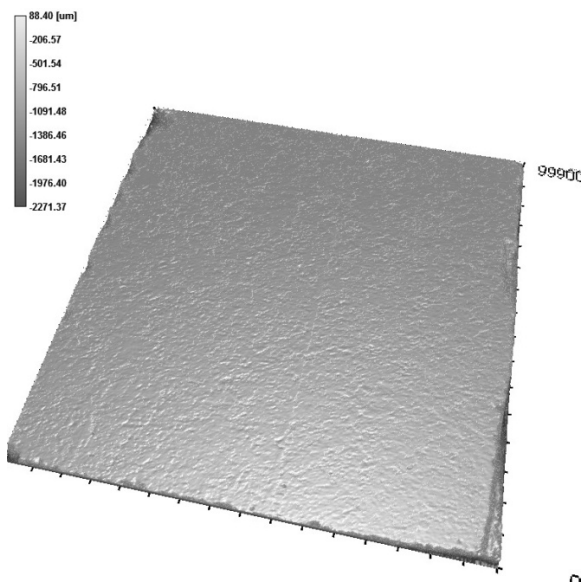


図 4.2.1-4 礎石・切り出しの表面形状

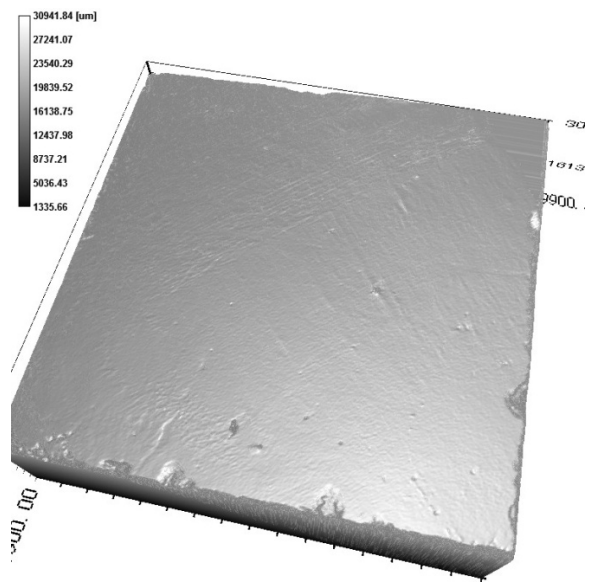


図 4.2.1-5 コンクリートの表面形状

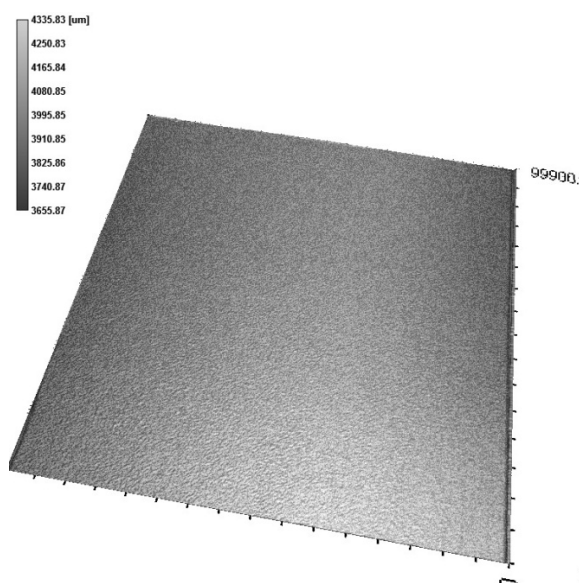


図 4.2.1-6 テフロンボードの表面形状

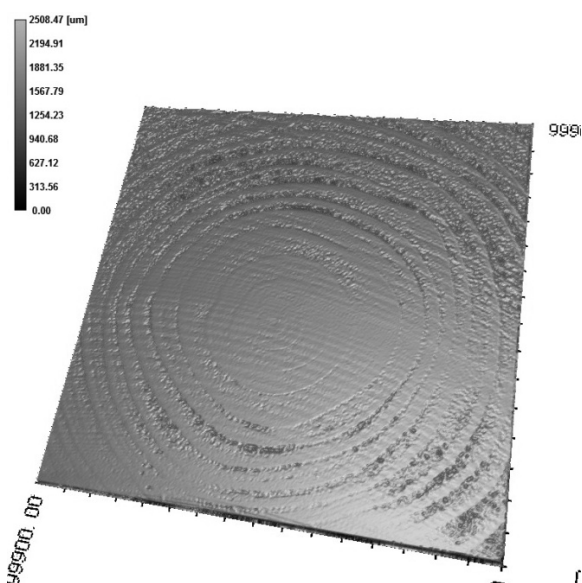
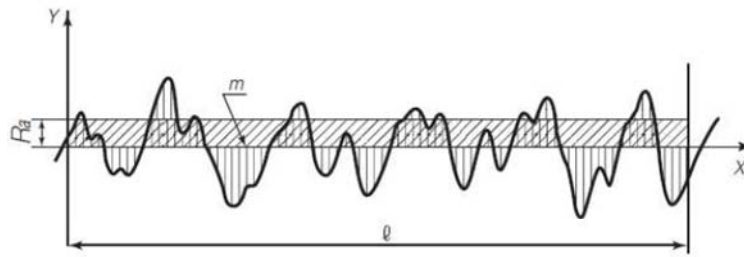


図 4.2.1-7 柱底面の表面形状

計測した 3 次元形状から、25mm 間隔で 3 本の断面曲線（荒さ曲線）を抽出し、表面粗さに関するパラメータを JIS B 0601-1994 に準じて算出した（表 4.2.1-1）。主要なパラメータの模式図と簡単な説明を図 4.2.1-8 に示す。各材料の主要パラメータを比較して図 4.2.1-9～4.2.1-11 に示す。3 枚びしゃんと 6 枚びしゃんを比較すると、凹凸の深さの最大値は同程度であるが、算術平均粗さは 6 枚びしゃんの方が大きいことから、より大きな山と谷が多いことが分かる。一方、切り出しとコンクリートは比較的平滑で形状はよく似ている。

表 4.2.1-1 各礎石表面の粗さ計測結果

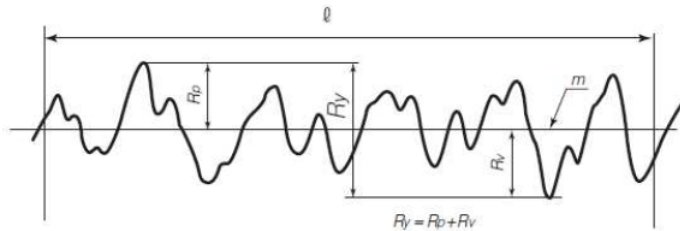
項目	算術平均粗さ	最大高さ	十点平均粗さ	凹凸の 平均間隔	局部山頂の 平均間隔
記号	Ra [μm]	Ry [μm]	Rz [μm]	Sm [μm]	S [μm]
柱小口	1.74	47.40	24.90	40.43	32.19
	1.30	16.92	15.53	42.37	32.21
	1.51	16.13	14.67	42.68	32.57
礎石・細	2.39	116.97	66.02	38.59	31.64
	2.65	329.76	152.45	38.50	31.33
	2.47	121.61	70.58	39.15	31.43
礎石・粗	6.74	375.49	237.32	52.66	38.54
	5.32	307.24	171.00	49.50	36.28
	4.43	154.07	97.02	49.00	36.08
礎石・切り出し	1.58	17.56	16.04	42.76	32.35
	1.53	19.90	16.23	44.27	32.60
	1.51	16.97	15.62	42.76	32.69
コンクリート	1.13	15.33	13.62	40.07	30.68
	1.19	15.82	13.54	38.72	30.26
	1.13	16.55	14.43	39.01	30.25
テフロンボード	5.65	64.59	55.77	52.04	38.97
	5.81	69.69	62.15	52.75	38.99
	5.91	69.70	60.62	51.45	38.70



算術平均粗さ R_a [μm]

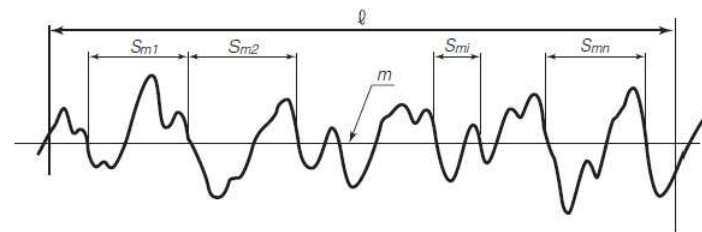
粗さ曲線の平均線の方法を x 、直交する方向を y とし、粗さ曲線を $y=f(x)$ で表したときに次式で表される値

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |f(x)| dx$$



最大高さ R_y [μm]

粗さ曲線の山頂線と谷底線の間隔を平均線に直交する方向に測定した値



凹凸の平均間隔 S_m [μm]

粗さ曲線の一つの山及びそれに隣り合う一つの谷に対応する平均線の長さの平均値

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_{mi}$$

図 4. 2. 1-8 表面粗さに関するパラメータの模式図と説明

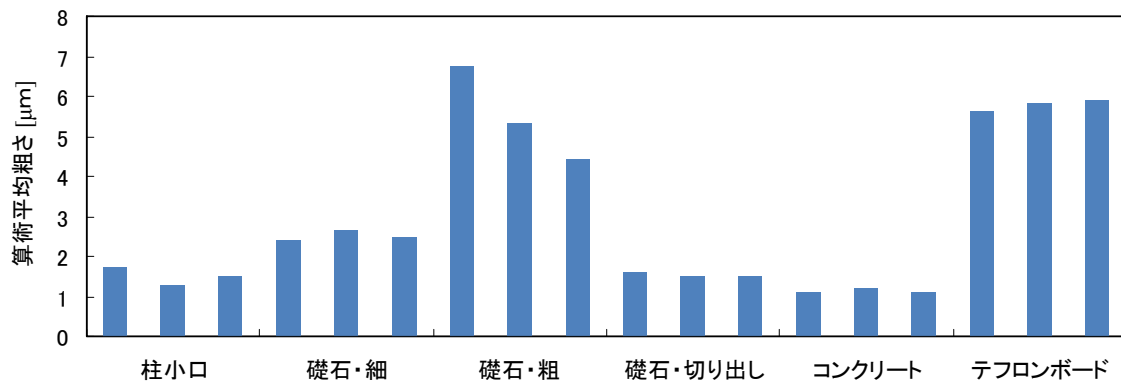


図 4. 2. 1-9 各礎石表面の算術平均粗さ

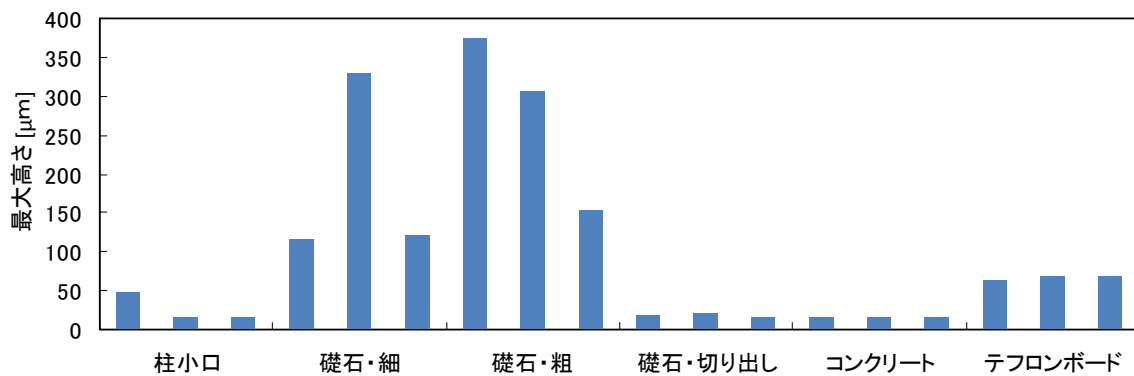


図 4. 2. 1-10 各礎石表面の最大高さ

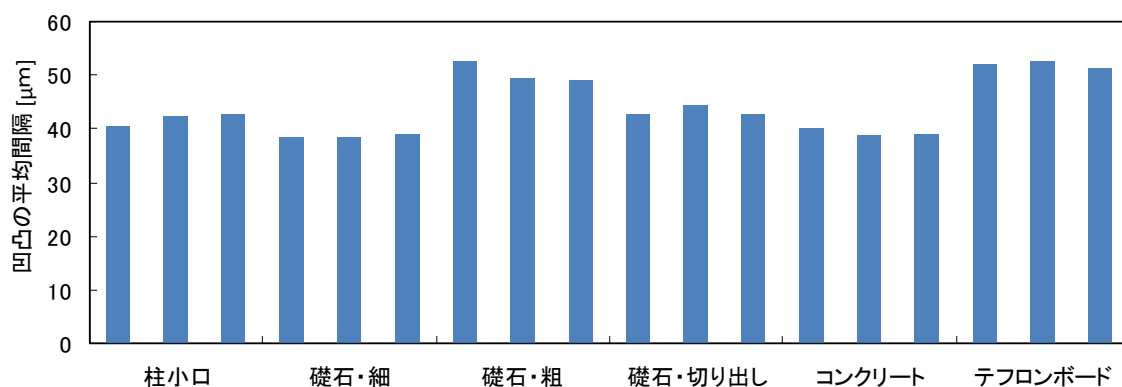


図 4. 2. 1-11 各礎石表面の凹凸の平均間隔

(3) 実験計画

1) 計測計画

計測器の配置を図 4.2.1-12～4.2.15 に示す。加振方向を X 方向とし、それに直行する方向を Y 方向とした。加速度計には、共和電業製の小型半導体加速度変換器 ASP-2GA と ASP-5GA を用い、変位計には、KEYENCE 製の CCD レーザー変位センサ LK-500、可視光レーザー変位センサ LB-300 を用いた。柱軸力は、礎石の下に共和電業製のロードセル LCD-S-75KNS4 を設置することにより計測した。写真 4.2.1-8～4.2.1-11 に柱脚部における計測器の設置状況を示す。サンプリング周波数は 1,000Hz とした。

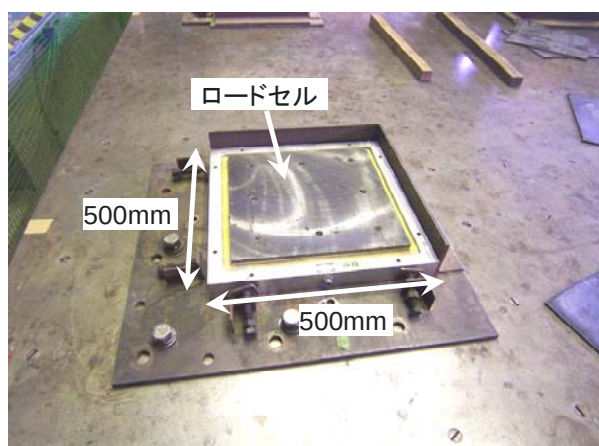


写真 4. 2. 1-8 柱軸力計測用ロードセル

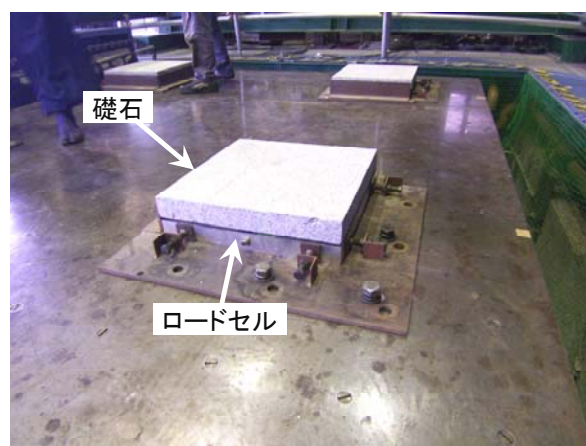


写真 4. 2. 1-9 礎石とロードセルの設置状況

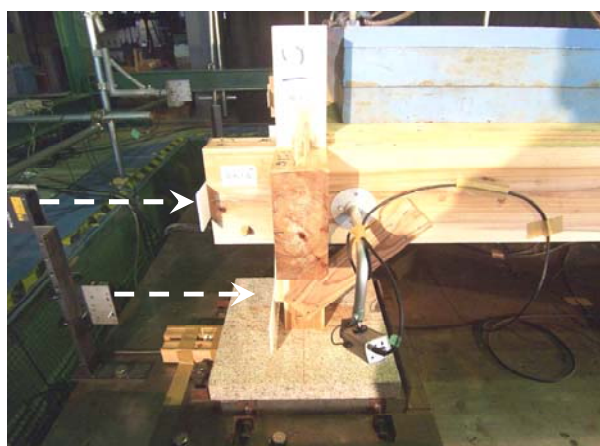


写真 4. 2. 1-10 水平方向のレーザー変位計



写真 4. 2. 1-11 鉛直方向のレーザー変位計

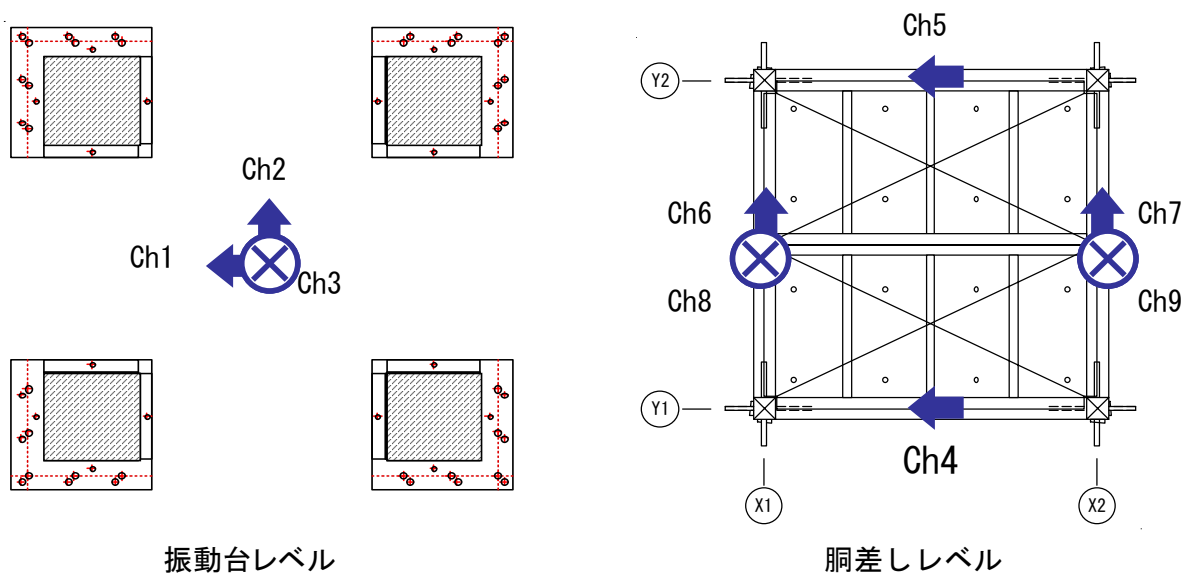


図 4.2.1-12 加速度計設置箇所

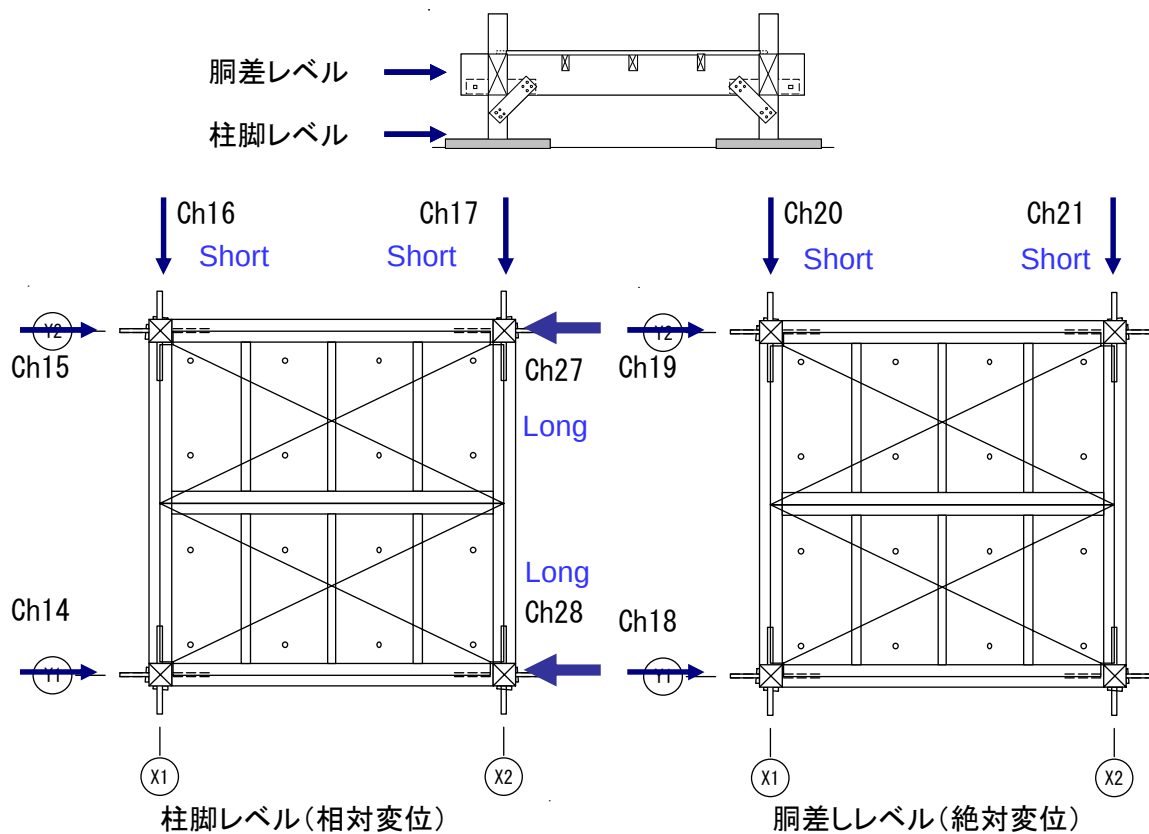


図 4.2.1-13 レーザー変位計設置箇所 (水平変位)

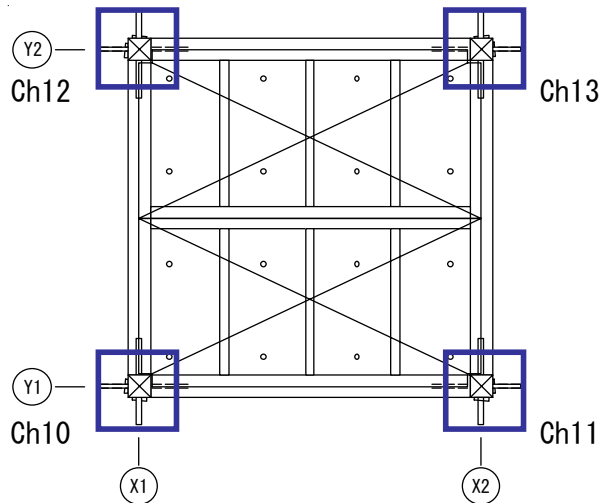


図 4. 2. 1-14 ロードセル設置箇所

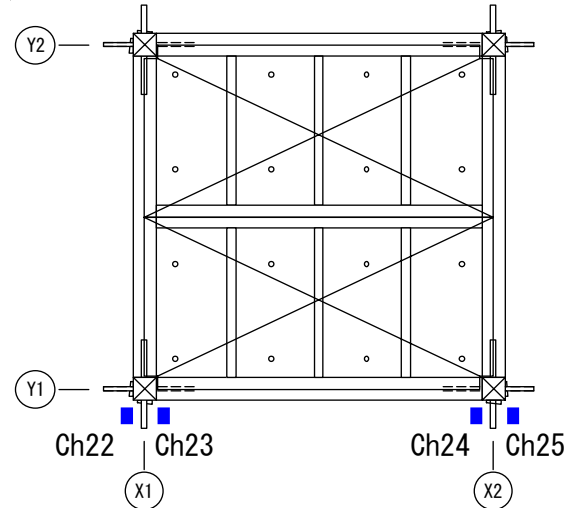


図 4. 2. 1-15 レーザー変位計設置箇所（鉛直変位）

表 4. 2. 1-2 計測チャンネル一覧

ch	名称	ケーブル	型番	計測器の種類	計測種類	計測箇所	計測構面	計測方向
1	AXG00			加速度計 (2G)	振動台の水平加速度	振動台上	中央	X方向
2	AYG00			加速度計 (2G)	振動台の水平加速度	振動台上	中央	Y方向
3	AZG00			加速度計 (2G)	振動台の鉛直加速度	振動台上	中央	Z方向
4	AAX11			加速度計 (5G)	柱頭の水平加速度	桁レベル	Y1	X方向
5	AAX12			加速度計 (5G)	柱頭の水平加速度	桁レベル	Y2	X方向
6	AAY11			加速度計 (5G)	柱頭の水平加速度	桁レベル	X1	Y方向
7	AAY12			加速度計 (5G)	柱頭の水平加速度	桁レベル	X2	Y方向
8	AAZ11			加速度計 (5G)	柱頭の鉛直加速度	桁レベル	X1	Z方向
9	AAZ12			加速度計 (5G)	柱頭の鉛直加速度	桁レベル	X2	Z方向
10	ALZ01			ロードセル	柱のN	柱脚	X1Y1	Z方向
11	ALZ02			ロードセル	柱のN	柱脚	X2Y1	Z方向
12	ALZ03			ロードセル	柱のN	柱脚	X1Y2	Z方向
13	ALZ04			ロードセル	柱のN	柱脚	X2Y2	Z方向
14	ADX01			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱脚レベル北	Y1	X方向
15	ADX02			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱脚レベル南	Y2	X方向
16	ADY01			レーザー変位計 (LB-300)	水平変位	柱脚レベル東	X1	Y方向
17	ADY02			レーザー変位計 (LB-300)	水平変位	柱脚レベル西	X2	Y方向
18	ADX11			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱頭レベル北	Y1	X方向
19	ADX12			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱頭レベル南	Y2	X方向
20	ADY11			レーザー変位計 (LB-300)	水平変位	柱頭レベル東	X1	Y方向
21	ADY12			レーザー変位計 (LB-300)	水平変位	柱頭レベル西	X2	Y方向
22	ADZ01			レーザー変位計 (LB-300)	鉛直変位	柱脚	X1Y1	Z方向
23	ADZ02			レーザー変位計 (LB-300)	鉛直変位	柱脚	X1Y1	Z方向
24	ADZ03			レーザー変位計 (LB-300)	鉛直変位	柱脚	X2Y1	Z方向
25	ADZ04			レーザー変位計 (LB-300)	鉛直変位	柱脚	X2Y1	Z方向
26	ALX00			ロードセル	静的加力用			
27	ADX03			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱脚レベル北	Y1	X方向
28	ADX04			レーザー変位計 (LK-500)	水平変位	柱脚レベル南	Y2	X方向
113	ADX00	-	-	-	振動台の水平変位	振動台レベル	中央	X方向
114	ADY00	-	-	-	振動台の水平変位	振動台レベル	中央	Y方向
115	ADZ00	-	-	-	振動台の鉛直変位	振動台レベル	中央	Z方向
119	AAX00	-	-	-	振動台の水平加速度	振動台レベル	中央	X方向
120	AAY00	-	-	-	振動台の水平加速度	振動台レベル	中央	Y方向
121	AAZ00	-	-	-	振動台の鉛直加速度	振動台レベル	中央	Z方向

2) 加振計画

加振波は、ホワイトノイズ波、正弦波 1Hz、正弦波 2Hz、日本建築センター模擬波（BCJ-L2 波）とし、加振方向は原則として一方向とした。また、礎石の種類が 6 枚びしゃん（細）の場合のみ、上記の入力波に加えて、JMA 神戸波(加振方向を水平方向と鉛直方向の二方向)を入力した。図 4.2.1-16～4.2.1-20 に、加振波の加速度波形を示す。正弦波の立ち上がりは 5 秒とし、その後 15 秒間レベルを一定に保ち、5 秒で収束させた。最大入力加速度を 100cm/s^2 から徐々に大きくしながら繰り返し加振した。滑りによって柱脚が礎石を踏み外す直前で実験を終了した。また、上記の加振前後で振動特性把握のため、ホワイトノイズ波加振を行った。

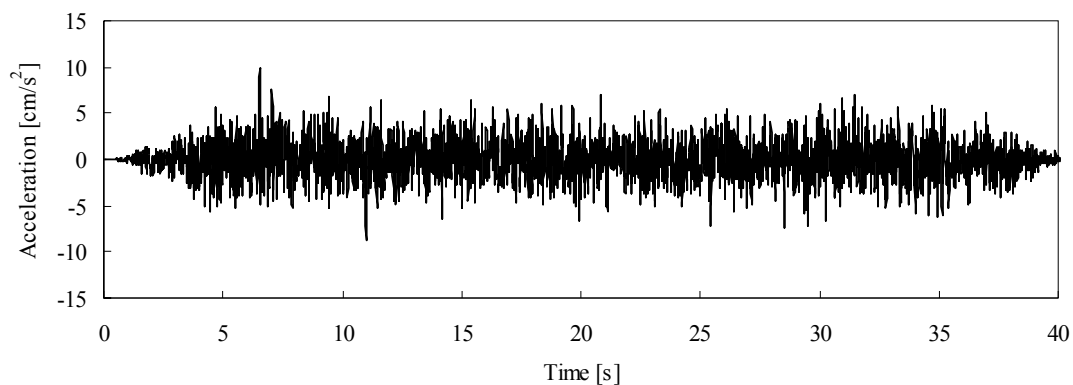


図 4.2.1-16 ホワイトノイズ波

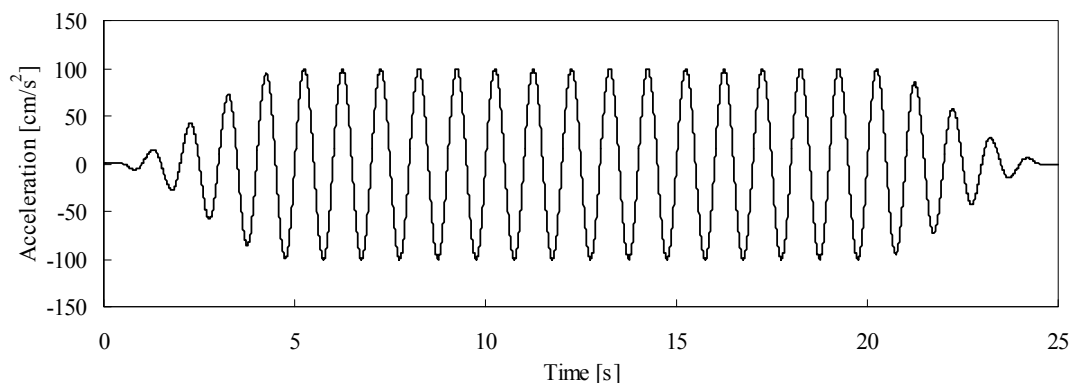


図 4.2.1-17 正弦波 1.0Hz

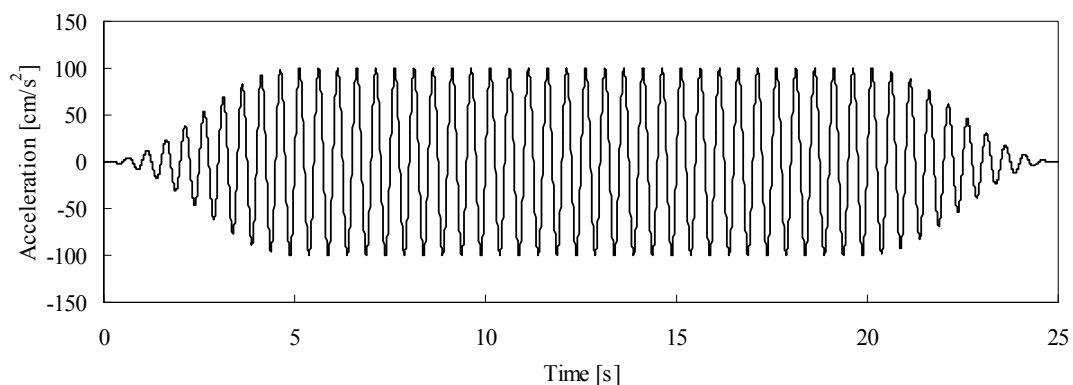


図 4.2.1-18 正弦波 2.0Hz

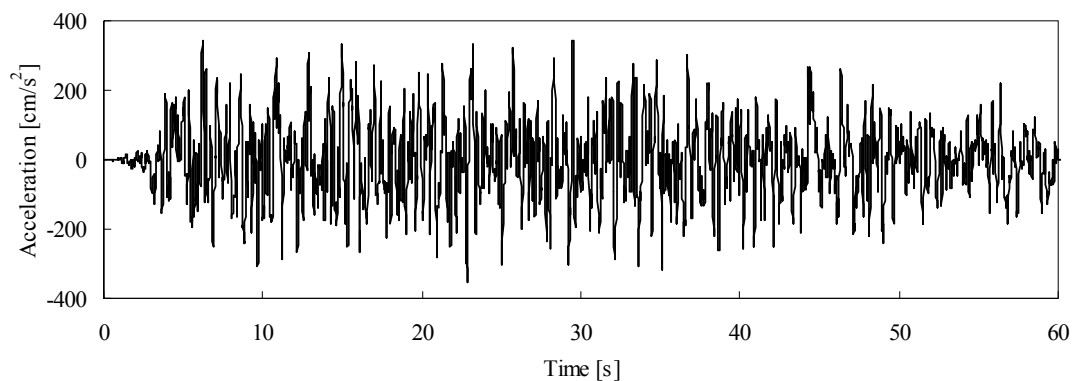


図 4.2.1-19 日本建築センター模擬波 (BCJ-L2 波)

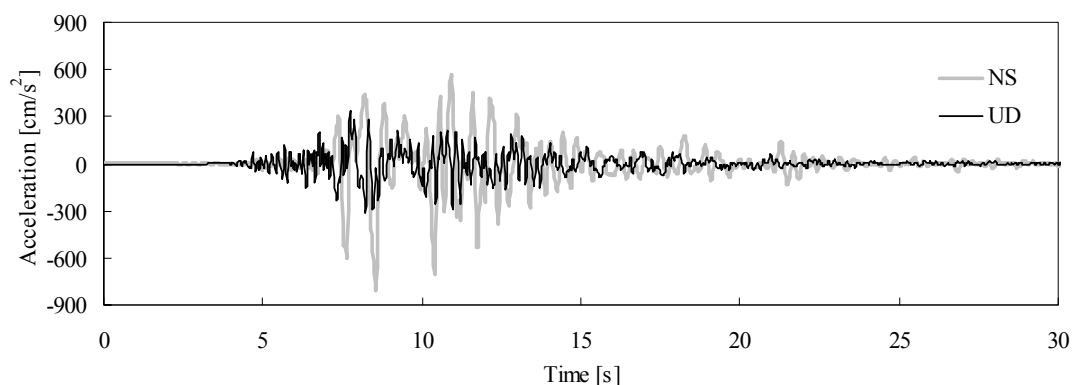


図 4.2.1-20 JMA 神戸波

3) 実験日程

実験は、京都大学防災研究所の強震応答実験装置室において、2010 年 7 月 20 日から同 30 日にかけて行った。実験日程を表 4.2.1-3 に示す。7 月 22 日のコンクリートを礎石として用いた加振では、計測に不具合があったため、試験体を新しく作成して 28 日に再度加振した。また、27 日に用いたテフロンシートは、厚みが薄すぎたため、28 日に再度テフロンボードで再度加振した。この際は、試験体に全く損傷が無かったため同一の試験体を用いた。

各加振日における加振スケジュールを表 4.2.1-4～4.2.1-10 に示す。次項以降では、礎石・細、礎石・粗、礎石・切り出し、テフロンボード、コンクリート（2 回目）の結果について述べる。

なお、各礎石種類ごとの加振実験が終了した後、錘を載せたまま、試験体にジャッキを取り付け、静的水平加力実験も行った。

表 4.2.1-3 実験日程

日付	基礎の種類
7 月 22 日	コンクリート（1 回目）
23 日	礎石・細（6 枚びしゃん）
26 日	礎石・粗（3 枚びしゃん）
27 日	礎石・切り出し
27 日	テフロンシート
28 日	テフロンボード
28 日	コンクリート（2 回目）

表 4.2.1-4 7/22 加振リスト：コンクリート(1 回目) 表 4.2.1-5 7/23 加振リスト：礎石・細

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	awh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	awh010ya
3	正弦波1Hz	100	X	as1100xa
4	正弦波1Hz	200	X	as1200xa
5	正弦波1Hz	250	X	as1250xa
6	正弦波1Hz	300	X	as1300xa
7	正弦波1Hz	300	X	as1300xb
8	正弦波1Hz	325	X	as1325xa
9	正弦波1Hz	350	X	as1350xa
10	正弦波1Hz	375	X	as1375xa
11	正弦波1Hz	400	X	as1400xa
12	正弦波2Hz	100	X	as2100xa
13	正弦波2Hz	200	X	as2200xa
14	正弦波2Hz	300	X	as2300xa
15	正弦波2Hz	325	X	as2325xa
16	正弦波2Hz	350	X	as2350xa
17	BCJ-L2波	100	X	abj100xa
18	BCJ-L2波	200	X	abj200xa
19	BCJ-L2波	300	X	abj300xa
20	BCJ-L2波	325	X	abj325xa
21	BCJ-L2波	350	X	abj350xa
22	ホワイトノイズ	10	X	awh010xb
23	ホワイトノイズ	10	Y	awh010yb

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	bwh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	bwh010ya
3	正弦波1Hz	100	X	bs1100xa
4	正弦波1Hz	200	X	bs1200xa
5	正弦波1Hz	250	X	bs1250xa
6	正弦波1Hz	300	X	bs1300xa
7	正弦波1Hz	325	X	bs1325xa
8	正弦波1Hz	350	X	bs1350xa
9	正弦波1Hz	375	X	bs1375xa
10	正弦波1Hz	400	X	bs1400xa
11	正弦波2Hz	100	X	bs2100xa
12	正弦波2Hz	200	X	bs2200xa
13	正弦波2Hz	250	X	bs2250xa
14	正弦波2Hz	300	X	bs2300xa
15	正弦波2Hz	325	X	bs2325xa
16	BCJ-L2波	100	X	bbj100xa
17	BCJ-L2波	200	X	bbj200xa
18	BCJ-L2波	300	X	bbj300xa
19	BCJ-L2波	325	X	bbj325xa
20	BCJ-L2波	350	X	bbj350xa
21	BCJ-L2波	375	X	bbj375xa
22	JMA神戸波	250	XZ	bkb250xa
23	JMA神戸波	300	X, Z	bkb300xa
24	JMA神戸波	350	X, Z	bkb350xa
25	JMA神戸波	400	X, Z	bkb400xa
26	JMA神戸波	450	X, Z	bkb450xa
27	JMA神戸波	500	X, Z	bkb500xa
28	ホワイトノイズ	10	X	bwh010xb
29	ホワイトノイズ	10	Y	bwh010yb

表 4.2.1-6 7/26 加振リスト：礎石（粗）

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	cwh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	cwh010ya
3	正弦波1Hz	100	X	cs1100xa
4	正弦波1Hz	200	X	cs1200xa
5	正弦波1Hz	250	X	cs1250xa
6	正弦波1Hz	300	X	cs1300xa
7	正弦波1Hz	325	X	cs1325xa
8	正弦波1Hz	350	X	cs1350xa
9	正弦波1Hz	375	X	cs1375xa
10	正弦波1Hz	400	X	cs1400xa
11	正弦波1Hz	425	X	cs1425xa
12	正弦波1Hz	450	X	cs1450xa
13	正弦波2Hz	100	X	cs2100xa
14	正弦波2Hz	200	X	cs2200xa
15	正弦波2Hz	250	X	cs2250xa
16	正弦波2Hz	300	X	cs2300xa
17	正弦波2Hz	325	X	cs2325xa
18	BCJ-L2波	100	X	cbj100xa
19	BCJ-L2波	200	X	cbj200xa
20	BCJ-L2波	300	X	cbj300xa
21	BCJ-L2波	325	X	cbj325xa
22	BCJ-L2波	350	X	cbj350xa
23	ホワイトノイズ	10	X	cwh010xb
24	ホワイトノイズ	10	Y	cwh010yb

表 4.2.1-7 7/27 加振リスト：礎石（切り出し）

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	dwh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	dwh010ya
3	正弦波1Hz	100	X	ds1100xa
4	正弦波1Hz	200	X	ds1200xa
5	正弦波1Hz	250	X	ds1250xa
6	正弦波1Hz	300	X	ds1300xa
7	正弦波1Hz	325	X	ds1325xa
8	正弦波1Hz	350	X	ds1350xa
9	正弦波2Hz	100	X	ds2100xa
10	正弦波2Hz	200	X	ds2200xa
11	正弦波2Hz	250	X	ds2250xa
12	正弦波2Hz	300	X	ds2300xa
13	正弦波2Hz	325	X	ds2325xa
14	正弦波2Hz	350	X	ds2350xa
15	BCJ-L2波	100	X	dbj100xa
16	BCJ-L2波	200	X	dbj200xa
17	BCJ-L2波	300	X	dbj300xa
18	BCJ-L2波	325	X	dbj325xa
19	BCJ-L2波	350	X	dbj350xa
20	BCJ-L2波	375	X	dbj375xa
21	BCJ-L2波	400	X	dbj400xa
22	BCJ-L2波	450	X	dbj450xa
23	ホワイトノイズ	10	X	dwh010xb
24	ホワイトノイズ	10	Y	dwh010yb

表 4.2.1-8 7/27 加振リスト：テフロンシート

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	ewh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	ewh010ya
3	正弦波1Hz	25	X	es1025xa
4	正弦波1Hz	50	X	es1050xa
5	正弦波1Hz	75	X	es1075xa
6	正弦波1Hz	100	X	es1100xa
7	正弦波1Hz	125	X	es1125xa
8	正弦波1Hz	150	X	es1150xa
9	正弦波2Hz	175	X	es1175xa
10	正弦波1Hz	75	X	es1075xb
11	正弦波1Hz	100	X	es1100xb
12	正弦波2Hz	150	X	es1150xb
13	ホワイトノイズ	10	X	ewh010xb
14	ホワイトノイズ	10	Y	ewh010yb

表 4.2.1-9 7/28 加振リスト：テフロンボード

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	fwh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	fwh010ya
3	正弦波1Hz	25	X	fs1025xa
4	正弦波1Hz	50	X	fs1050xa
5	正弦波1Hz	75	X	fs1075xa
6	正弦波1Hz	100	X	fs1100xa
7	正弦波1Hz	150	X	fs1150xa
8	正弦波2Hz	50	X	fs2050xa
9	正弦波2Hz	100	X	fs2100xa
10	正弦波2Hz	150	X	fs2150xa
11	BCJ-L2波	50	X	fbj050xa
12	BCJ-L2波	100	X	fbj100xa
13	BCJ-L2波	150	X	fbj150xa
14	BCJ-L2波	200	X	fbj200xa
15	ホワイトノイズ	10	X	fwh010xb
16	ホワイトノイズ	10	Y	fwh010yb

表 4.2.1-10 7/28 加振リスト：コンクリート(2 回目)

#	入力波	入力加速度 [cm/s ²]	入力 方向	ファイル名
1	ホワイトノイズ	10	X	gwh010xa
2	ホワイトノイズ	10	Y	gwh010ya
3	正弦波1Hz	100	X	gs1100xa
4	正弦波1Hz	200	X	gs1200xa
5	正弦波1Hz	250	X	gs1250xa
6	正弦波1Hz	300	X	gs1300xa
7	正弦波1Hz	325	X	gs1325xa
8	正弦波2Hz	100	X	gs2100xa
9	正弦波2Hz	200	X	gs2200xa
10	正弦波2Hz	250	X	gs2250xa
11	正弦波2Hz	300	X	gs2300xa
12	正弦波2Hz	325	X	gs2325xa
13	BCJ-L2波	100	X	gbj100xa
14	BCJ-L2波	200	X	gbj200xa
15	BCJ-L2波	300	X	gbj300xa
16	BCJ-L2波	325	X	gbj325xa
17	ホワイトノイズ	10	X	gwh010xb
18	ホワイトノイズ	10	Y	gwh010yb

(4) 実験の結果

1) 柱脚の滑り性状と損傷状況

礎石の種類および入力波ごとの定性的な滑り性状を表 4.2.1-11 にまとめて示す。テフロンボード以外の礎石では、入力加速度がおおよそ 300cm/s^2 を超える付近から滑りが生じ始めた。いずれの礎石の場合も、加振波に関わらず、一方向に滑りやすい傾向が見られた。また、びしょん仕上げの礎石・細と礎石・粗では、加振後に木材の磨耗粉が見られ、柱底面が削られていた（写真 4.2.1-12～4.2.1-15）。一方、礎石・切り出しおよびコンクリートでは、柱底面は削られていなかった（写真 4.2.1-16～4.2.1-17）。

表 4.2.1-11 各加振における滑り性状

礎石の種類	入力波	滑り性状
礎石・細	正弦波1.0Hz	最大入力加速度 400cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約10mmずつ滑る。
	正弦波2.0Hz	最大入力加速度 300cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。若干ねじれながら滑る。一周期に約20mmずつ滑る。
	BCJ-L2波	最大入力加速度 325cm/s^2 において滑り始める。
	JMA神戸波	最大入力加速度 350cm/s^2 において滑り始める。
礎石・粗	正弦波1.0Hz	最大入力加速度 450cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約30～45mmずつ滑る。
	正弦波2.0Hz	最大入力加速度 300cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約10～25mmずつ滑る。
	BCJ-L2波	最大入力加速度 300cm/s^2 において滑り始める。
礎石・切り出し	正弦波1.0Hz	最大入力加速度 300cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約20mmずつ滑る。
	正弦波2.0Hz	最大入力加速度 325cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。大きくねじれながら滑る。
	BCJ-L2波	最大入力加速度 300cm/s^2 において滑り始める。大きくねじれながら滑る。
コンクリート	正弦波1.0Hz	最大入力加速度 250cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約8mmずつ滑る。
	正弦波2.0Hz	最大入力加速度 300cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。少しねじれながら滑る。
	BCJ-L2波	最大入力加速度 300cm/s^2 において滑り始める。若干ねじれながら滑る。
テフロンボード	正弦波1.0Hz	最大入力加速度 100cm/s^2 において滑り始める。入力波形と同じように正負に同程度滑るため、残留変位はほぼ0mmとなる。
	正弦波2.0Hz	最大入力加速度 100cm/s^2 において一方向に徐々に滑り始める。一周期に約15mmずつ滑る。
	BCJ-L2波	最大入力加速度 100cm/s^2 において滑り始める。

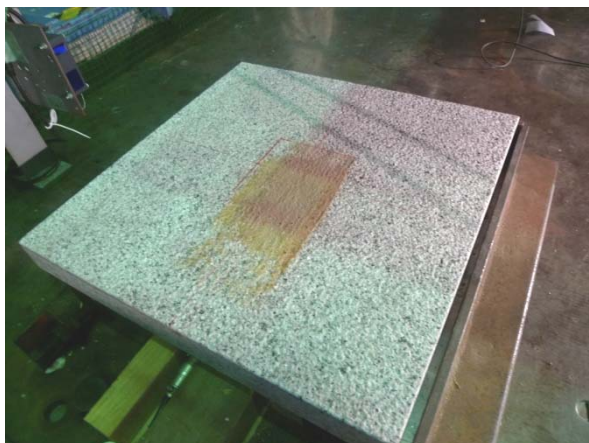


写真 4. 2. 1-12 礎石・細 磨耗粉



写真 4. 2. 1-13 礎石・細 柱底面



写真 4. 2. 1-14 礎石・粗 磨耗粉



写真 4. 2. 1-15 礎石・粗 柱底面



写真 4. 2. 1-16 コンクリート 柱底面



写真 4. 2. 1-17 礎石・切り出し 柱底面

正弦波 1Hz 加振における柱脚滑りの時刻歴波形を図 4.2.1-21～4.2.1-24 に示す。礎石の種類によって滑り出すタイミングは異なるが、一度、滑りが生じ始めると一方向へ滑っていく傾向があることが分かる。10mm 以上の滑りが生じるタイミングは、コンクリートの場合が最も早く ($PGA=300\text{cm/s}^2$)、礎石・粗の場合が最も遅い ($PGA=450\text{cm/s}^2$) 結果となった。

正弦波 2Hz 加振における柱脚滑りの時刻歴波形を図 4.2.1-25～4.2.1-28 に示す。いずれの場合もおおよそ 325cm/s^2 加振時から滑りが生じ始めた。びしょん仕上げの礎石・細および礎石・粗の場合、正弦波 1Hz 加振時と同様に、一方向に滑りやすい傾向が見られたが、表面が比較的平滑な礎石・切り出しおよびコンクリートの場合には、正負の滑り量は比較的近い値となった。

BCJ-L2 波加振における柱脚滑りの時刻歴波形を図 4.2.1-29～4.2.1-32 に示す。いずれの場合もおおよそ 300cm/s^2 加振時から滑りが生じ始めた。礎石・細、礎石・粗およびコンクリートの場合、正弦波加振時と同様に、一方向に滑りやすい傾向が見られた。一方、礎石・切り出しの場合には、やや異なる傾向を示した。

テフロンボードを礎石として用いた場合の柱脚滑りの時刻歴波形を図 4.2.1-33～4.2.1-35 に示す。正弦波加振では、正負の滑り量がほぼ等しくなる傾向が見られたが、BCJ-L2 波加振では、一方向に滑っている。

JMA 神戸波加振における柱脚滑りの時刻歴波形を図 4.2.1-36 に示す。礎石の種類は、6 枚びしょん（礎石・細）である。 350cm/s^2 付近から滑りが生じ始め、一方向に滑っていく傾向が見られた。

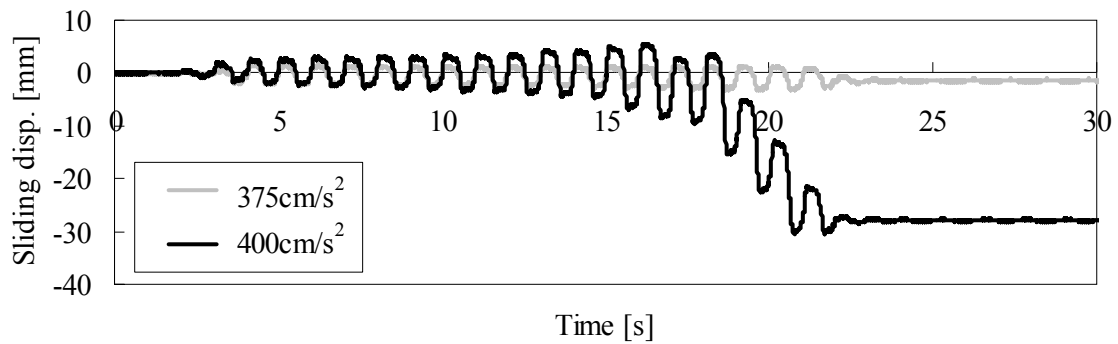


図 4.2.1-21 正弦波 1Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・細）

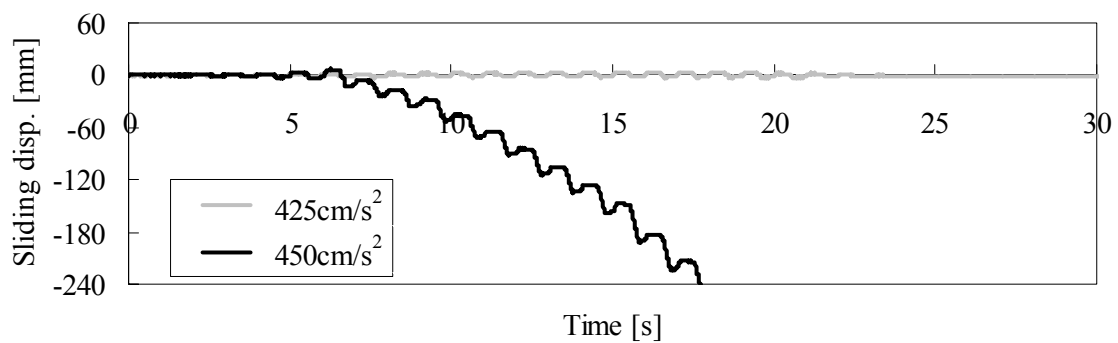


図 4.2.1-22 正弦波 1Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・粗）

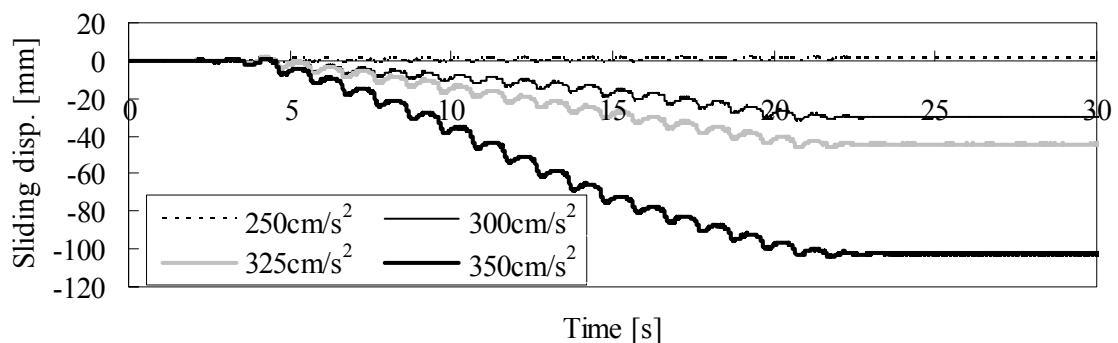


図 4.2.1-23 正弦波 1Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・切り出し）

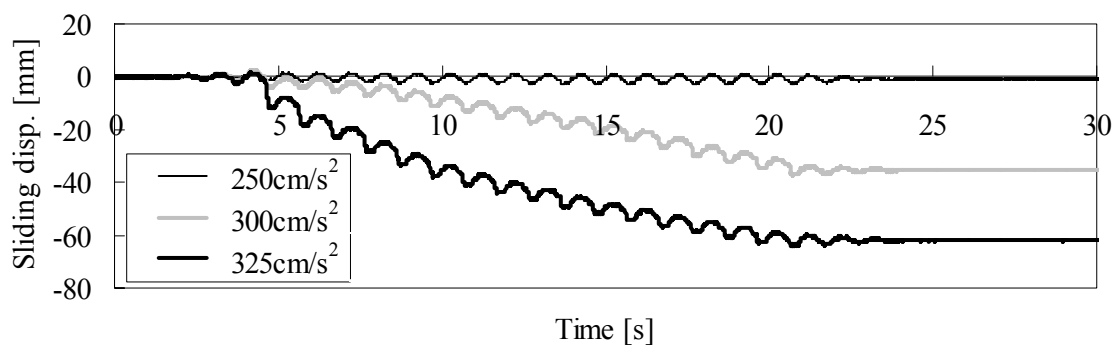


図 4.2.1-24 正弦波 1Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（コンクリート）

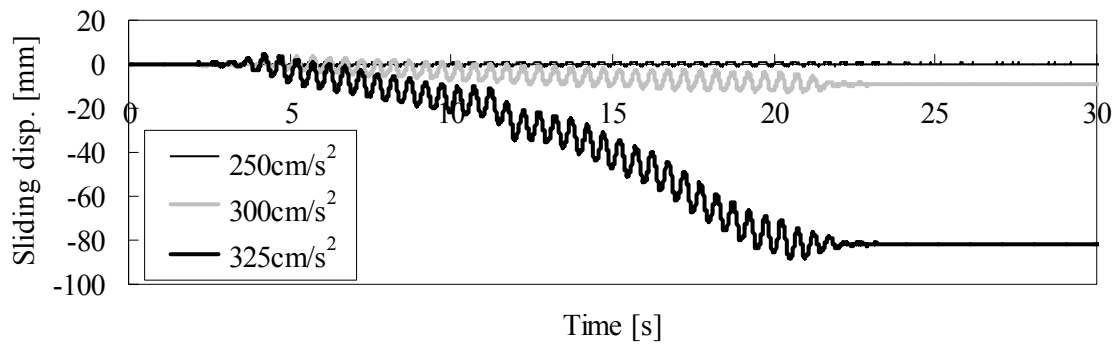


図 4. 2. 1-25 正弦波 2Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・細）

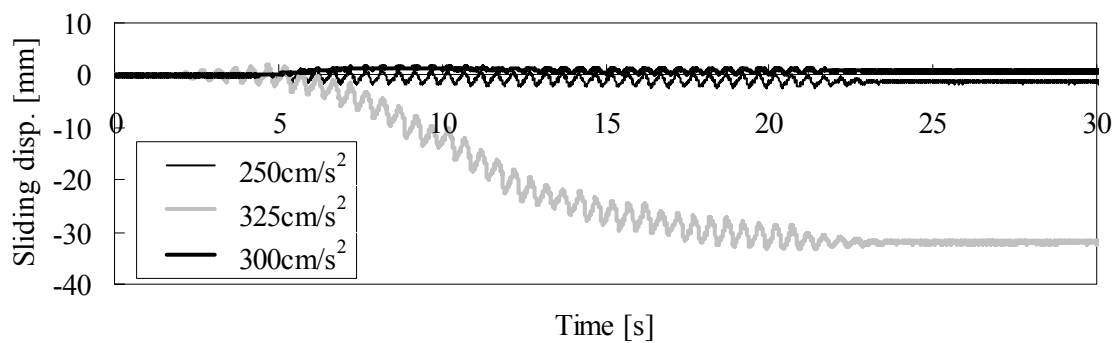


図 4. 2. 1-26 正弦波 2Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・粗）

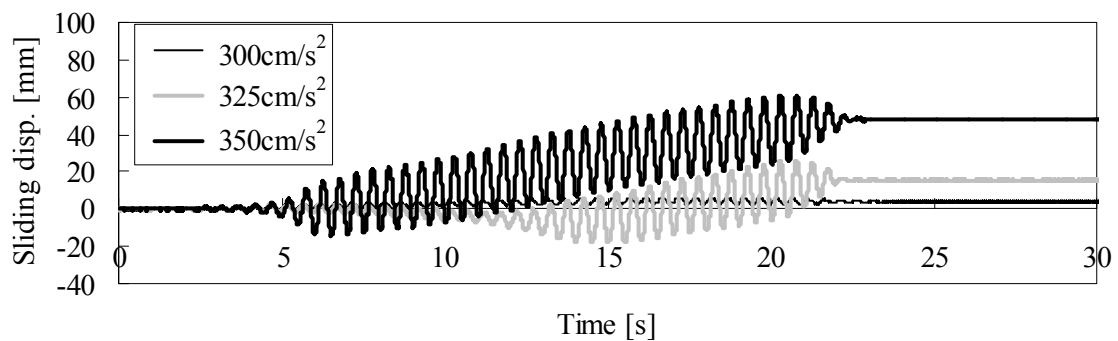


図 4. 2. 1-27 正弦波 2Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・切り出し）

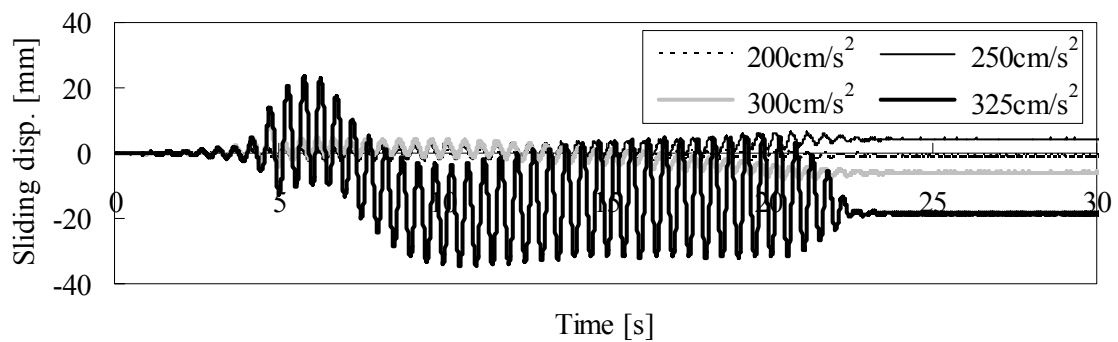


図 4. 2. 1-28 正弦波 2Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（コンクリート）

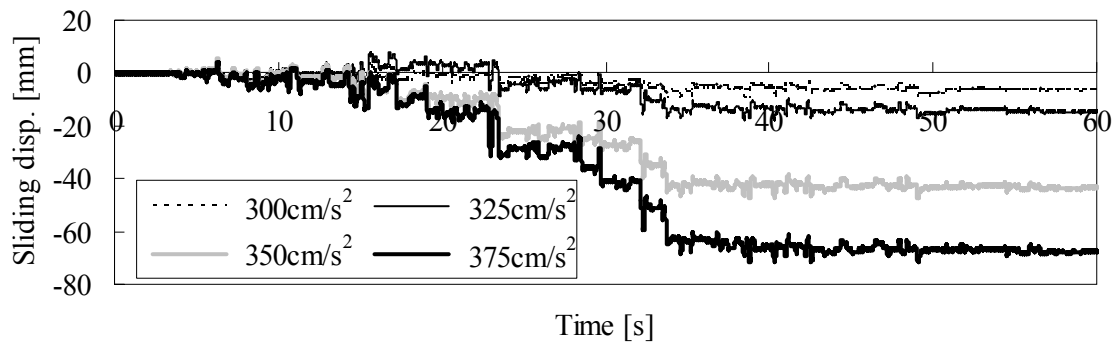


図 4. 2. 1-29 BCJ-L2 波加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・細）

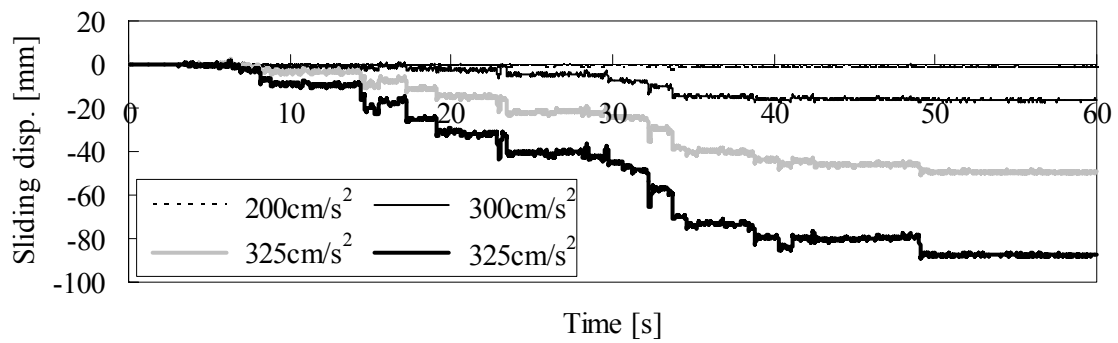


図 4. 2. 1-30 BCJ-L2 波加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・粗）

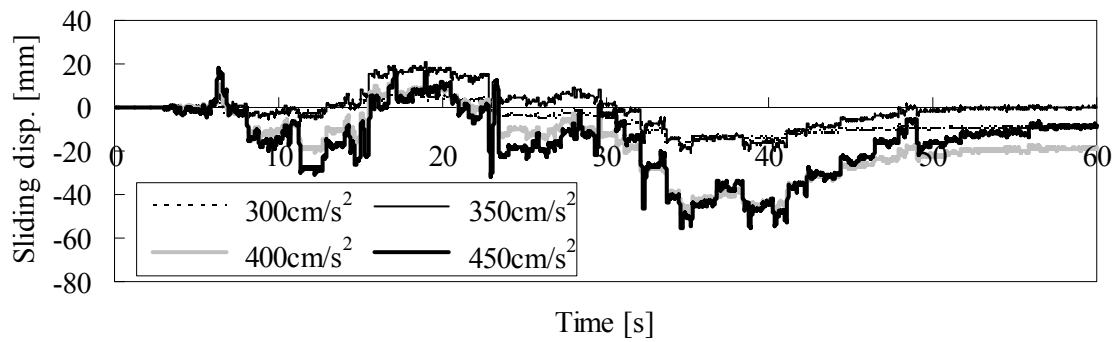


図 4. 2. 1-31 BCJ-L2 波加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・切り出し）

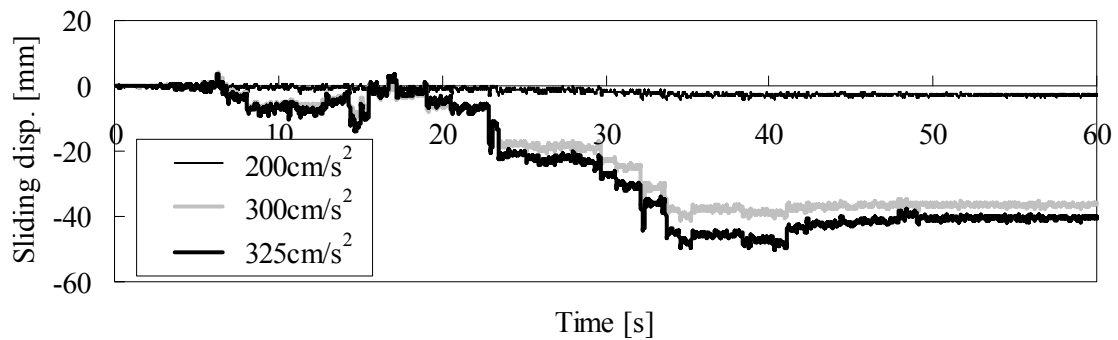


図 4. 2. 1-32 BCJ-L2 波加振おける柱脚滑り時刻歴（コンクリート）

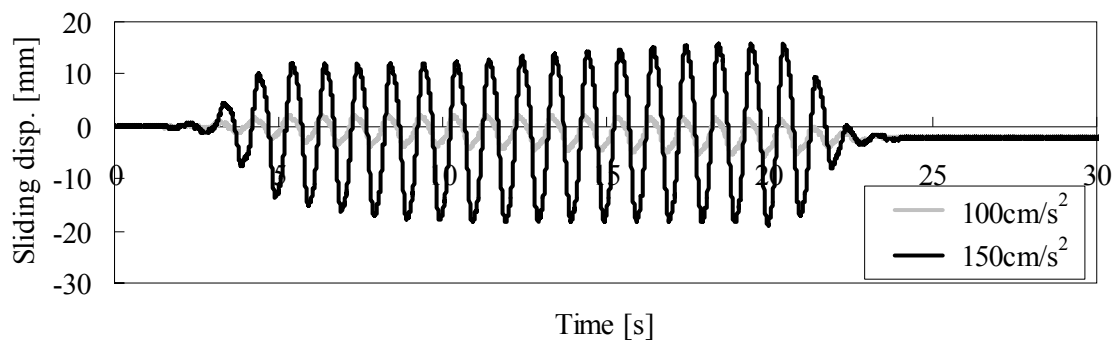


図 4. 2. 1-33 正弦波 1Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（テフロン）

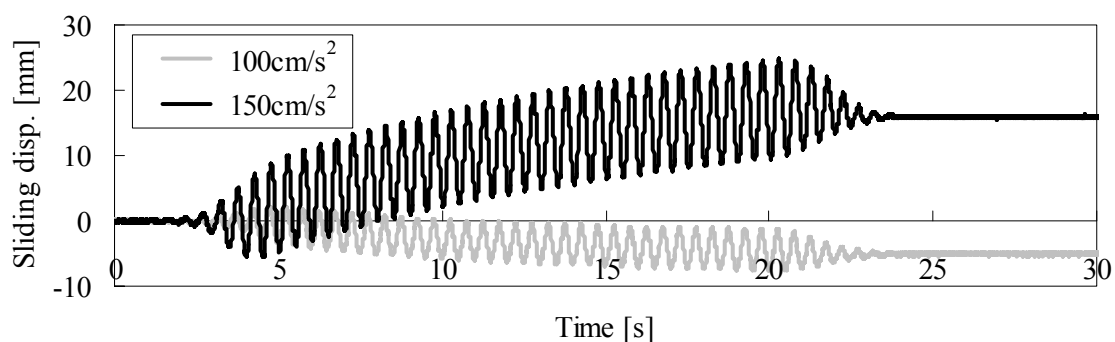


図 4. 2. 1-34 正弦波 2Hz 加振おける柱脚滑り時刻歴（テフロン）

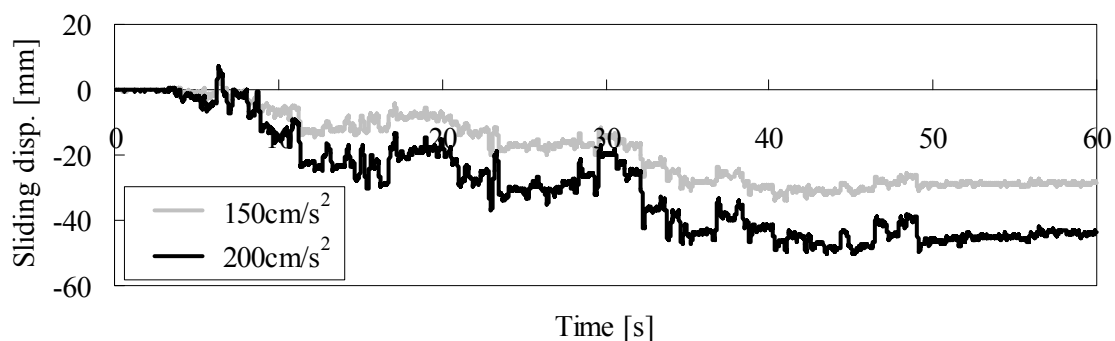


図 4. 2. 1-35 BCJ-L2 波加振おける柱脚滑り時刻歴（テフロン）

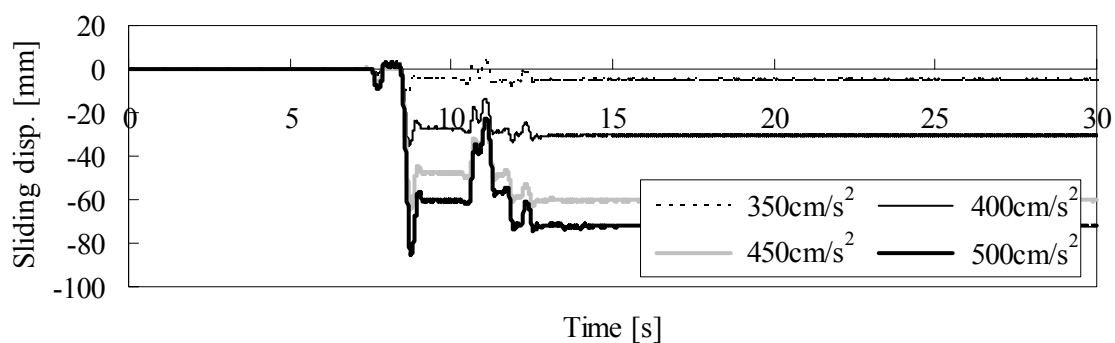


図 4. 2. 1-36 JMA 神戸波加振おける柱脚滑り時刻歴（礎石・細）

2) 最大滑り量

最大入力加速度に対する最大滑り量の分布を入力波ごとに図 4.2.1-37～4.2.1-39 に示す。ここでの最大滑り量とは、加振前に比べて最も大きく移動した瞬間の変位量のことを指す。加振方向の構面が、完全には並進的には滑らず、Y1 構面と Y2 構面で最大滑り量がやや異なっている場合がほとんどであるため、Y1 構面と Y2 構面の最大滑り量の平均値を用いている。

図 4.2.1-37 より、正弦波 1Hz を入力したときの最大滑り量は入力レベルの増大に対して、最大滑り量が増大する傾向にあるといえる。礎石が切り出し、コンクリートの場合においては、最大入力加速度 300cm/s² 付近で滑りが生じ始め、入力が 25cm/s² 増大する毎に数十ミリずつ最大滑り量が増えるのに対して、礎石・細、粗の場合においては、滑りが生じ始めてすぐに 100 ミリを超えるような大きな最大滑り量を示す傾向が見られた。なお、礎石・粗の 450cm/s² 加振では、最大滑り量が計測可能範囲 250mm を超えている。

図 4.2.1-38 より、正弦波 2Hz を入力したときの最大滑り量は入力レベルの増大に対して、最大滑り量が増大する傾向にあるといえる。正弦波 1Hz に比べて加振波の波数が多いため、滑り発生後すぐに最大滑り量が増大しているように見えるが、入力の増大に対して概ね線形に最大滑り量が増大している。

図 4.2.1-39 より、BCJ-L2 波入力における最大滑り量も正弦波 2Hz 加振時と同様に、入力レベルの増大に対してほぼ線形に増大していることが分かる。

入力レベルに対する最大滑り量の分布を礎石の種類ごとに図 4.2.1-40 に示す。

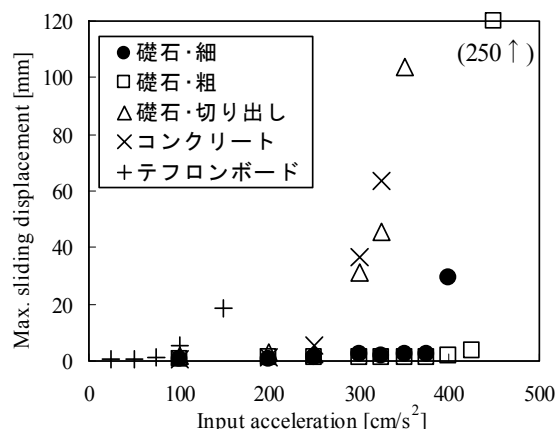


図 4.2.1-37 正弦波 1.0Hz 加振における最大滑り量

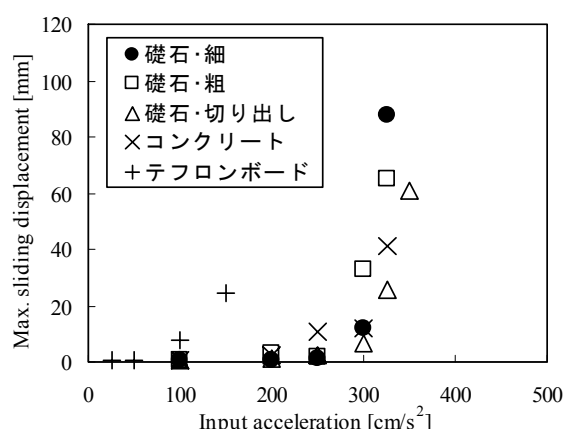


図 4.2.1-38 正弦波 2.0Hz 加振における最大滑り量

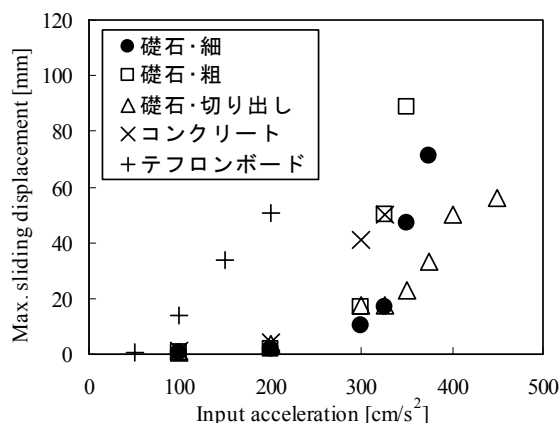
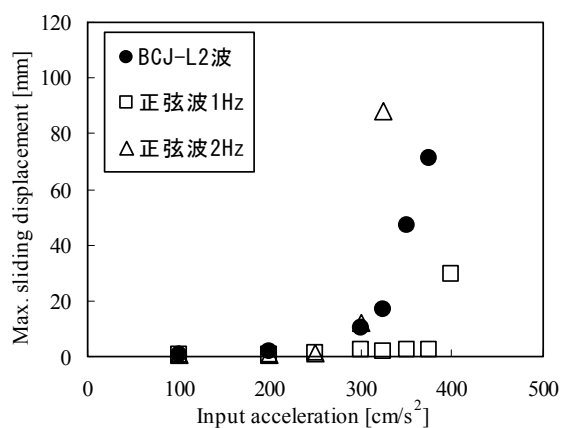
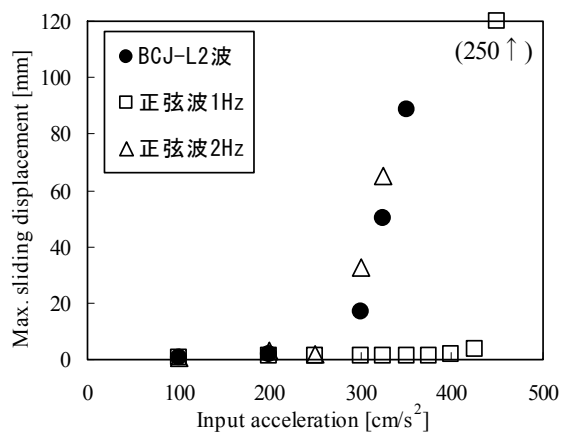


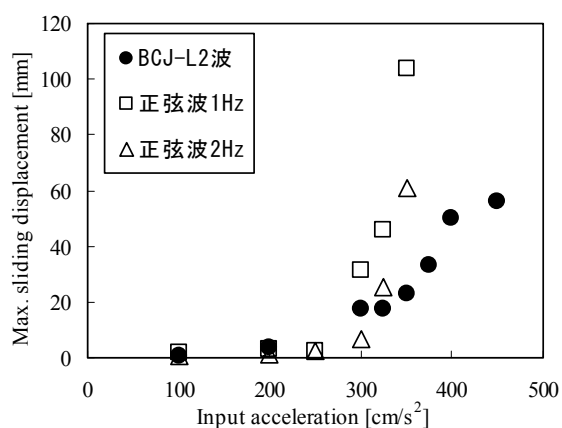
図 4.2.1-39 BCJ-L2 波加振における最大滑り量



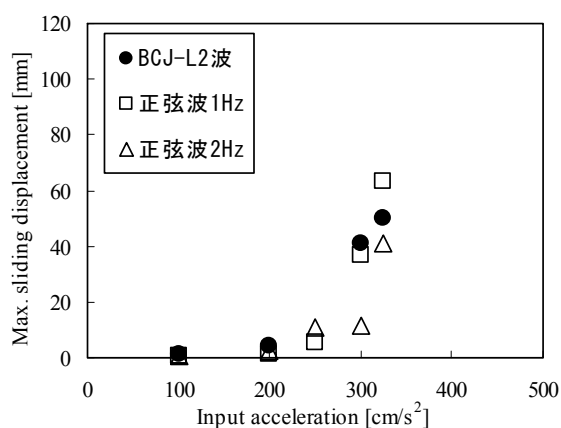
a) 礎石・細



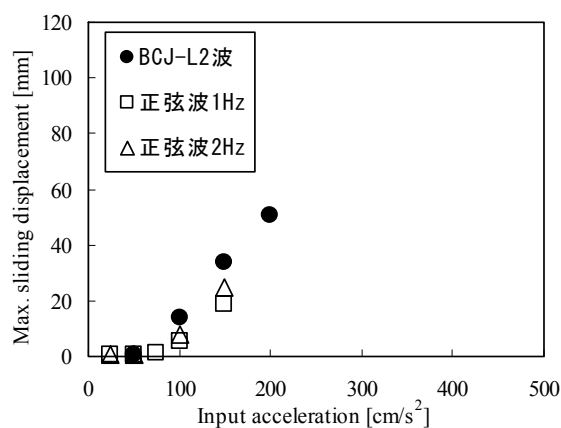
b) 礎石・粗



c) 礎石・切り出し



d) コンクリート



e) テフロンボード

図 4. 2. 1-40 礎石種類ごとの各加振における最大滑り量

3) 残留滑り量

最大入力加速度に対する残留滑り量の分布を入力波ごとに図 4.2.1-41～4.2.1-43 に示す。ここでの残留滑り量とは、加振終了時点の変位量のことを指す。また、Y1 構面と Y2 構面の残留滑り量の平均値を用いている。入力レベルに対する最大滑り量の分布を礎石の種類ごとに図 4.2.1-44 に示す。

多くの場合で、一方向に滑っていく傾向が見られたため、前述の最大滑り量の分布と似た傾向を示している。

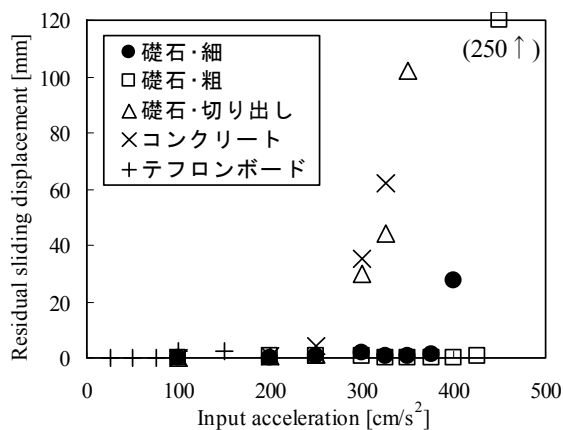


図 4.2.1-41 正弦波 1.0Hz 加振における残留滑り量

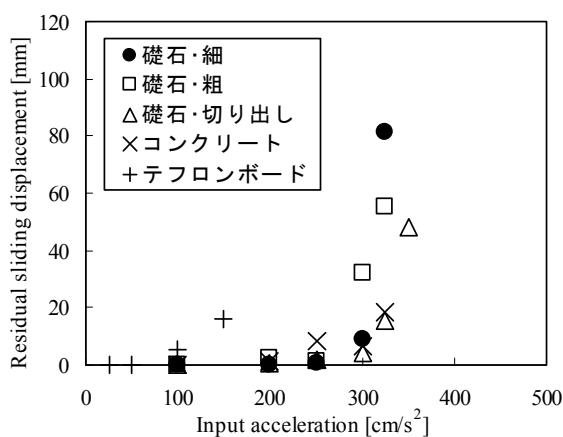


図 4.2.1-42 正弦波 2.0Hz 加振における残留滑り量

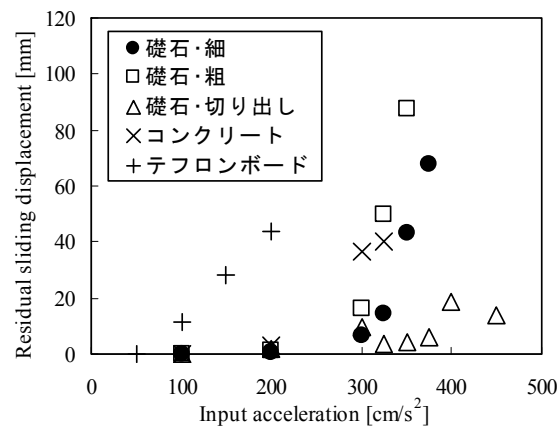
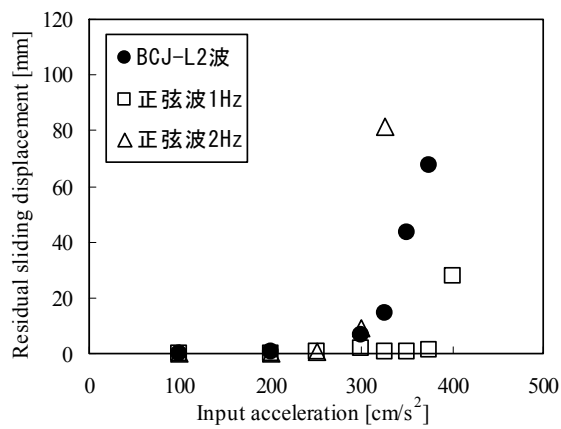
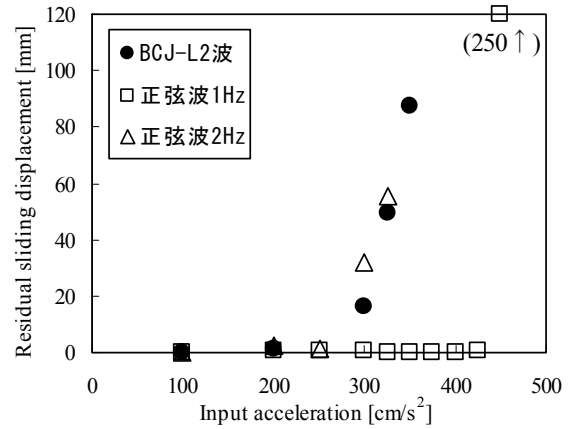


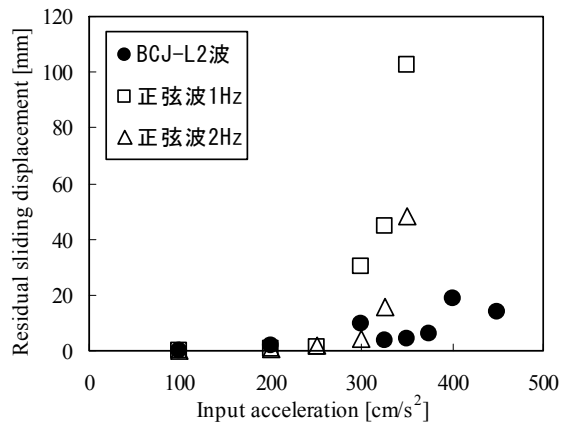
図 4.2.1-43 BCJ-L2 波加振における残留滑り量



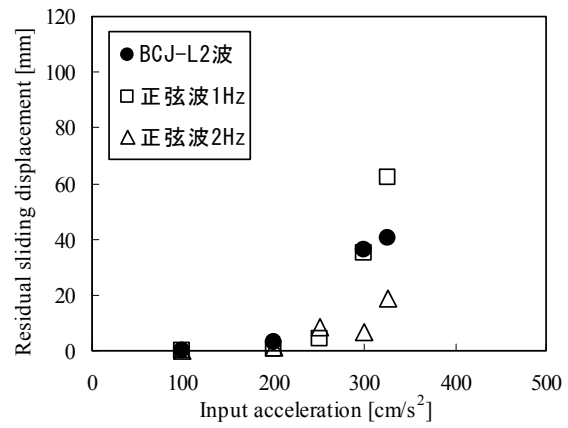
a) 礎石・細



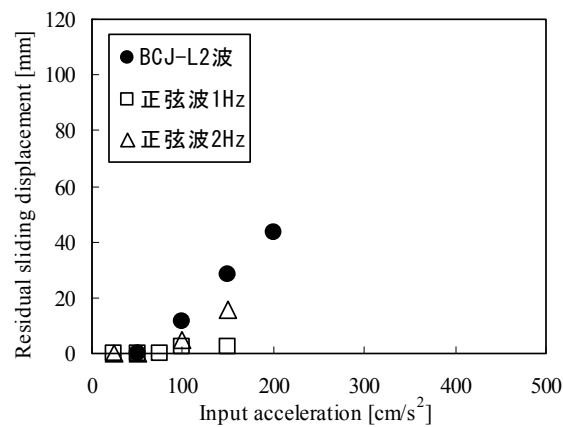
b) 礎石・粗



c) 礎石・切り出し



d) コンクリート



e) テフロンボード

図 4. 2. 1-44 礎石種類ごとの各加振における最大滑り量

4) 鉛直方向の加速度

JMA 神戸波（礎石・細） 400cm/s^2 加振における鉛直方向の応答加速度を図 4.2.1-45 に示す。

また、鉛直荷重の変動量を図 4.2.1-46 に示す。柱 X1Y1 および柱 X1Y2 における柱軸力の変動量の平均値を X1 構面、同様に柱 X2Y1 および柱 X2Y2 から求めた値を X2 構面として示している。

鉛直方向の加速度が大きい時、X1 構面と X2 構面の値が大きく変動している。これより、鉛直方向の応答、特に応答加速度が、軸力の変動量に与える影響は大きいと考えられる。

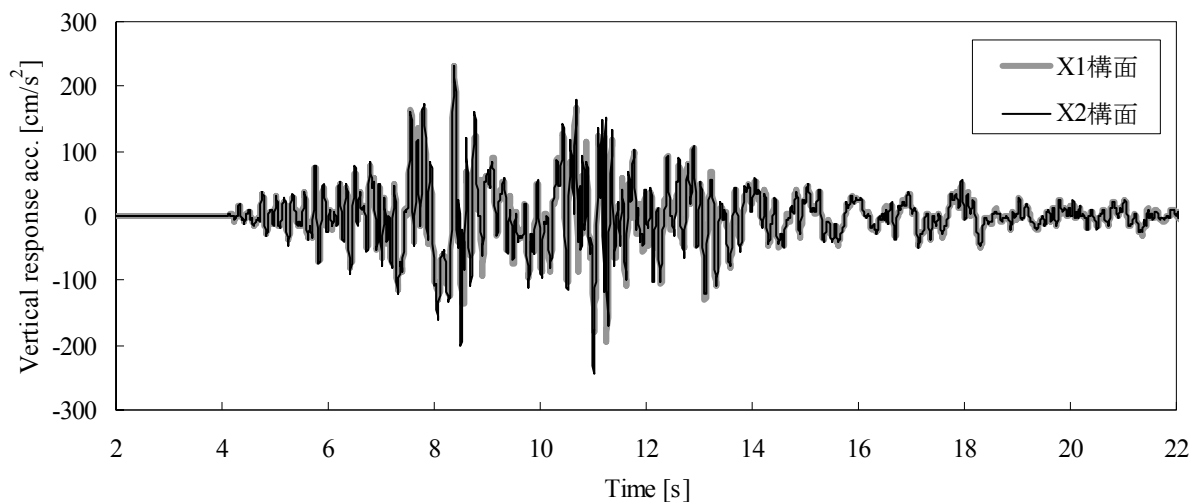


図 4. 2. 1-45 JMA 神戸波 400cm/s^2 加振における鉛直方向の応答加速度

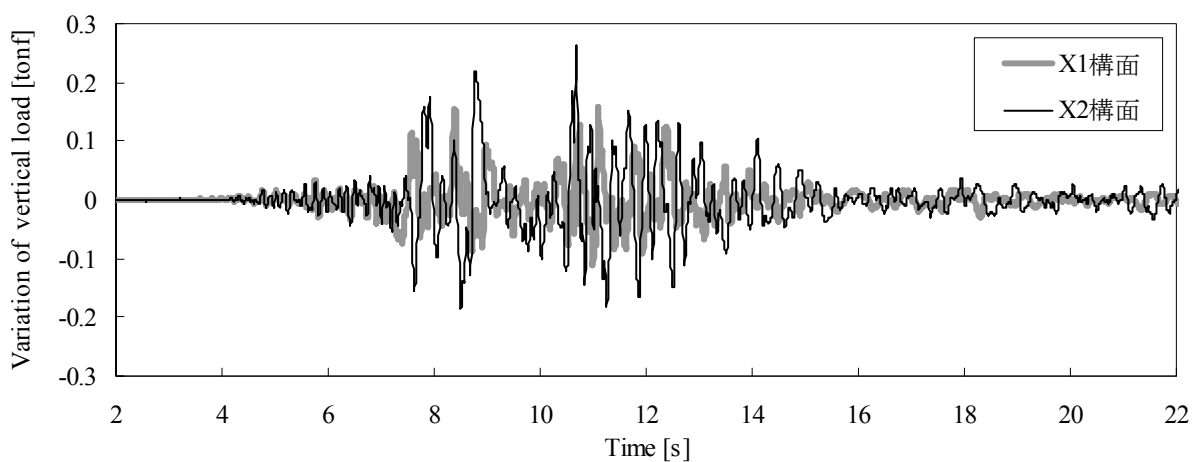


図 4. 2. 1-46 鉛直荷重の変動量

5) 静止摩擦係数

実験結果から、礎石と柱底面との静止摩擦係数を算出した。滑りが生じた瞬間に各構面で次式が成り立つと仮定する。

$$m_i |\ddot{x}_i| = \mu m_i (\ddot{y}_i + g) \quad i=1, 2 \quad (4.2.1)$$

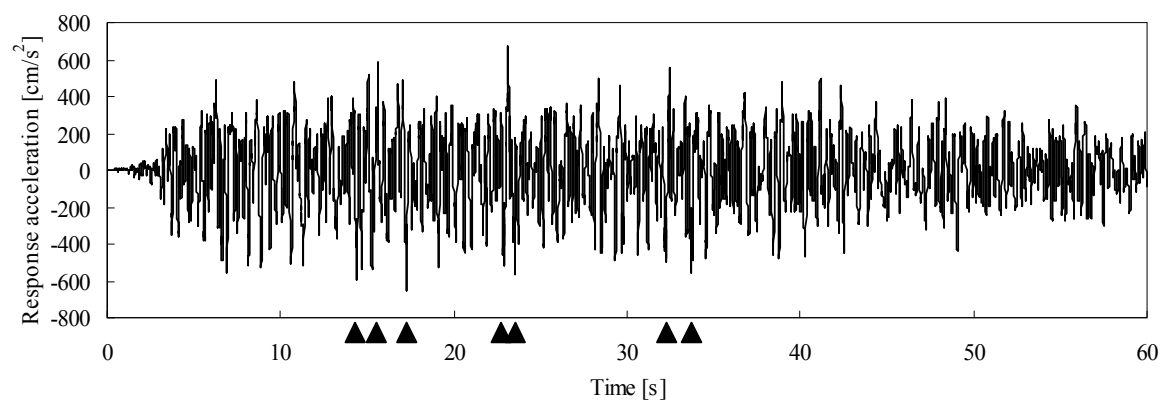
ただし m_i は試験体 Y_i 構面の質量で、ここでは $m/2$ とする。また、 μ は静止摩擦係数、 $\ddot{x}_i$ と $\ddot{y}_i$ はそれぞれ Y_i 構面の水平方向と鉛直方向の応答加速度、 g は重力加速度である。上式を静止摩擦係数 μ について解くと次のようになる。

$$\mu = m_i |\ddot{x}_i| / m_i (\ddot{y}_i + g) \quad i=1, 2 \quad (4.2.2)$$

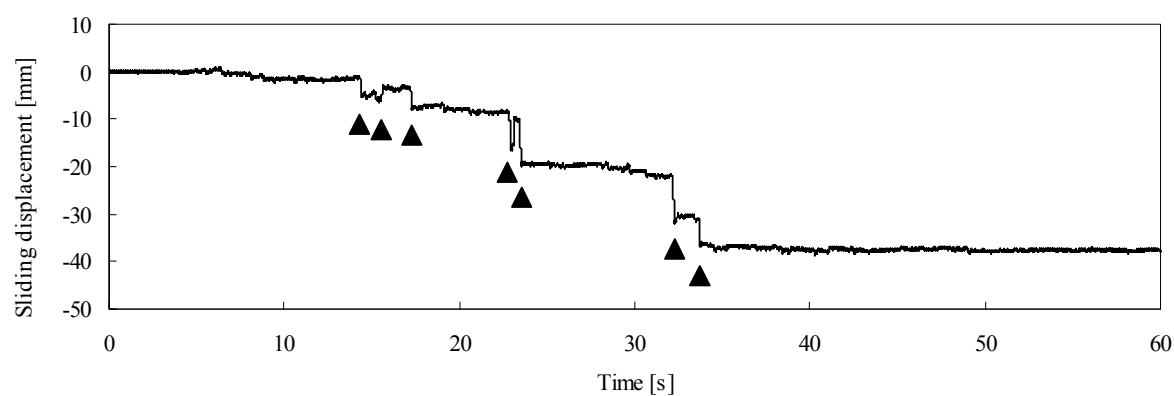
(2)式において、 $\ddot{x}_i$ は計測データから直接得られ、各構面の荷重計データの合計を慣性力と仮定し静止摩擦係数が求めた。算出においては Y_1 、 Y_2 構面それぞれについて、柱脚と基礎との相対変位のデータから、明確に滑りが生じている箇所を選び、その直前でピークになっている加速度を読み取った。次に、同時刻の荷重計の値から各構面の鉛直荷重の変動量を算出した。また、同一加振におけるデータから滑りの発生時刻を複数点読み取った場合、それぞれについて摩擦係数を算出した。水平応答加速度、柱脚の移動量、鉛直荷重の変動量の時刻歴の一例を図 4.2.1-47 および図 4.2.1-48 に示す。図中、▲印で示した箇所を滑りが生じた時刻と判断した。

本実験で用いた試験体の約 1000 点の滑り発生箇所において静止摩擦係数を算出し、加振波ごとに整理したものを表 4.2.1-12～4.2.1-15 に示す。また、摩擦係数の分布を図 4.2.1-49～4.2.1-52 に示す。

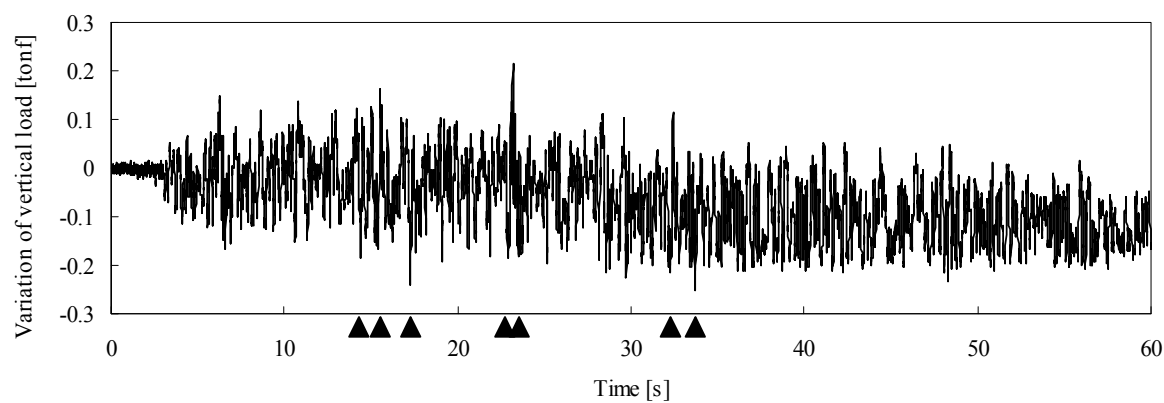
全加振結果から得られた摩擦係数の平均値は、礎石・細：0.461、礎石・粗：0.398、礎石・切り出し：0.376、コンクリート：0.360、テフロンボード：0.095 となった。礎石・切り出しとコンクリートは、平均値が近く、摩擦係数の分布も類似しており、表面粗さ計測の結果とも調和的である。したがって、柱脚の滑り挙動を考える場合には、礎石として比較的似た材料であると言える。一方、びしょん仕上げの礎石・細と礎石・粗の摩擦係数は、特に礎石・細の場合、正弦波加振におけるばらつきが影響し、大きな変動係数を示している。正弦波加振では、滑りの発生時刻が明瞭でない場合が多く、摩擦係数の算出において人為的ばらつきが多く含まれた可能性が考えられる。ただし、滑り発生時刻が比較的明瞭に見られた BCJ-L2 波加振に基づく摩擦係数の変動係数も 25%程度を示しており、元来ばらつきの大きい現象であるとも言える。



a) 水平応答加速度

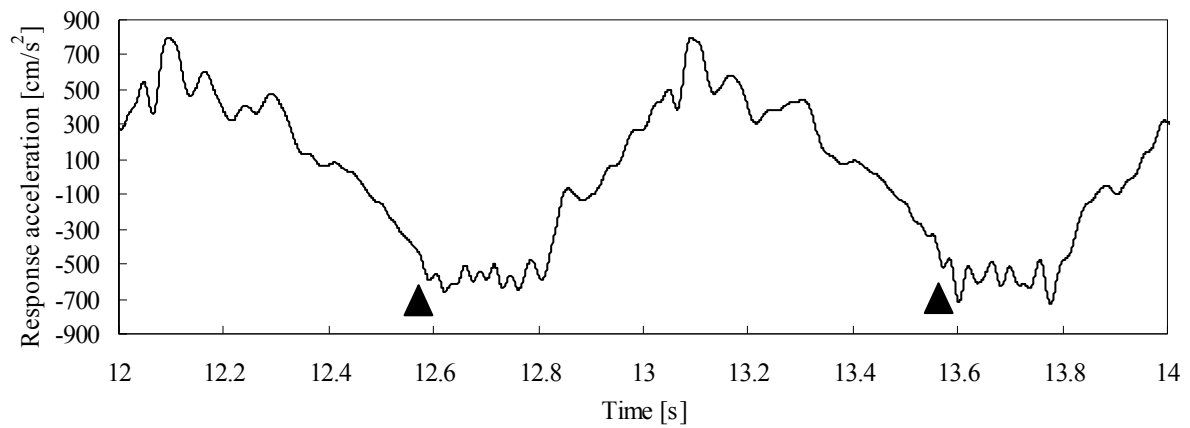


b) 柱脚部での滑り量

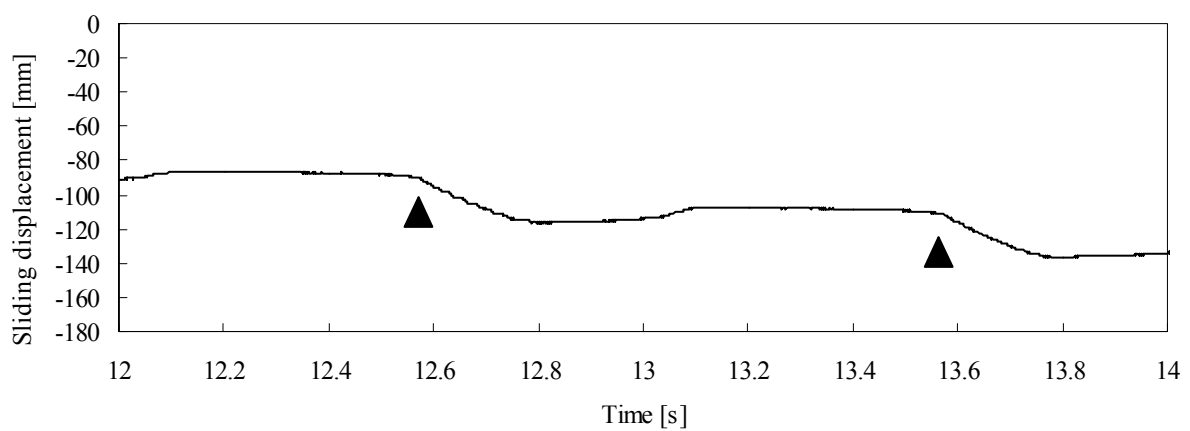


c) 鉛直荷重の変動量

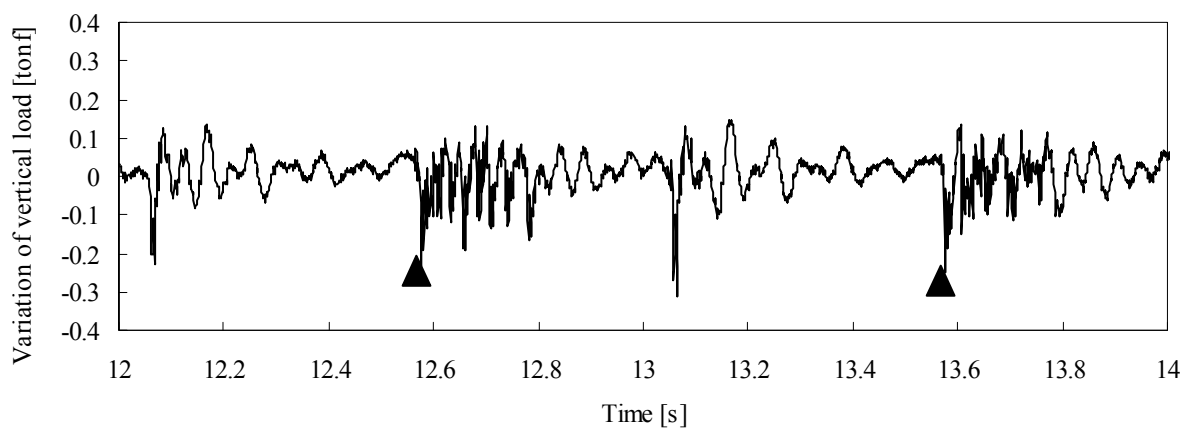
図 4. 2. 1-47 BCJ-L2 波加振における滑り発生時刻の抽出 (▲ : 滑り発生と判断した時刻)



a) 水平応答加速度



b) 柱脚部での滑り量



c) 鉛直荷重の変動量

図 4.2.1-48 正弦波加振における滑り発生時刻の抽出 (▲: 滑り発生と判断した時刻)

表 4. 2. 1-12 摩擦係数（正弦波 1Hz 加振）

礎石の種類	平均値	最大値	最小値	変動係数
礎石・細	0.387	0.878	0.076	0.549
礎石・粗	0.446	0.539	0.338	0.160
礎石・切り出し	0.357	0.458	0.084	0.176
コンクリート	0.368	0.539	0.213	0.232
テフロン	0.104	0.130	0.068	0.174

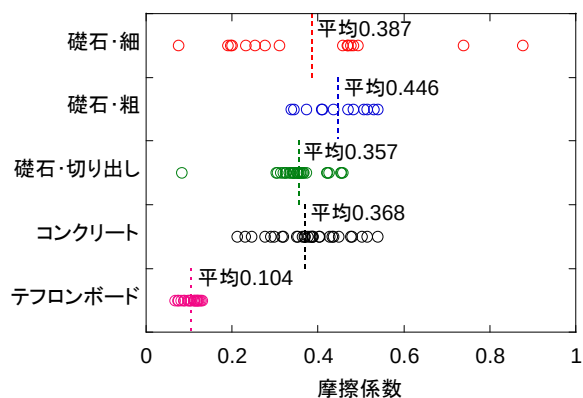


図 4. 2. 1-49 摩擦係数の分布（正弦波 1Hz 加振）

表 4. 2. 1-13 摩擦係数（正弦波 2Hz 加振）

礎石の種類	平均値	最大値	最小値	変動係数
礎石・細	0.597	0.882	0.268	0.338
礎石・粗	0.484	0.651	0.251	0.259
礎石・切り出し	0.350	0.412	0.285	0.112
コンクリート	0.382	0.555	0.213	0.216
テフロン	0.074	0.102	0.034	0.246

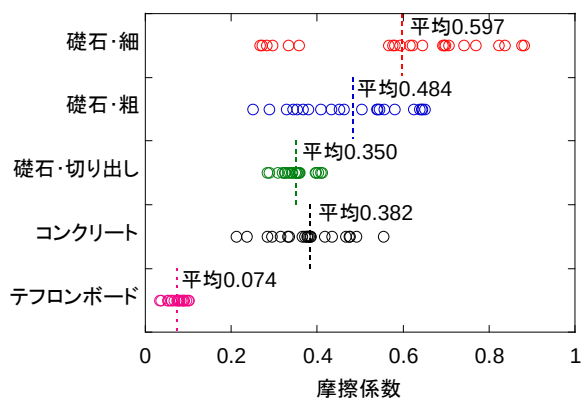


図 4. 2. 1-50 摩擦係数の分布（正弦波 2Hz 加振）

表 4. 2. 1-14 摩擦係数（BCJ-L2 波加振）

礎石の種類	平均値	最大値	最小値	変動係数
礎石・細	0.414	0.610	0.233	0.251
礎石・粗	0.329	0.555	0.147	0.274
礎石・切り出し	0.391	0.786	0.215	0.238
コンクリート	0.328	0.586	0.136	0.267
テフロン	0.103	0.142	0.056	0.205

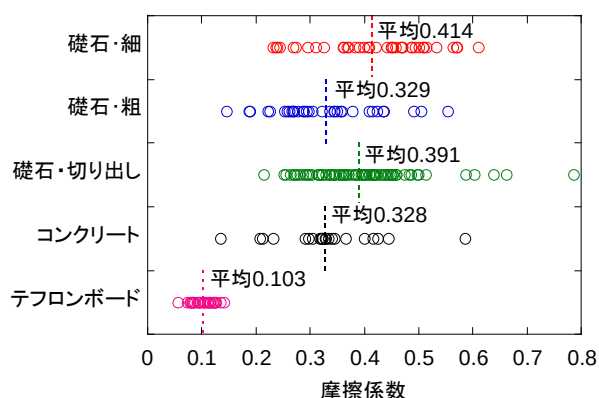


図 4. 2. 1-51 摩擦係数の分布（BCJ-L2 波加振）

表 4. 2. 1-15 摩擦係数（全加振）

礎石の種類	平均値	最大値	最小値	変動係数
礎石・細	0.461	0.882	0.076	0.394
礎石・粗	0.398	0.651	0.147	0.307
礎石・切り出し	0.376	0.786	0.084	0.216
コンクリート	0.360	0.586	0.136	0.241
テフロン	0.095	0.142	0.034	0.246

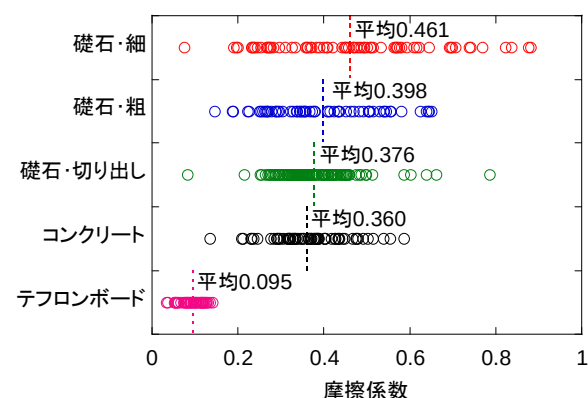


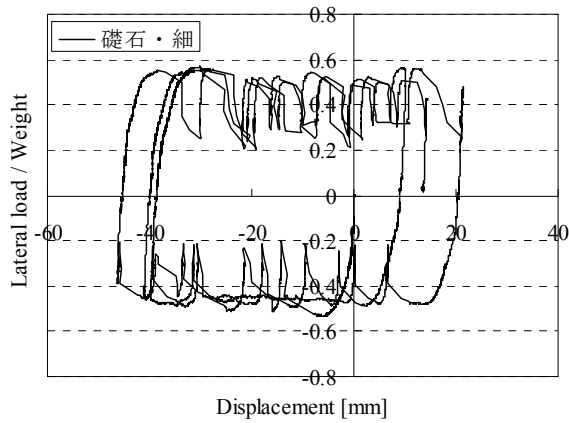
図 4. 2. 1-52 摩擦係数の分布（全加振）

6) 静的加力実験における摩擦係数

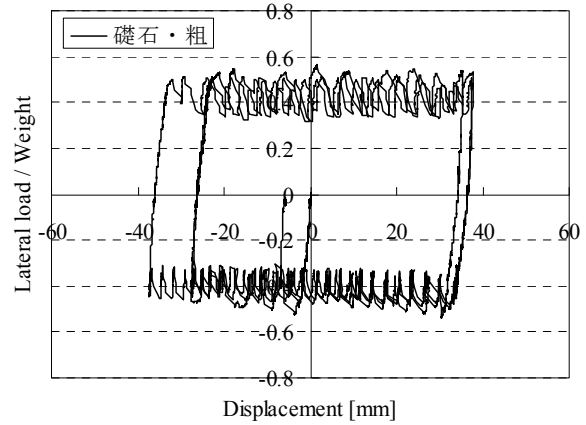
静的水平加力実験の結果を図 4.2.1-53 にまとめて示す。横軸は水平変位、縦軸はジャッキの水平力を試験体重量で除した値である。これらから、最大値と最小値を静止摩擦係数として読み取った結果を表 4.2.1-16 に示す。

表 4.2.1-16 静的加力実験における静止摩擦係数

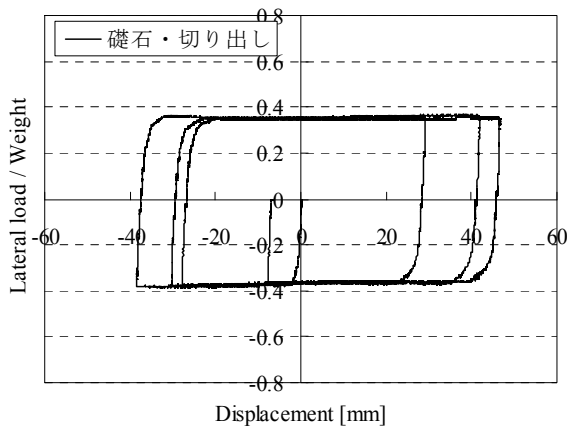
	礎石・細	礎石・粗	礎石・切り出し	コンクリート	テフロン
最大値	0.569	0.567	0.370	0.388	0.084
最小値	-0.535	-0.539	-0.389	-0.567	-0.103
平均値	0.552	0.553	0.380	0.478	0.093



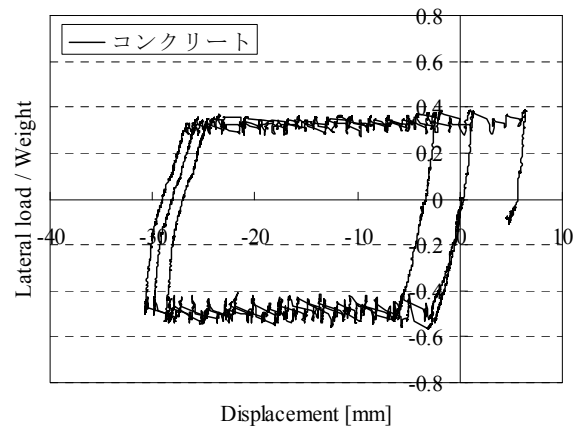
a) 礎石・細



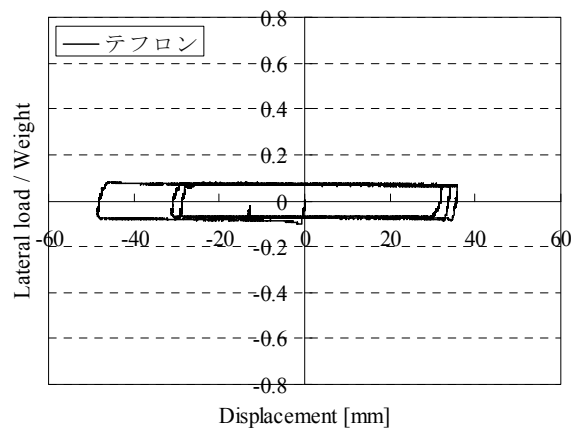
b) 礎石・粗



c) 礎石・切り出し



d) コンクリート



e) テフロンボード

図 4.2.1-53 静的水平加力実験結果

4. 2. 2 骨組みモデルの加振実験（1）

（1）目的

本実験は、E-ディフェンスによる石場建て木造建築物の振動台実験の予備実験として位置づけており、すべり挙動と建物の総重量がすべり挙動に与える影響について実験的に把握することを目的としている。本実験の試験体の軸組および鉛直構面、水平構面等の仕様、設置方法等は、E-ディフェンスで実験する試験体の仕様に準じており、その一部を再現した試験体である。

本実験は、2010年9月13日から24日の期間で京都大学防災研究所の強震応答実験室を利用して行われている。実行メンバーは以下のとおりである。

向坊恭介 立命館大学理工学部建築都市デザイン学科 助教

須田 達 立命館大学グローバル・イノベーション研究機構 准教授

吉田尚弘 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 修士課程2年

有山睦美 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 修士課程2年

福田由惟 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 修士課程2年

廣瀬大介 立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科 4回生

田中瑛子 奈良女子大学大学院人間文化研究科住環境学専攻 修士課程2年

大岡 優 立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻 博士課程3年

（2）試験体の概要

試験体は、基礎となる礎石の上に柱を固定せずに設置した石場建て伝統構法である。軸組接合部は雇いほぞに、柱外側は鼻栓打ちとし、柱内側は車知栓打ちあるいは込み栓打ちとした。桁と柱の接合部は長ほぞ込み栓打ちとした。試験体規模は平面寸法は柱間で3640mm×1820mm、礎石から桁までの高さは3140mm、通し柱および間柱の断面は120mm角、桁の断面は120×210mm、足固めの断面は120×150mmである。礎石は、平面500mm×500mm、厚み50mmの御影石として、表面はびしゃん6枚仕上げとした。耐力要素は鉛直構面の片面貼り乾式土壁パネルと足固め、柱などの軸組である。基本となる平面図および立面図を図4.2.2-1に示し、各部の状況を写真4.2.2-1の(a)から(i)に示す。



(a) 足固め-柱接合部



(b) 大引き-足固め接合部



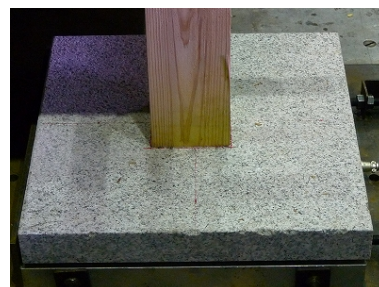
(c) 桁-柱接合部



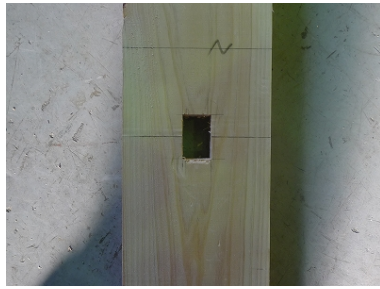
(d) 水平構面



(e) 通し柱と間柱



(f) 柱脚と礎石



(g) 雇いほぞ鼻栓側

(h) 雇いほぞ車知栓側

(i) 乾式土壁

写真 4. 2. 2-1 試験体と設置状況

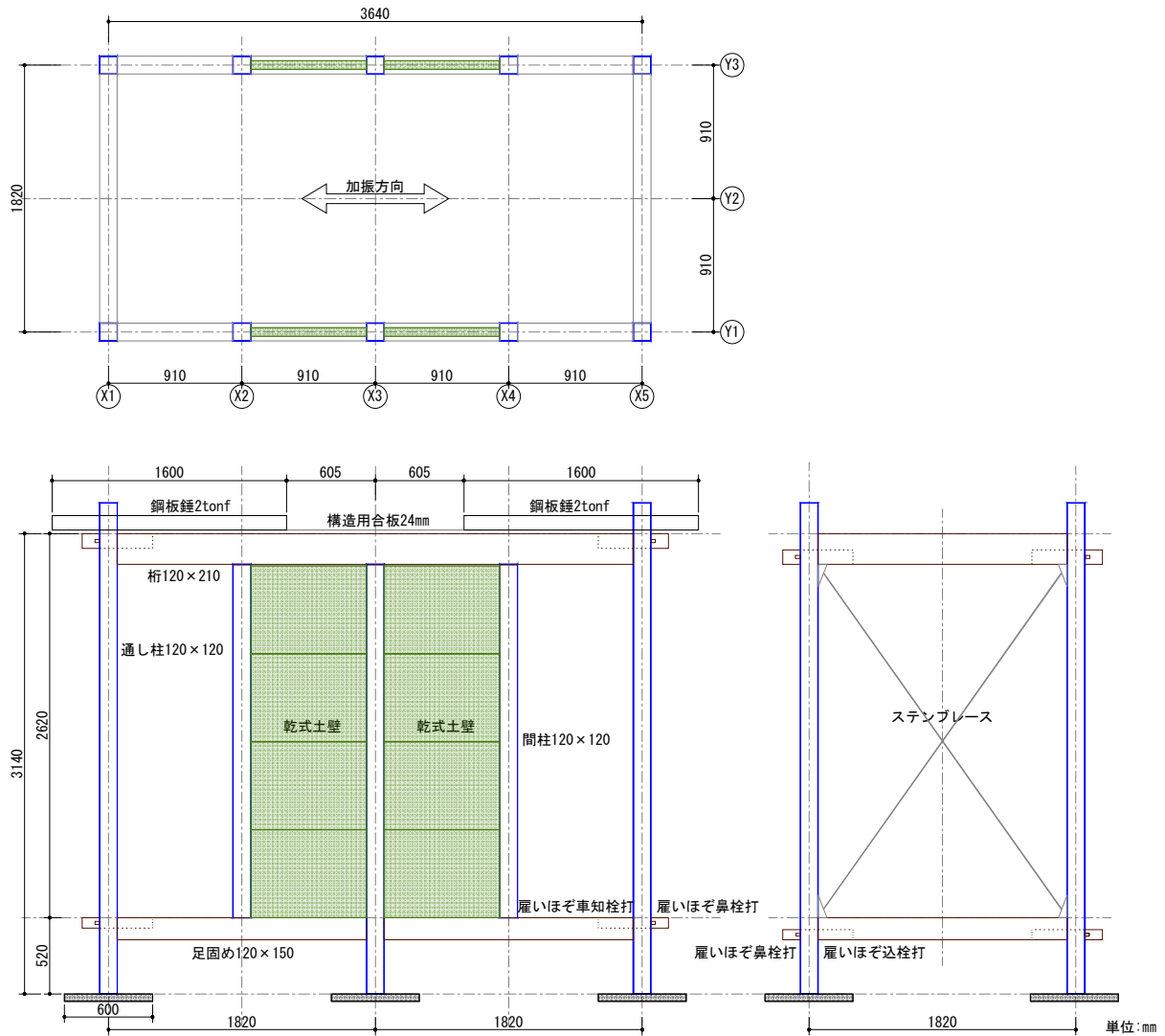
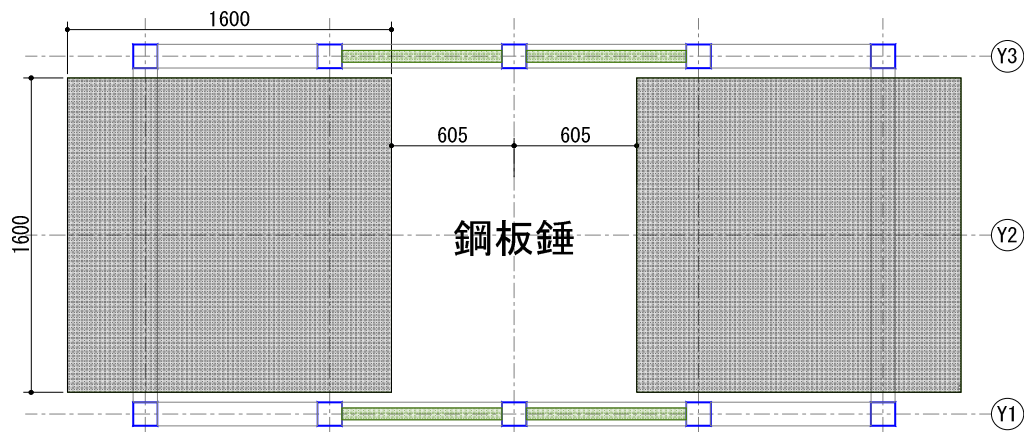


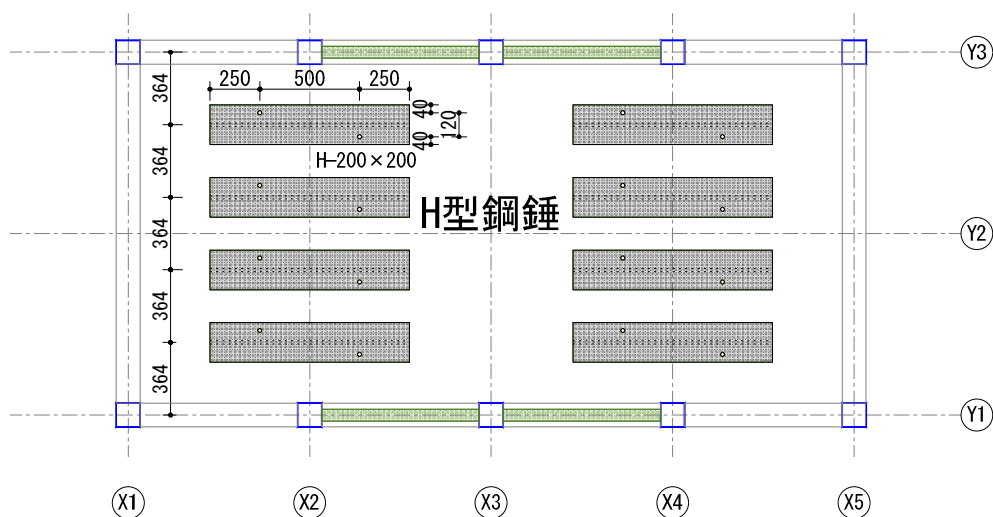
図 4. 2. 2-1 試験体基本図面

試験体載荷重量は、上層の水平構面に鋼板を設置し、下層の水平構面に H 型鋼を設置した。上層の鋼板は、すべり挙動を把握することを目的とした実験であるため、各柱に均等に荷重がかかることが望ましい。そこで、鋼板を設置する際に、柱下部に軸力計を設置し、各柱の軸力を計測しながら設置を行った。下層の鋼板は、すべり挙動と質量効果を確認するために設置する鋼板であり、実験パラメータとして、取り外しやすいように H 型鋼をボルト留めとし、水平構面に対して均等配置とした。図 4.2.2-3 に水平構面に鋼板の設置図

を示し、設置状況を図 4.2.2-4 に示す。試験体重量は、試験体を設置する際に、事前に軸力計を設置して錘を含む試験体総重量を計測し、実験後の試験体解体時に部材ごとに計測した重量を積算して算出した。なお壁配置によって若干変更するが、図 4.2.2-1 に示した基本となる試験体に基づいて、試験体重量、鋼板錘重量、H 型鋼錘重量を表 4.2.2-1 に示す。



(a) 上層の水平構面に設置した鋼板錘



(b) 下層の水平構面に設置した H 型鋼錘

図 4.2.2-3 錘の設置図



(a) 上層の錘



(b) 下層の錘

写真 4.2.2-2 おもりと設置状況

表 4.2.2-1 試験体の重量

試験体軸組等重量		
上層	4.69	kN
下層	4.55	kN
錘重量		
RF錘	98.00	kN
1F錘	3.71	kN
試験体総重量		
	110.96	kN

(3) 実験方法

実験は、加振方向の壁配置と 1F 錘の有無をパラメータとし、試験体 A は Y1 構面に 4P、Y5 構面に 4P の乾式土壁パネルを配置し、試験体 B は、それぞれ 2P と 2P を配置、1F 錘なし、試験体 C はそれぞれ 2P と 2P、1F 錘あり、試験体 D は、それぞれ 1P と 1P、1F 錘ありとした。図 4.2.2-4 に各試験体の壁および 1F 錘の配置図を示し、表 4.2.2-2 に実験パラメータを示す。なお試験体 A は、RF の錘を 10tf として実験を行い、sin 波 1.0Hz、最大入力加速度 150cm/s² の加振にて、通し柱が折損したため、そこで実験を終了し、試験体 B 以降は、RF 錘を 4.0tf とした。

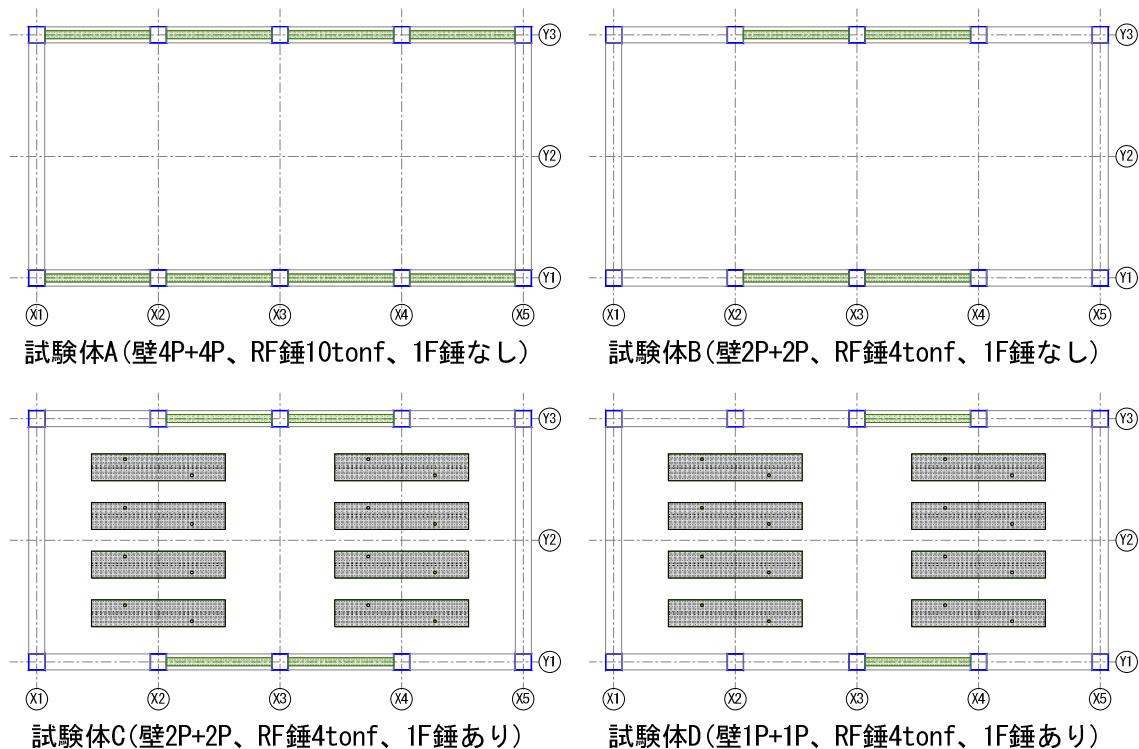


図 4.2.2-4 試験体壁配置

表 4.2.2-2 実験パラメータ

試験体	壁	RF錘	1F錘	備考
A	4P+4P	10tf	あり	正弦波1Hz最大加速度150cm/s ² 加振時に柱が折損
B	2P+2P	4tf	なし	
C	2P+2P	4tf	あり	
D	1P+1P	4tf	あり	

入力は最大入力加速度をパラメータとして、最大入力加速度 25 cm/s² から開始して、25 cm/s² ずつ加速度レベルを上げて、試験体柱脚部のすべり挙動が目視で確認できるまでとした。また最初と最後には、試験体の動特性を確認するため、ホワイトノイズを入力した。

表 4.2.2-3 に各試験体の加振リストを示す。

表 4.2.2-3 試験体加振リスト

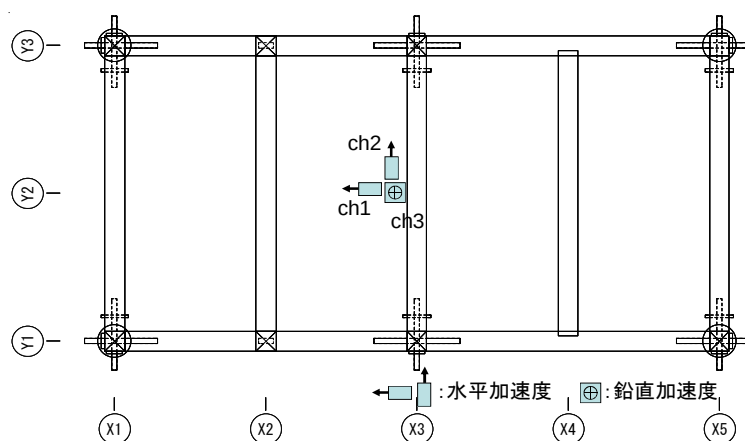
順番号	加振波	入力方向	最大加速度 (cm/s ²)	試験体A	試験体B	試験体C	試験体D
				○：加振、－：加振なし			
1	ホワイトノイズ	X	10	○	○	○	○
2	ホワイトノイズ	Y	10	○	○	○	○
3	sin1.0Hz	X	50	○	－	－	－
4	sin1.0Hz	X	100	○	－	－	－
5	sin1.0Hz	X	150	○	－	－	－
6	sin2.0Hz	X	50	－	○	○	－
7	sin2.0Hz	X	100	－	○	○	－
8	sin2.0Hz	X	125	－	○	－	－
9	sin2.0Hz	X	150	－	○	○	－
10	sin2.0Hz	X	175	－	○	－	－
11	sin2.0Hz	X	200	－	○	○	－
12	sin2.0Hz	X	225	－	○	－	－
13	sin2.0Hz	X	250	－	○	－	－
14	sin2.0Hz	X	275	－	○	○	－
15	sin2.0Hz	X	300	－	－	○	－
16	sin2.0Hz	X	325	－	－	○	－
17	sin2.0Hz	X	350	－	－	○	－
18	sin2.0Hz	X	400	－	－	○	－
19	BCJ-L2	X	50	－	○	○	－
20	BCJ-L2	X	100	－	○	○	○
21	BCJ-L2	X	150	－	○	○	－
22	BCJ-L2	X	200	－	○	○	－
23	BCJ-L2	X	250	－	○	○	－
24	BCJ-L2	X	275	－	○	○	－
25	BCJ-L2	X	300	－	○	○	－
26	BCJ-L2	X	325	－	○	○	－
27	BCJ-L2	X	350	－	○	○	○
28	BCJ-L2	X	375	－	－	○	－
29	BCJ-L2	X	400	－	－	○	－
30	JMA-Kobe		818	－	－	－	○
31	ホワイトノイズ	X	10	－	－	○	○
32	ホワイトノイズ	Y	10	－	－	○	○
33	ホワイトノイズ	X	10	－	－	○	－
34	ホワイトノイズ	Y	10	－	－	○	－

(1) sin**Hz：正弦波、(2)BCJ-L2：建築センター波レベル2

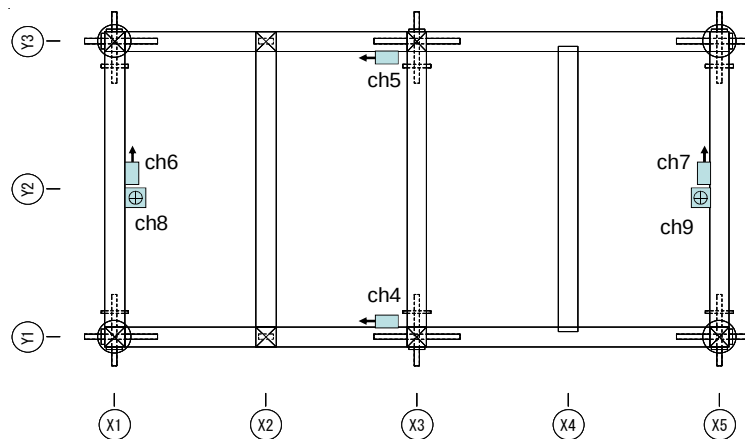
(3) JMA-Kobe：兵庫県南部地震神戸海洋気象台観測記録

(4) 計測方法

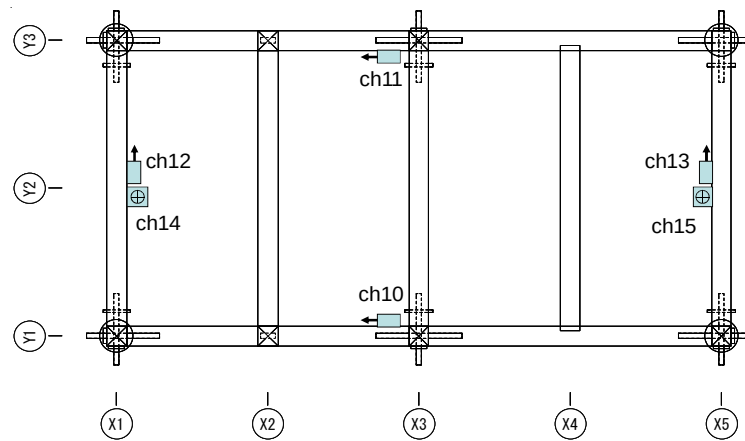
計測は、加速度計、変位計、ひずみゲージ、軸力計を用いて、計測サンプリング周波数1000Hzで、加振開始数秒前から加振終了数秒後まで行った。加速度計は振動台上、1F床レベル、桁レベルに設置し、変位計は桁レベル、1F床レベル、柱脚レベルにレーザー変位計を設置している。桁レベルと足固めレベルは、振動台外部に設置されている安全フレームからの絶対変位計測とし、柱脚部のレーザー変位計は振動台に固定して相対変位計測とした。柱脚部の相対変位計測により、柱脚部のすべり量を計測した。柱の浮き上がりは、柱脚部に接触型変位計を側面に取り付けて計測した。ひずみゲージは、柱頭と柱脚の柱-足固め接合部上下に貼り付けて、軸力、曲げモーメントを計測した。軸力計測は、礎石と柱の間に軸力計も設置して計測を行った。図 4.2.2-5 に計測器の設置図を示す。



(1) 振動台レベル (TL)

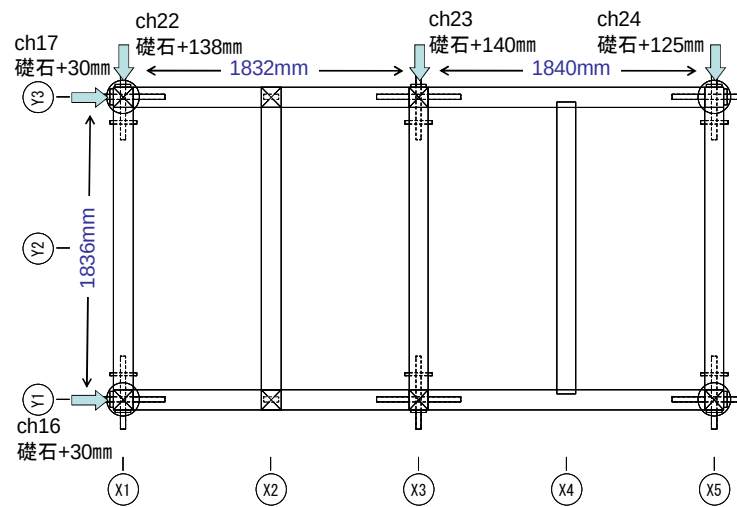


(2) 1F 床レベル (礎石レベル+520 mm)

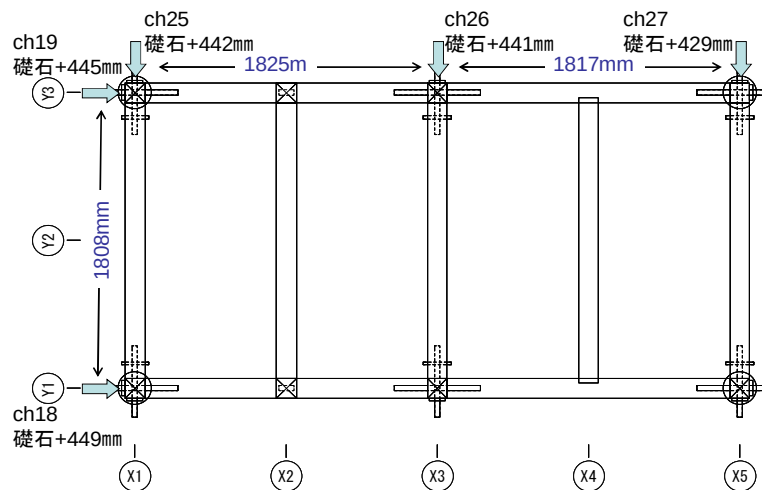


(3) 桁レベル (礎石+3140 mm)

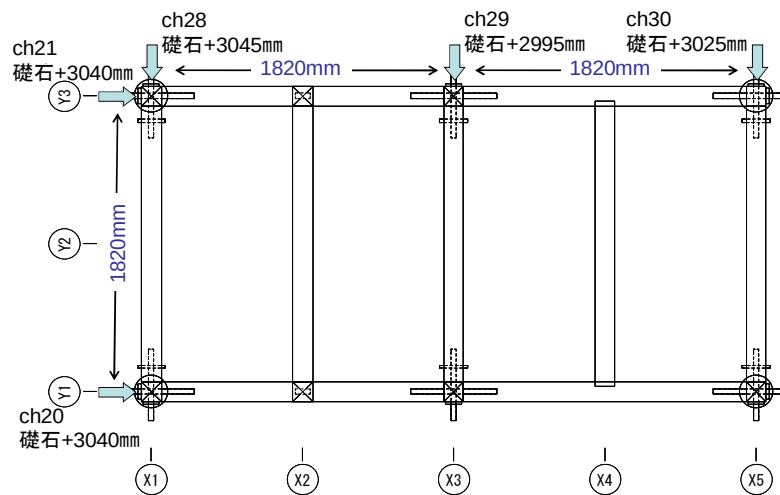
(a) 加速度計測



(b) 柱脚部のすべり (レーザー計測、相対変位)

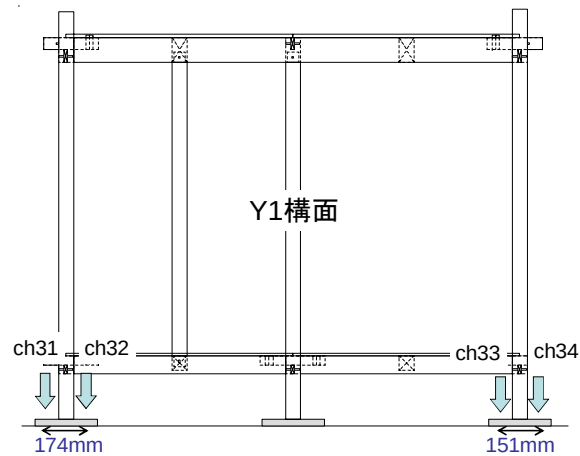


(1) 足固めレベル

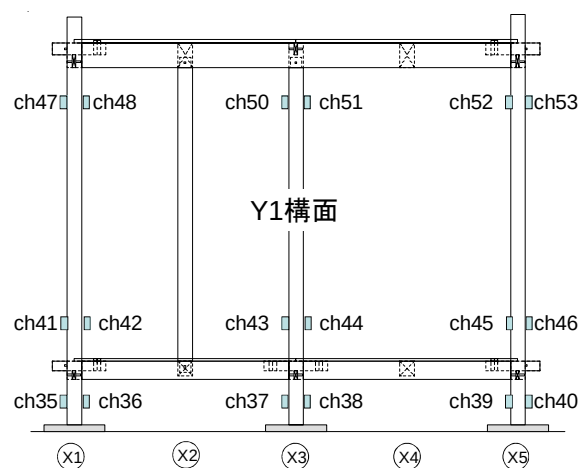


(2) 桁レベル

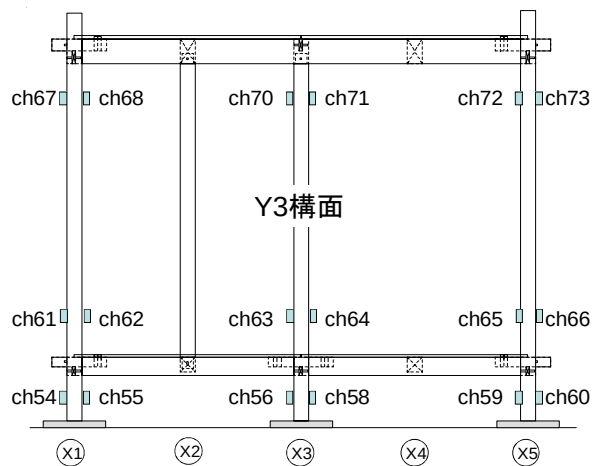
(c) 試験体の変位 (レーザー計測、絶対変位)



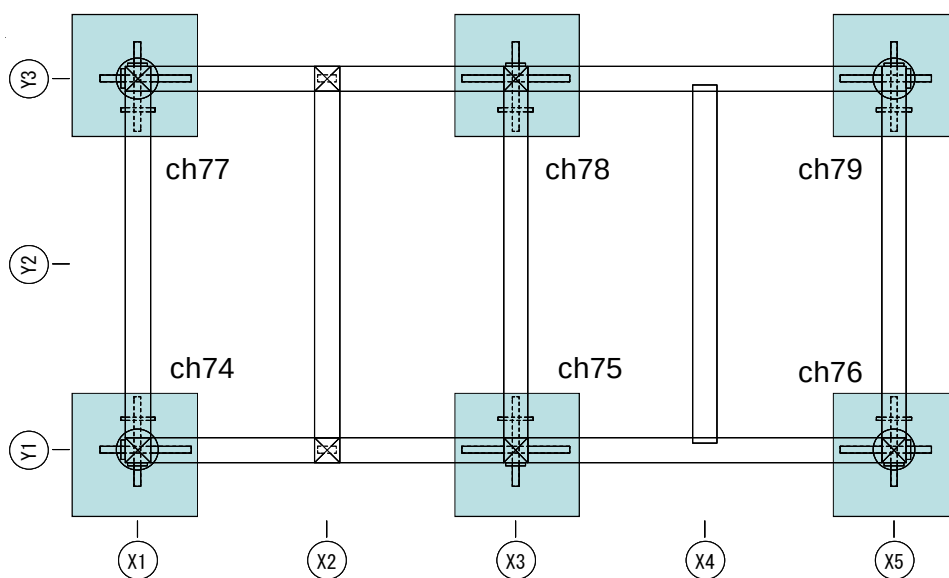
(d) 柱脚の浮き上がり



(1) Y1 構面



(2) Y3 構面
(e) 柱のひずみ



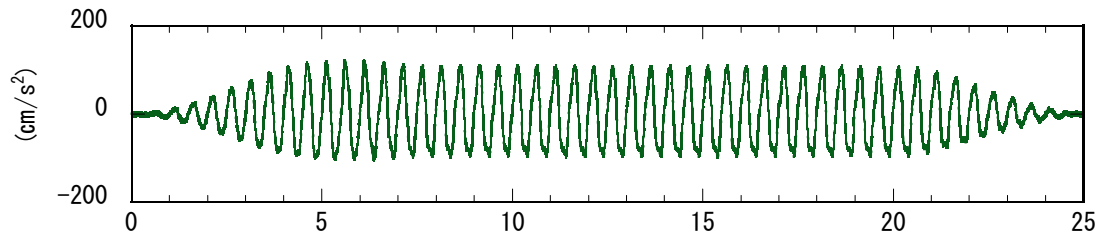
(f) 柱の軸力 (軸力計)

図 4.2.2-5 計測器の配置

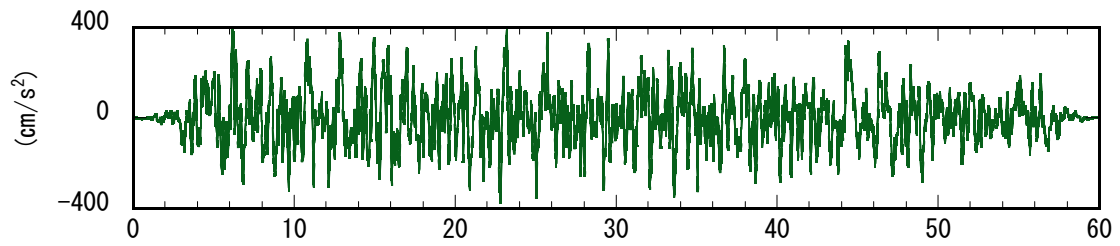
(5) 入力波

実験に用いた入力波は正弦波 1.0Hz と 2.0Hz(sin1.0、2.0)と建築センター波レベル 2(BCJ-L2)を用いた。図 7 に実験で使用した入力波(BCJ-L2G2)示す。

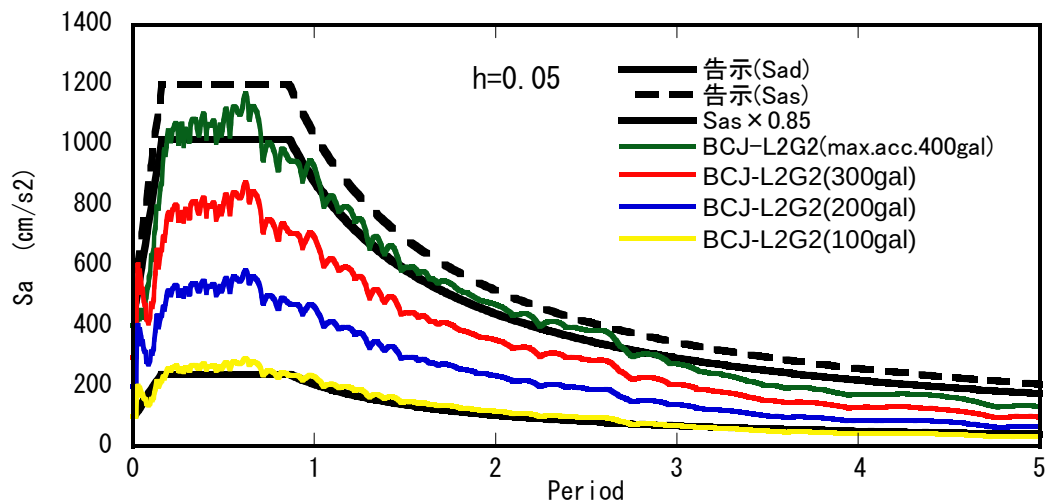
また実験の前後において、動特性を検証するためにホワイトノイズ波(0.03~20Hz)を用いた。図 4.2.2-6 に sin 波、BCJ-L2 波、ホワイトノイズ波の時刻歴波形と BCJ-L2 波の加速度応答スペクトルを示す。



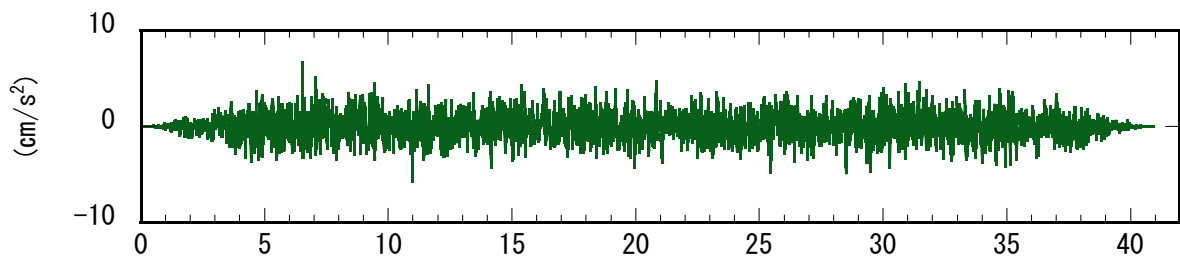
(a) $\sin 2.0\text{Hz}$ の時刻歴波形



(b) BCJ-L2G2 の時刻歴波形



(c) BCJ-L2G2 の応答スペクトル



(d) ホワイトノイズの時刻歴波形

図 4.2.2-6 入力波

(6) 実験結果

1) 実験データの処理

得られたデータのうち、加速度データは図 4.2.2-7 に示すウインドウによるローパスフィルター処理を行った。また 5.3 節に示す履歴特性では、加速度データを同図に示すバンドパスフィルター処理を行った。

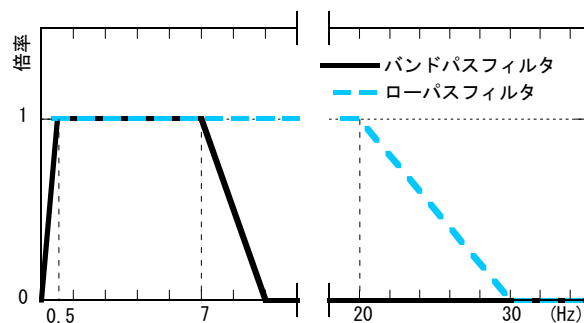


図 4.2.2-7

歪みゲージによる柱の軸力および曲げモーメントは、柱 2 面に貼り付けた歪みゲージの計測値から、軸力成分と曲げ成分を抽出して算出した。その際のヤング係数、ゲージファクター、断面積、断面係数を表 4.2.2-4 に示す。

表 4.2.2-4

木材ヤング係数	—	11000	N/mm ²
柱断面積	120×120	14400	mm ²
柱断面係数	(120×120 ²)/6	288000	mm ³
ゲージファクター	2/2.12	0.943	

柱の浮き上がりは、柱脚部の柱側面に設置したレーザー変位計の計測値から、浮き上がり成分を抽出して算出した。図 4.2.2-8 に柱脚の浮き上がり模式図を示す。

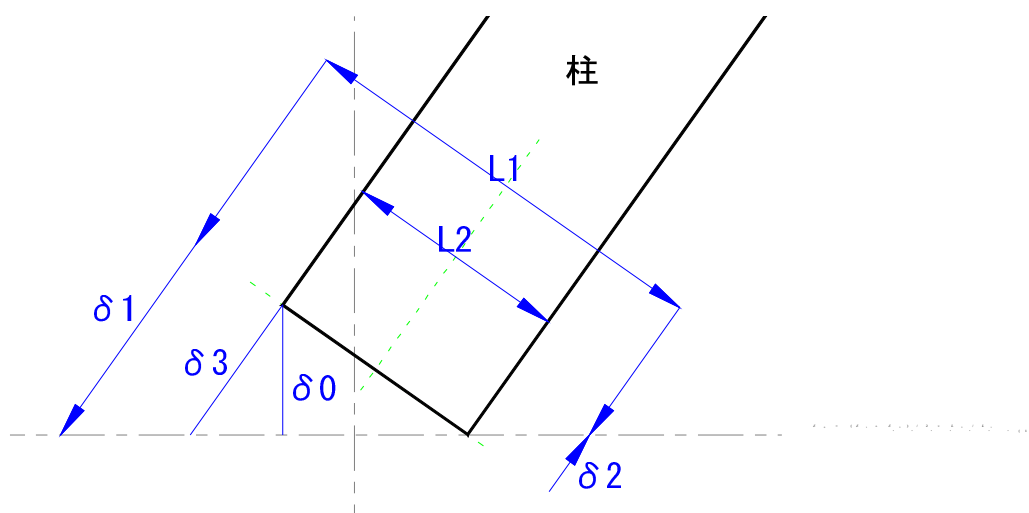
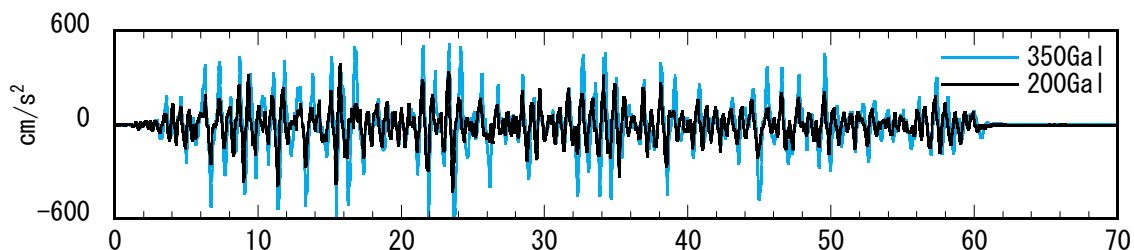


図 4.2.2-8 柱の浮き上がりの算出方法

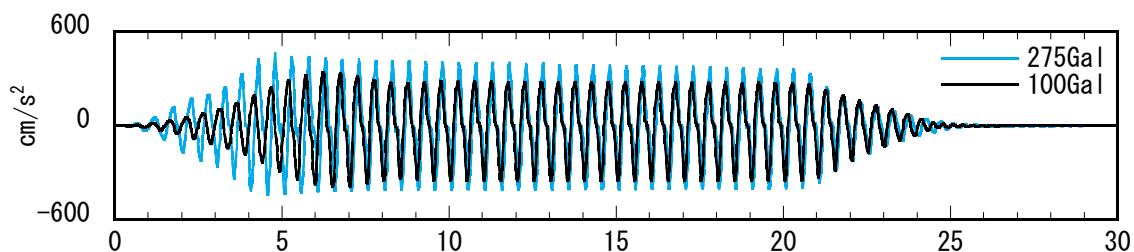
2) 時刻歴波形

① 応答加速度

試験体 B、C において入力波 BCJ-L2 波では入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時、SIN 波では入力加速度 100cm/s² 時と最も大きく入力した時、試験体 D は加振した全ての桁レベルで計測された応答加速度の時刻歴をそれぞれ図 4.2.2-9～4.2.2-11 に示す。

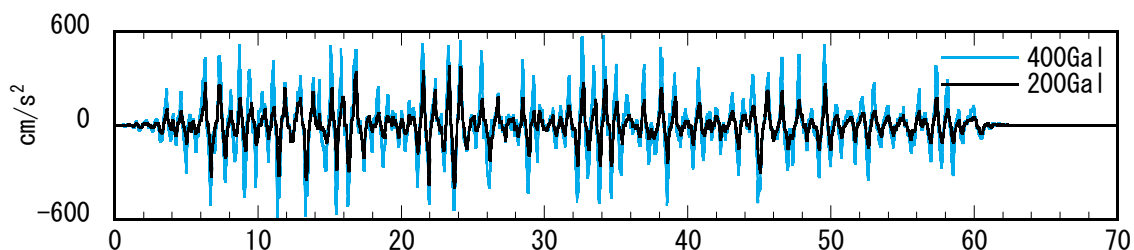


試験体 B BCJ-L2 波 桁レベル

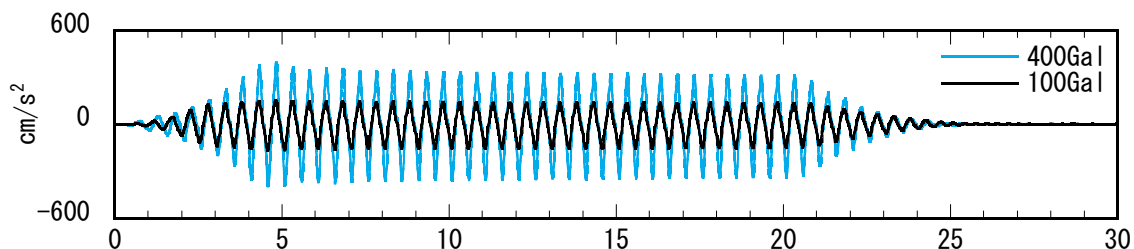


試験体 B sin 波 桁レベル

図 4.2.2-9 試験体 B の応答加速度 (最大入力加速度 400gal)

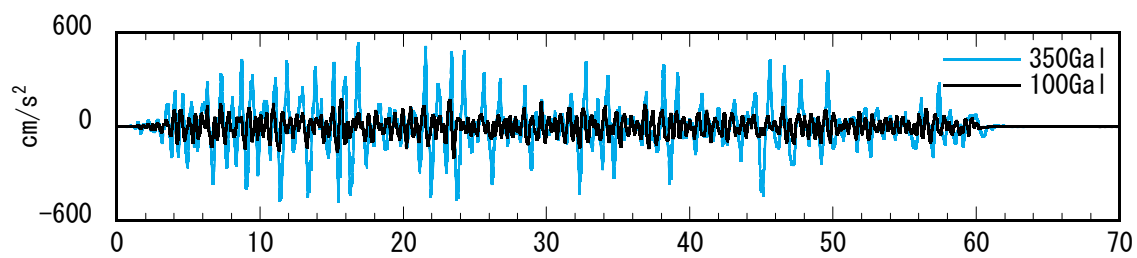


試験体 C BCJ-L2 波 桁レベル

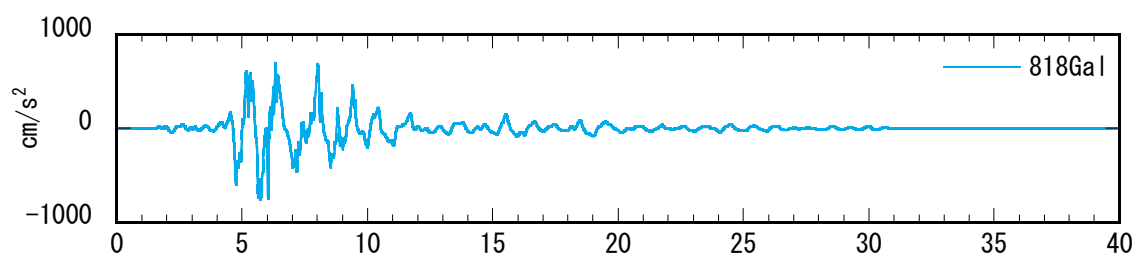


試験体 C sin 波 桁レベル

図 4.2.2-10 試験体 C の応答加速度



試験体 D BCJ-L2 波 桁レベル

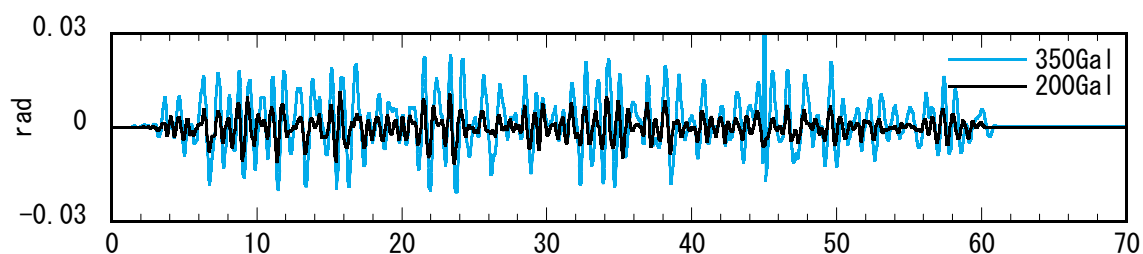


試験体 D JMA-KOBE 波 桁レベル

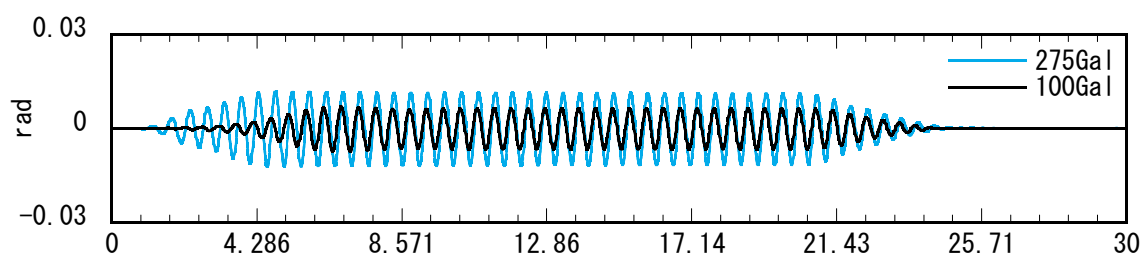
図 4.2.2-11 試験体 C の応答加速度

②応答層間変形角

応答加速度の時刻歴波形と同様に試験体 B、C は入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時、試験体 D は入力した全ての桁-足固め間の層間変形角の時刻歴をそれぞれ図 4.2.2-12～4.2.2-14 に示す。

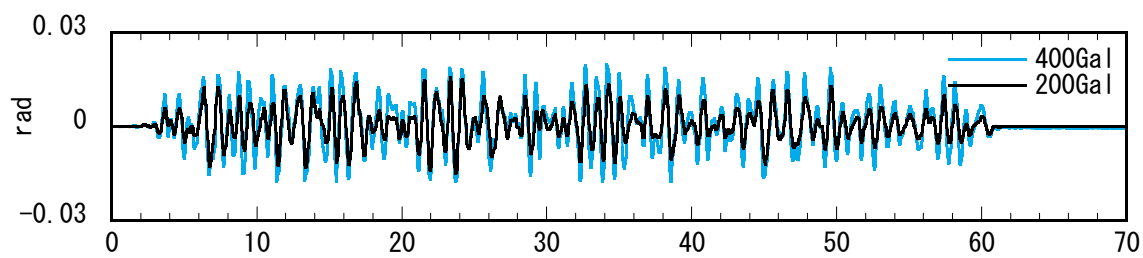


試験体 B BCJ-L2 波

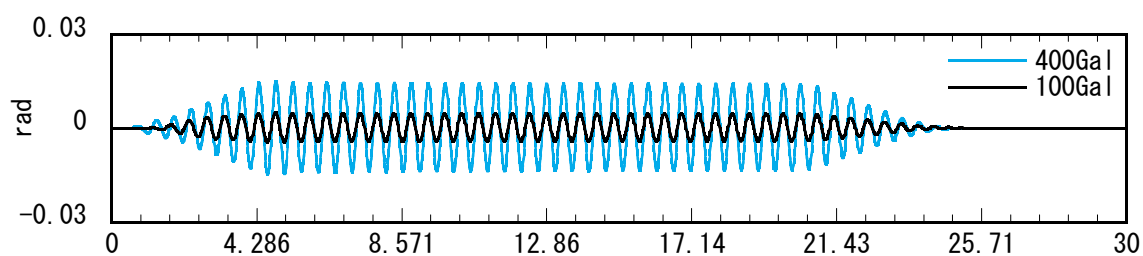


試験体 B sin 波

図 4.2.2-12 試験体 B の応答層間変形角

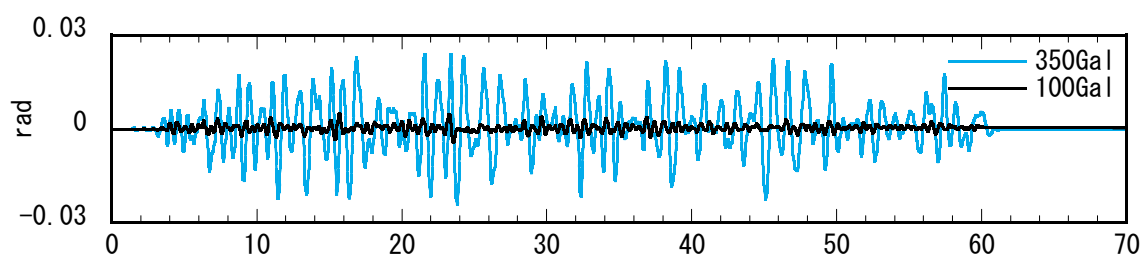


試験体 C BCJ-L2 波



試験体 C sin 波

図 4.2.2-13 試験体 C の応答層間変形角

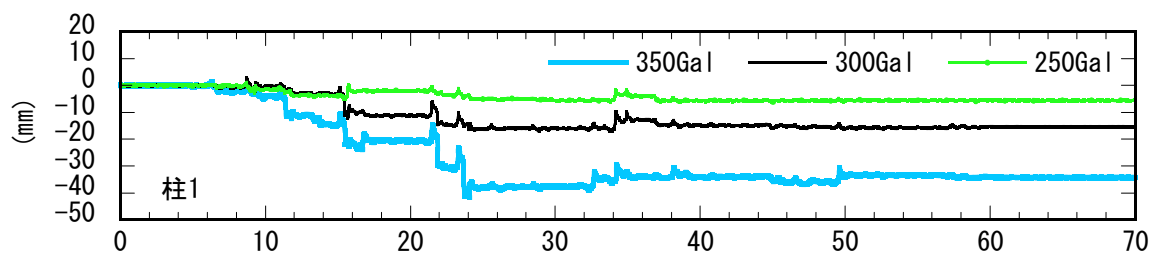


試験体 D BCJ-L2 波

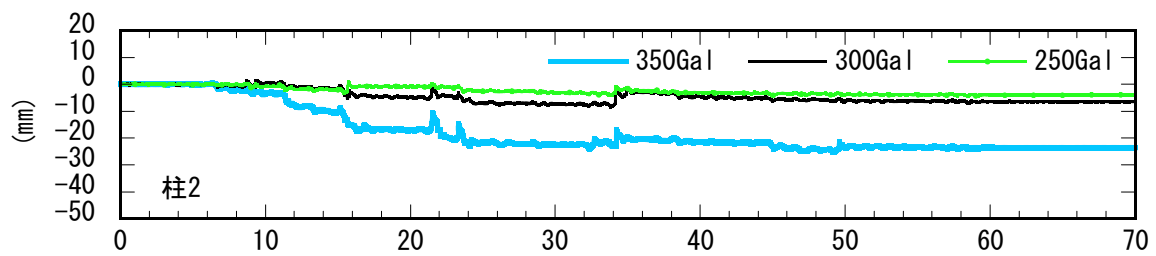
図 4.2.2-14 試験体 D の応答層間変形角

③柱脚部のすべり

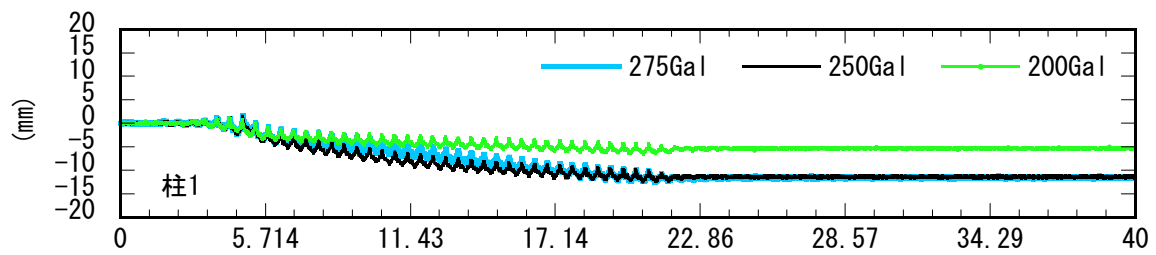
各試験体において入力加速度 200 cm/s^2 以降の柱脚すべりの時刻歴を計測した柱ごとにそれぞれ図 4.2.2-15～4.2.2-17 に示す。



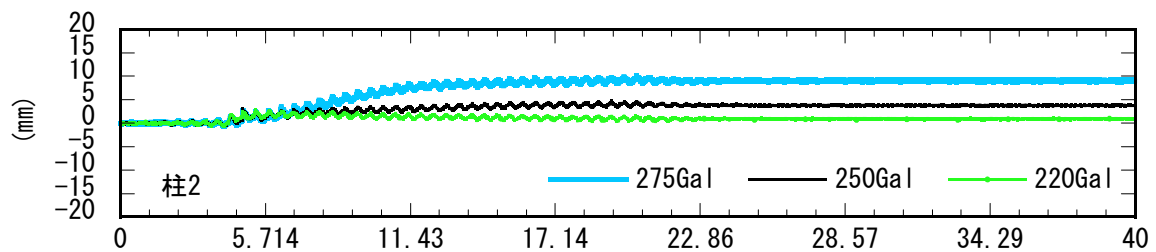
試験体 B BCJ-L2 波 柱 1



試験体 B BCG-L2 波 柱 2

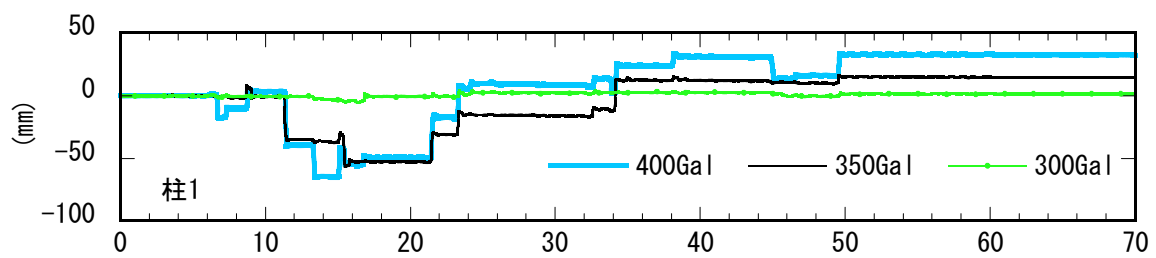


試験体 B sin 波 柱 1

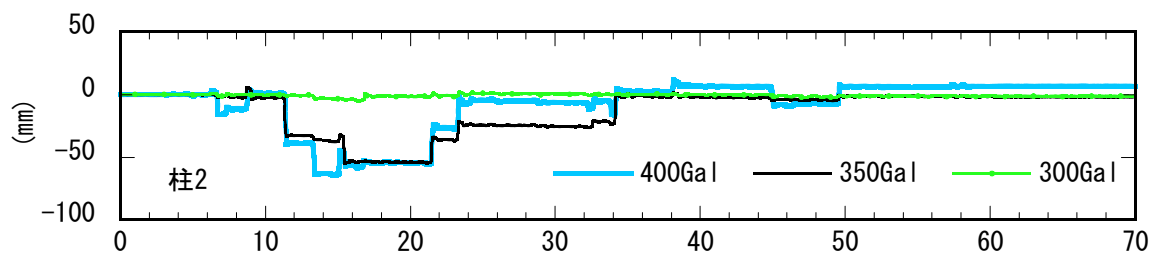


試験体 B sin 波 柱 2

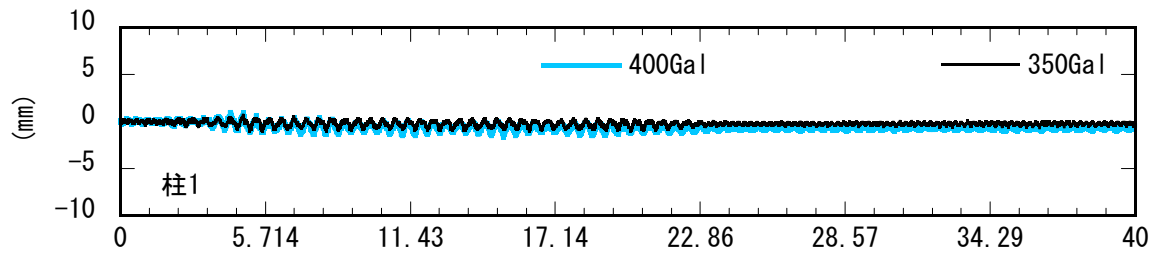
図 4.2.2-15 試験体 B の柱脚すべり



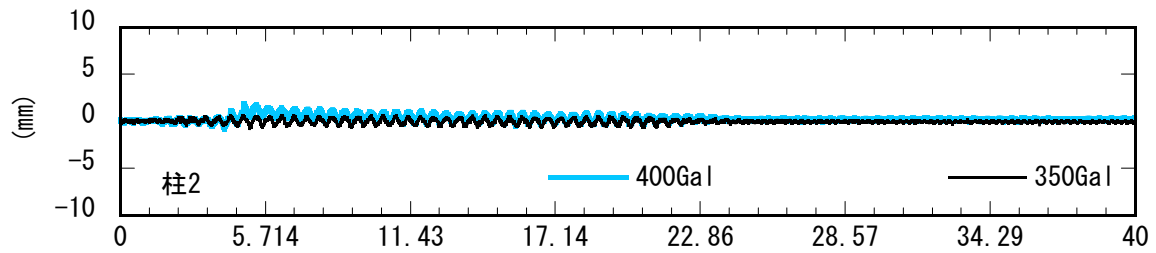
試験体 C BCG-L2 波 柱 1



試験体 C BCG-L2 波 柱 2

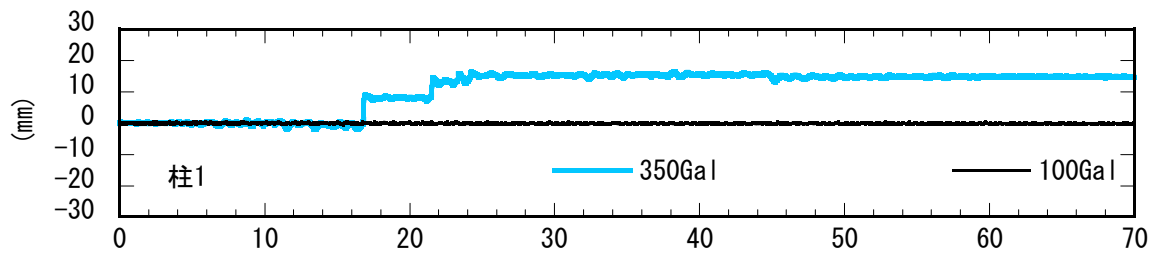


試験体 C sin 波 柱 1

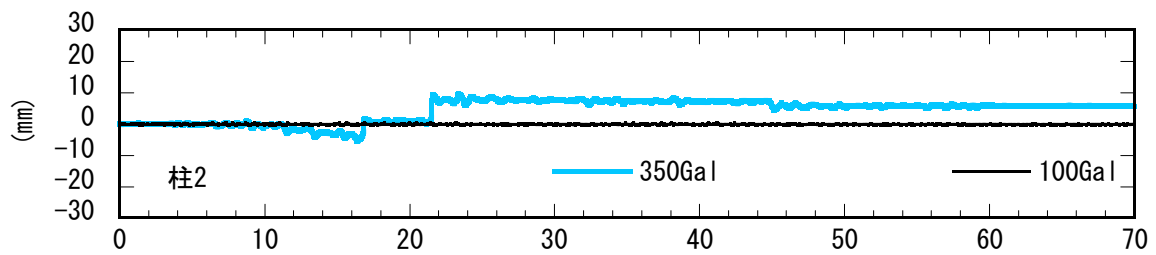


試験体 C sin 波 柱 2

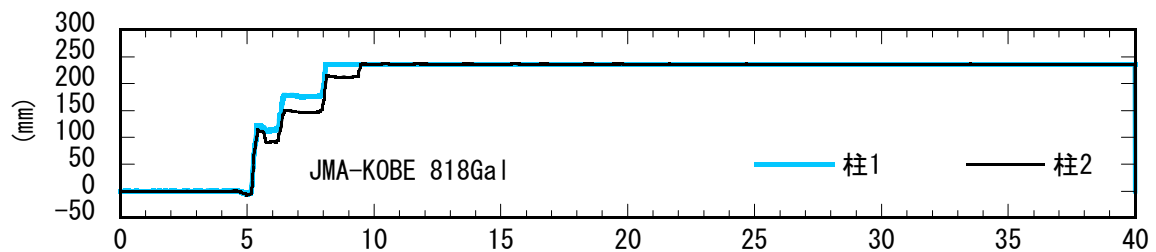
図 4.2.2-16 試験体 C の柱脚すべり



試験体 D BCJ-L2 波 柱 1



試験体 D BCJ-L2 波 柱 2

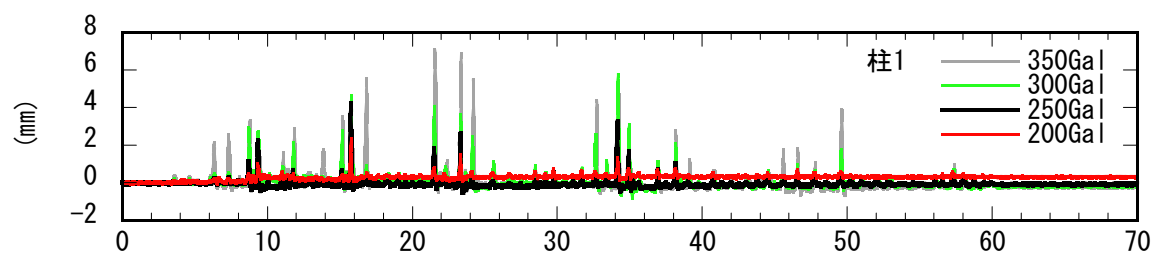


試験体 D JMA-KOBE 波 柱 1 と 2

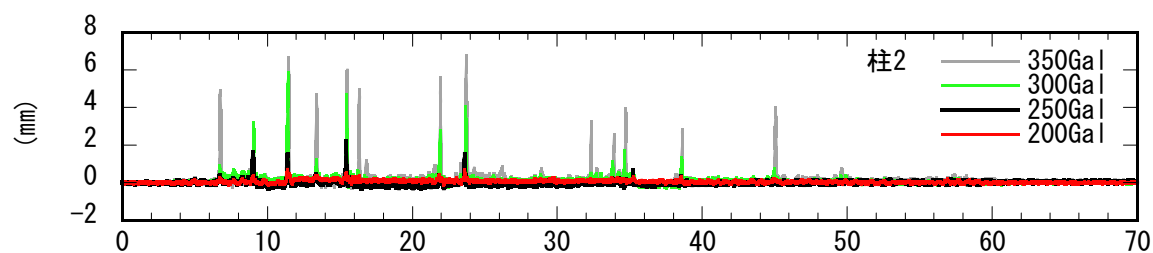
図 4.2.2-17 試験体 D の柱脚すべり

④柱脚部の浮き上がり

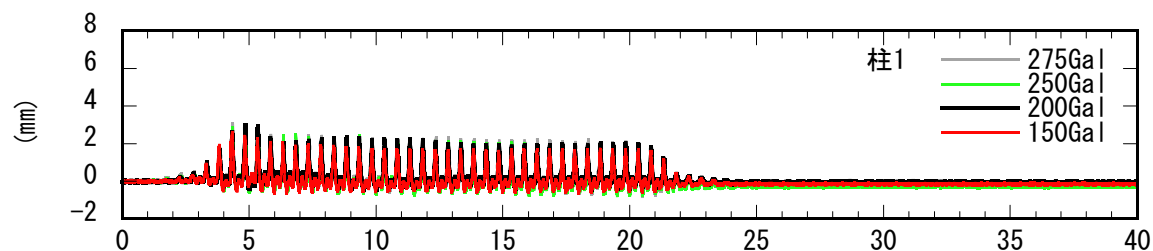
各試験体において BCJ-L2 波では入力加速度 200 cm/s² 以降、sin 波では入力加速度 150cm/s² 以降の柱脚部浮き上がりの時刻歴をそれぞれ図 4.2.2-18～4.2.2-20 に示す。



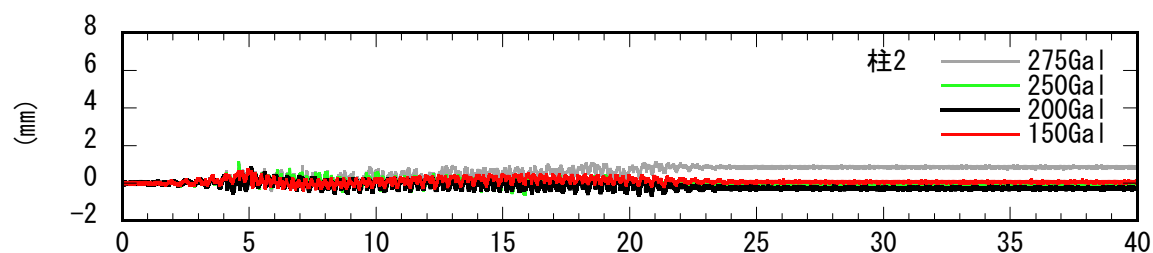
試験体 B BCJ-L2 波 柱 1



試験体 B BCJ-L2 波 柱 2

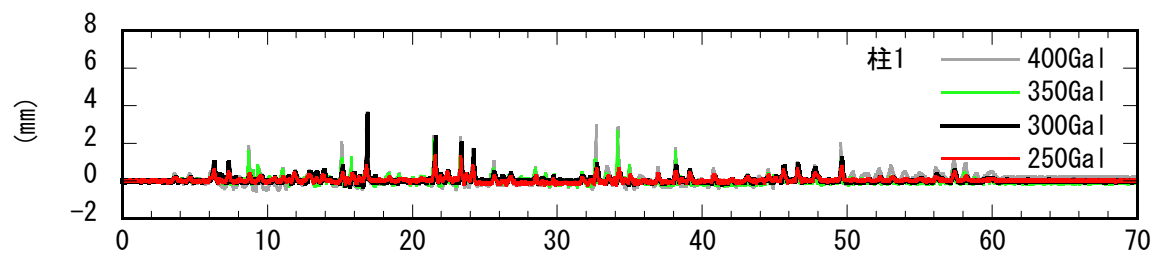


試験体 B SIN 波 柱 1

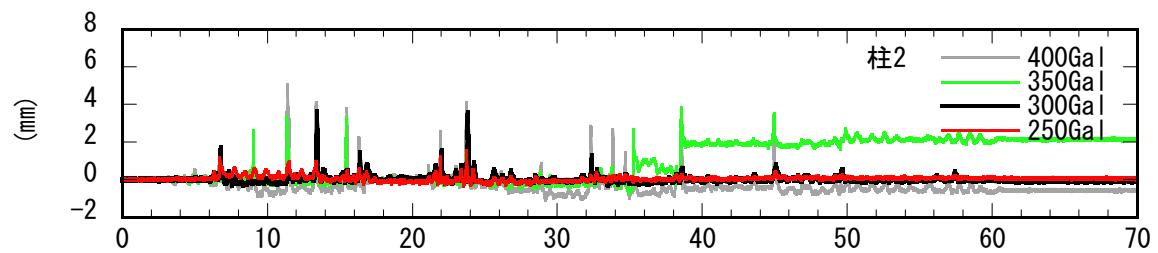


試験体 B SIN 波 柱 2

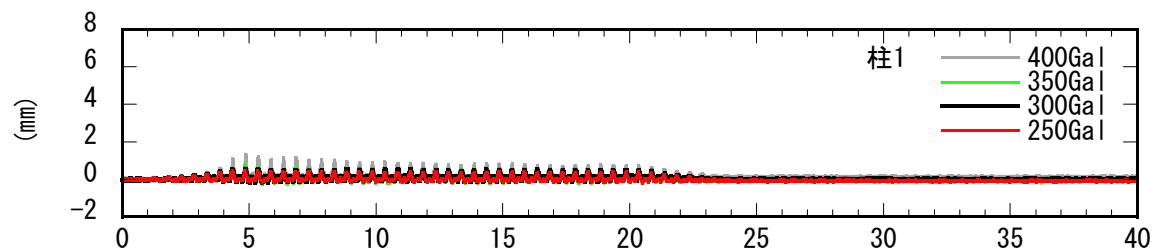
図 4. 2. 2-18 試験体 B 柱の浮き上がり



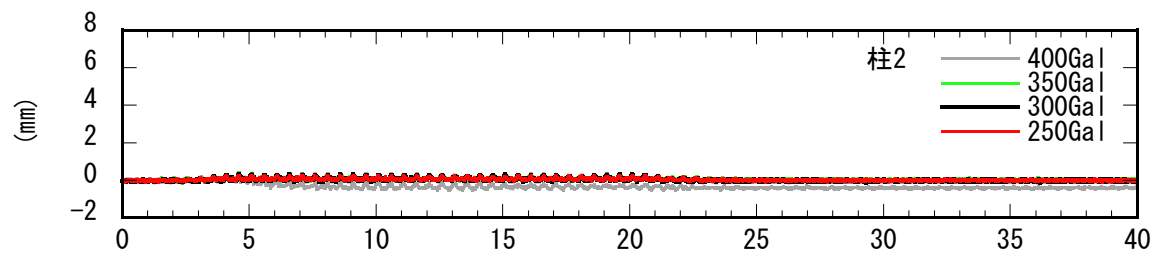
試験体 C BCJ-L2 波 柱 1



試験体 C BCJ-L2 波 柱 2

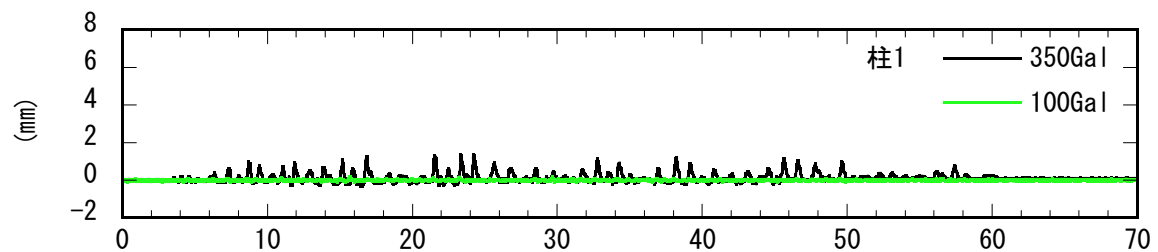


試験体 C SIN 波 柱 1

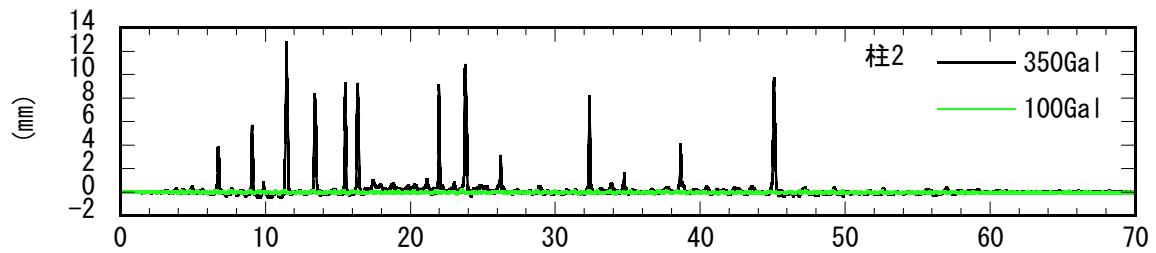


試験体 C SIN 波 柱 2

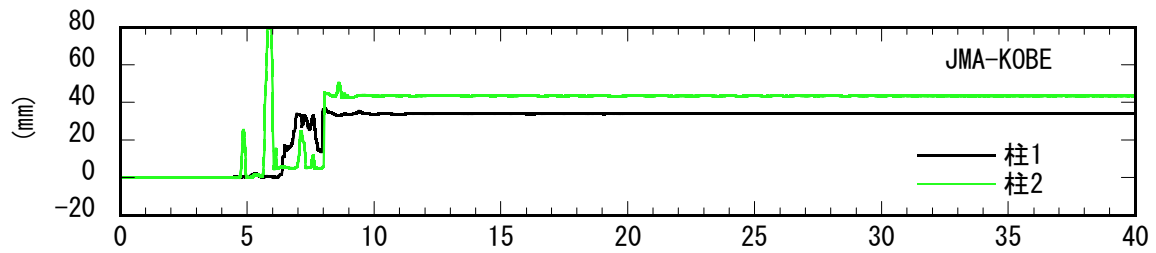
図 4. 2. 2-19 試験体 C 柱の浮き上がり



試験体 D BCJ-L2 波 柱 1



試験体 D BCJ-L2 波 柱 2

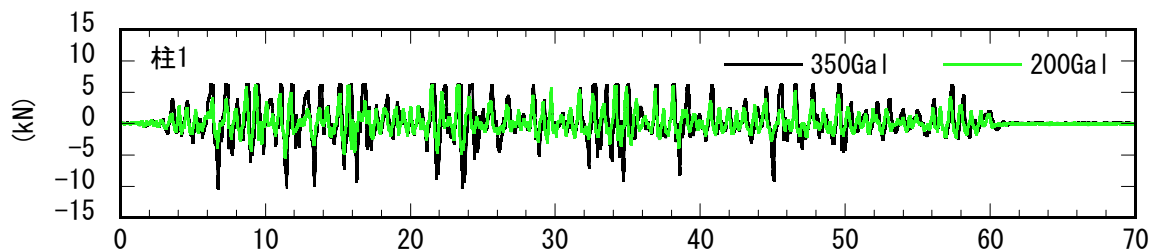


試験体 D JMA-KOBE 波 柱 1 と 2

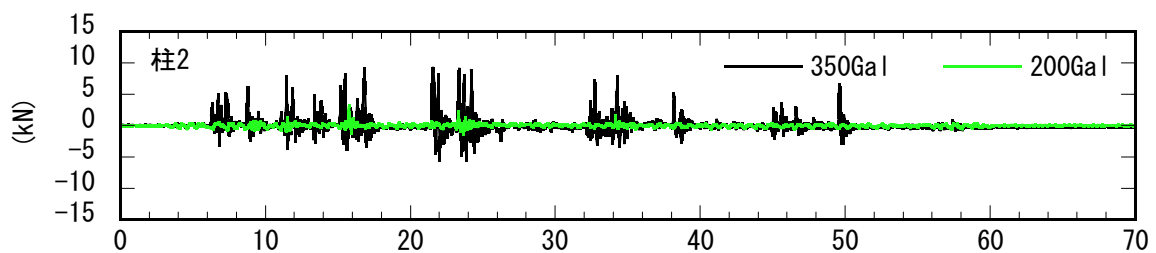
図 4.2.2-20 試験体 D 柱 1 の浮き上がり

⑤軸力

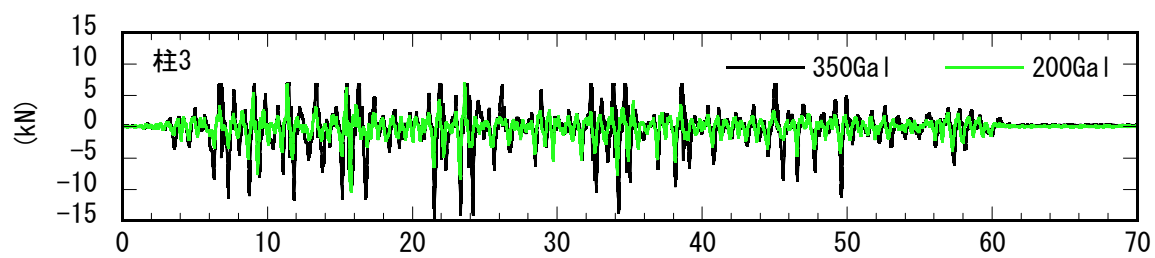
各試験体において、BCJ-L2 波では入力加速度 200 cm/s²、sin 波では 100cm/s² 時とそれぞれ最も大きく入力した時のロードセルで計測された柱 1、2、3 の変動軸力の時刻歴をそれぞれ図 4.2.2-21～4.2.2-23 に示す。



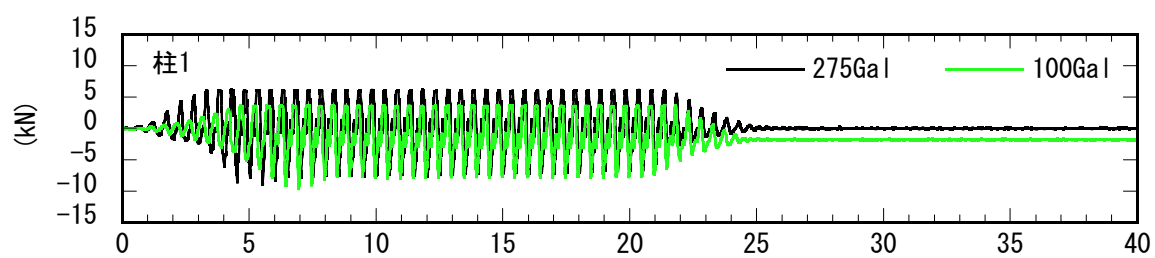
試験体 B BCJ-L2 波 柱 1



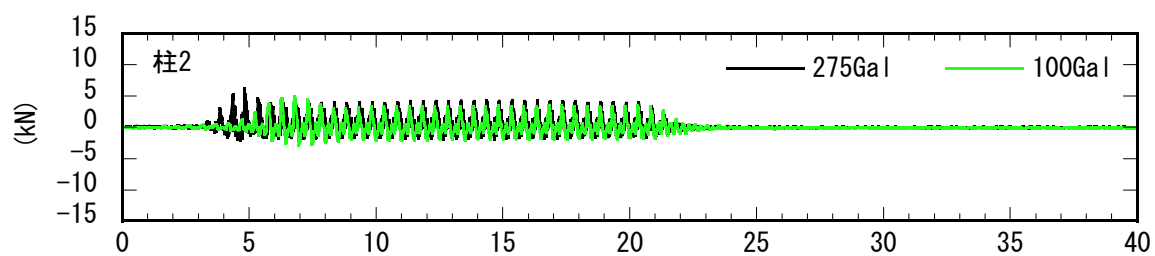
試験体 B BCJ-L2 波 柱 2



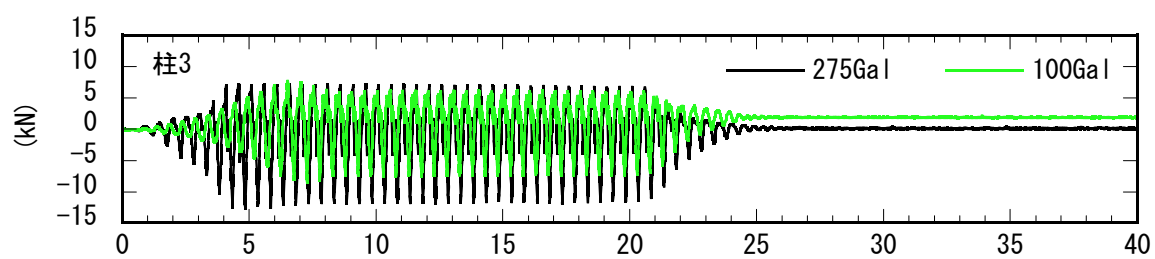
試験体 B BCJ-L2 波 柱 3



試験体 B sin 波 柱 1

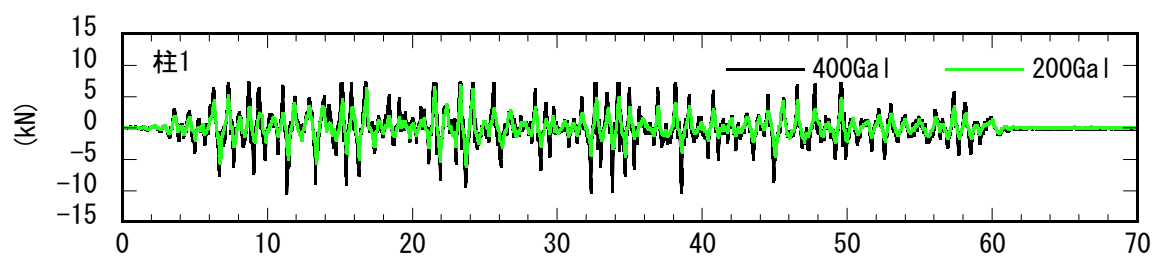


試験体 B sin 波 柱 2

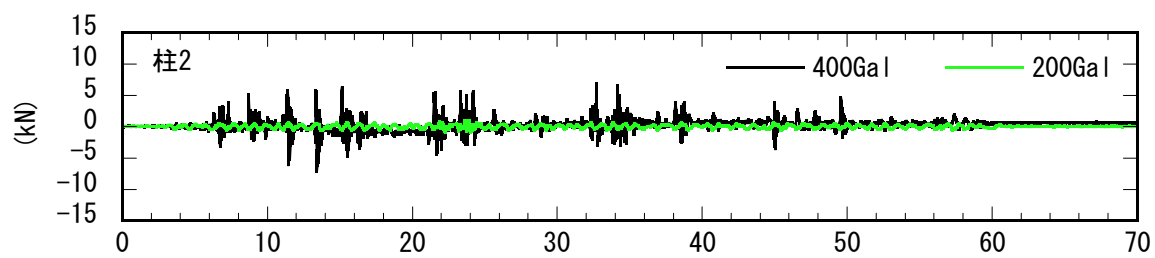


試験体 B sin 波 柱 3

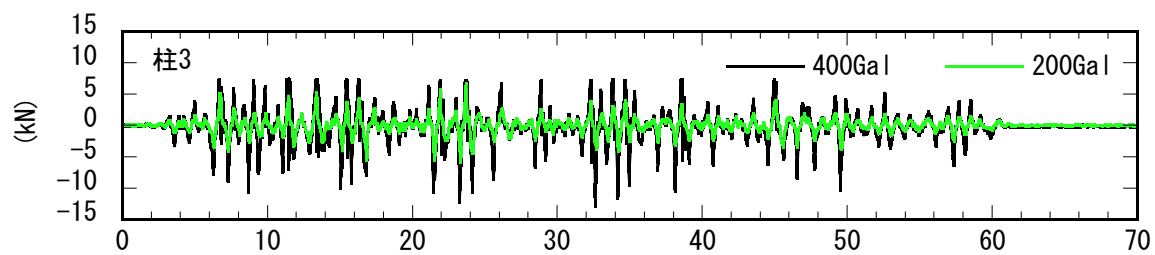
図 4.2.2-21 試験体 B の変動軸力



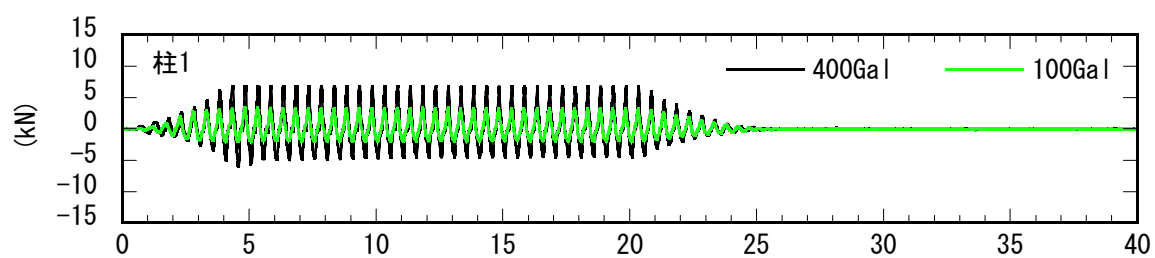
試験体 C BCJ-L2 波 柱 1



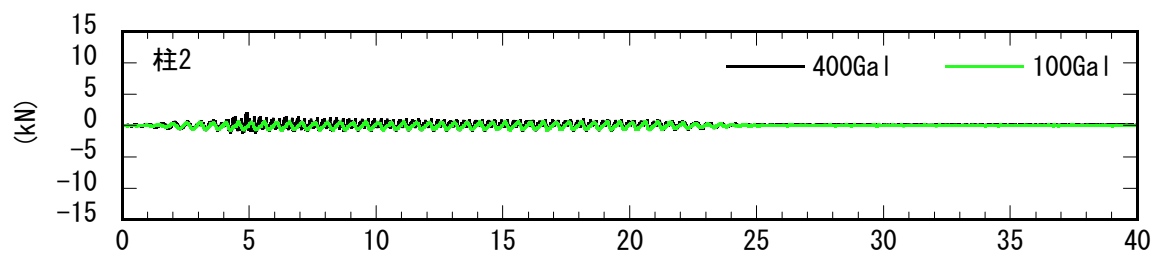
試験体 C BCJ-L2 波 柱 2



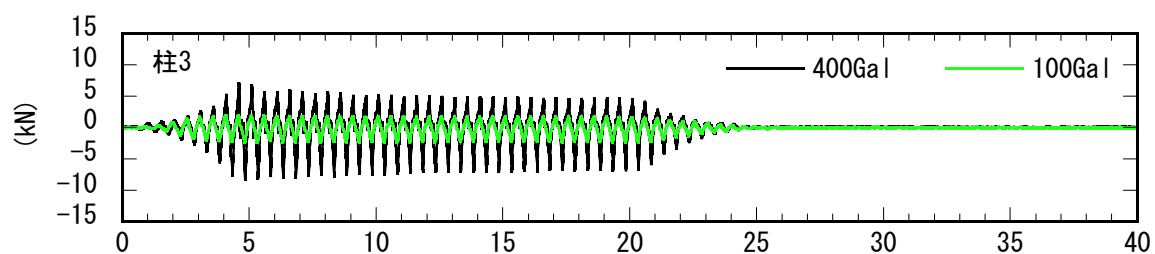
試験体 C BCJ-L2 波 柱 3



試験体 C sin 波 柱 1

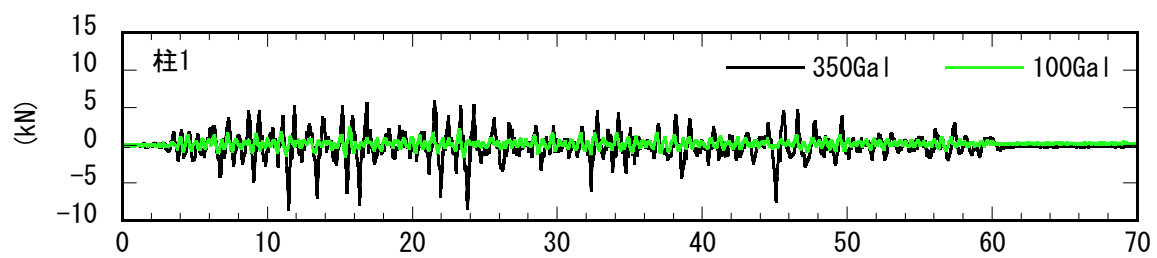


試験体 C sin 波 柱 2

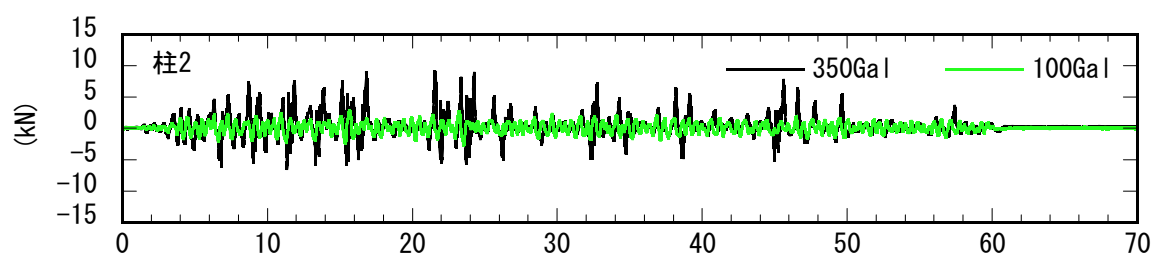


試験体 C sin 波 柱 3

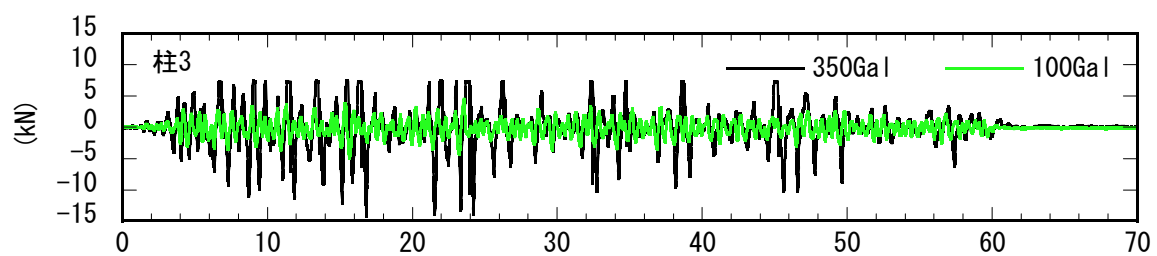
図 4.2.2-22 試験体 C の変動軸力



試験体 D BCJ-L2 波 柱 1



試験体 D BCJ-L2 波 柱 2



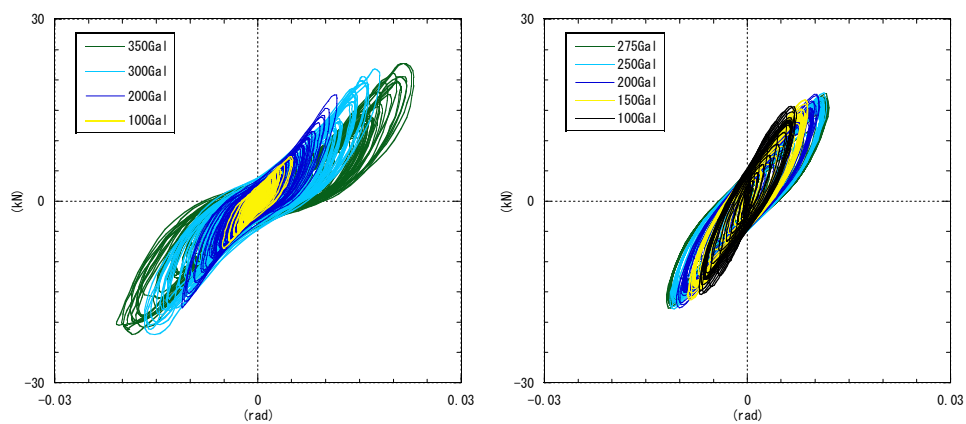
試験体 D BCJ-L2 波 柱 3

図 4.2.2-23 試験体 D の変動軸力

3) 履歴特性

① 復元力-変形角関係

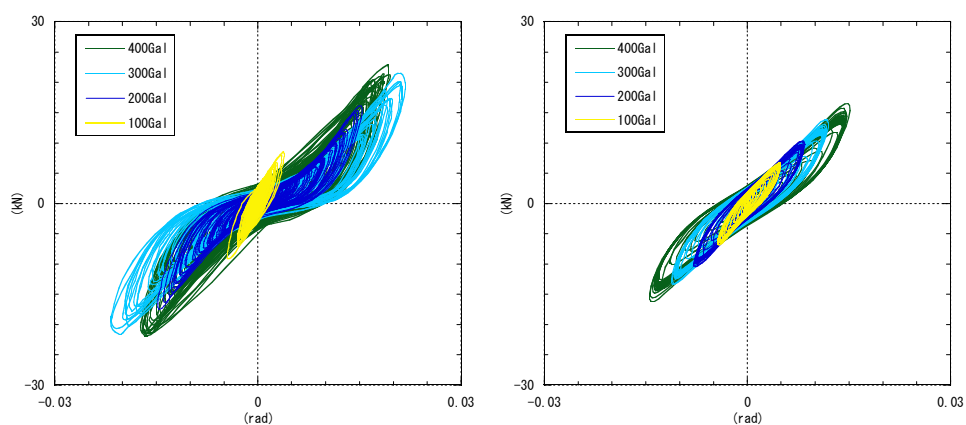
図 4.2.2-24(a)～(c)に各試験体の入力波 BCJ-L2 波および sin 波における復元力と層間変形角関係を構面ごとに示す。



(1) BCJ-L2 波

(2) sin 波

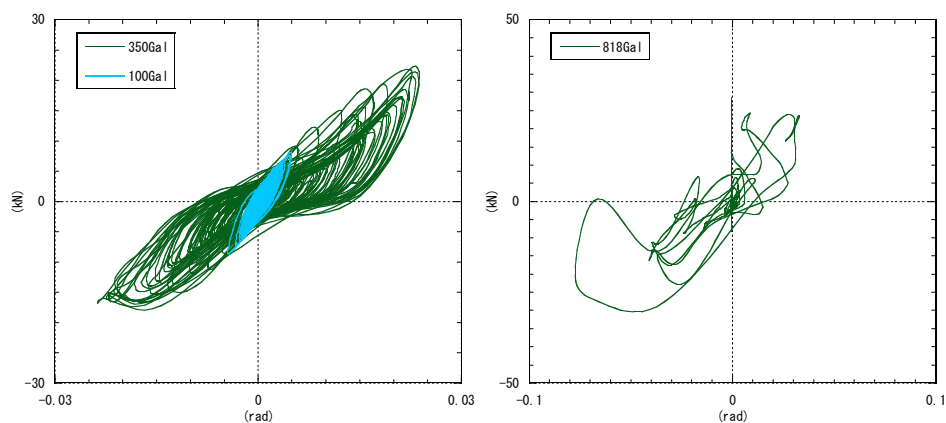
(a) 試験体 B



(1) BCJ-L2 波

(2) sin 波

(b) 試験体 C



(1) Y1 構面

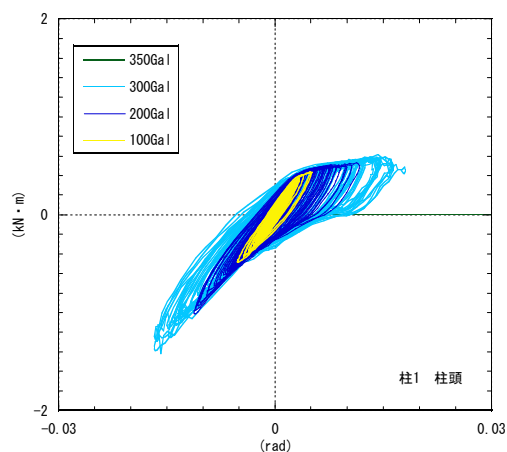
(2) Y5 構面

(c) 試験体 D

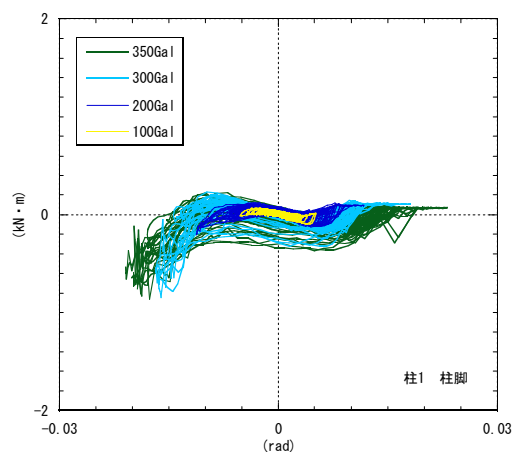
図 4.2.2-24 復元力-層間変形角関係

4) 曲げモーメント-変形角関係

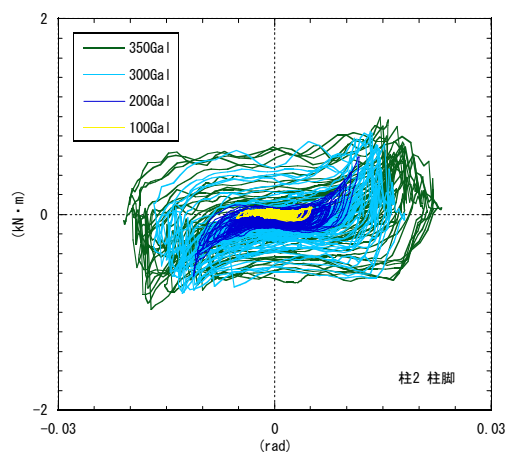
ひずみゲージは 4 隅の通し柱の柱頭柱脚と構面真ん中の管柱の柱脚部に貼り付けて計測を行っている。Y1 構面の柱 1、2、3 について、図 4.2.2-25(a)~(c)に各試験体の桁下 200 mm の柱頭部と足固め下 150 mm の柱脚部でひずみゲージにより計測した柱の曲げモーメントと試験体の層間変形角との関係を示す。



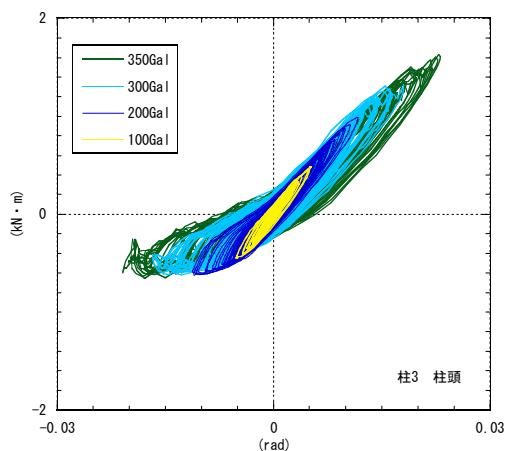
(1) 柱 1 柱頭部



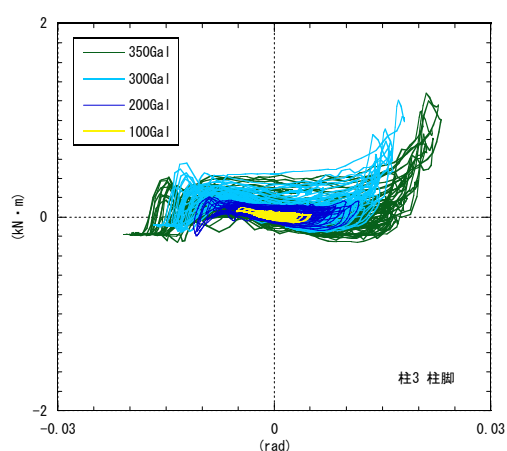
(2) 柱 1 柱脚部



(3) 柱 2 柱脚部

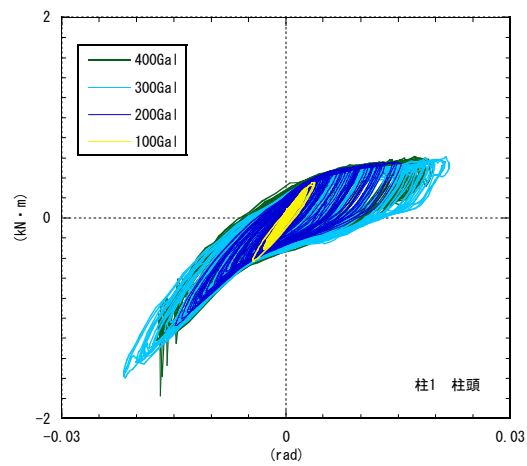


(4) 柱 3 柱頭部

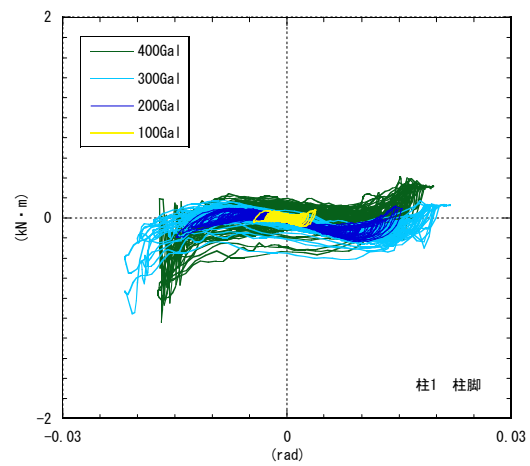


(5) 柱 3 柱脚部

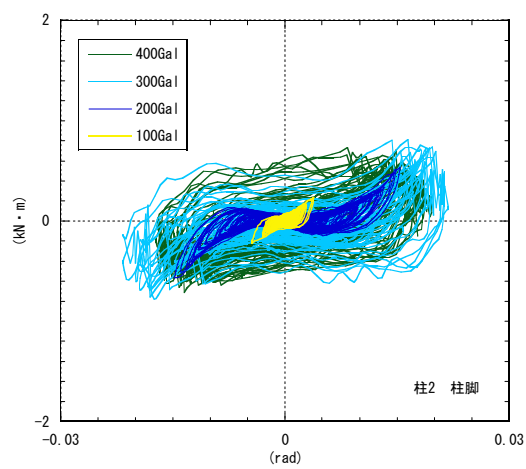
(a) 試験体 B



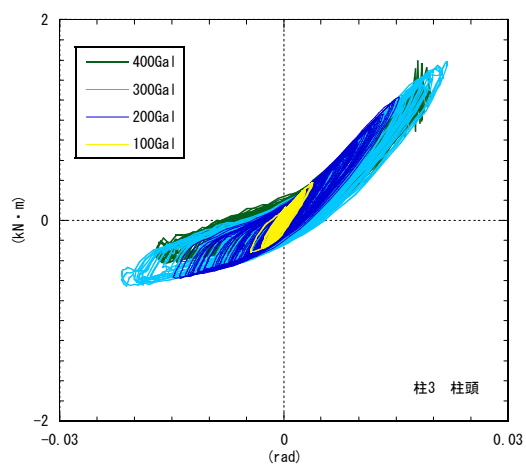
(1) 柱 1 柱頭部



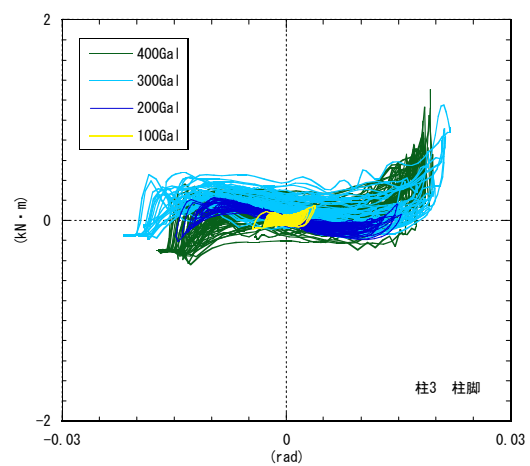
(2) 柱 1 柱脚部



(3) 柱 2 柱脚部

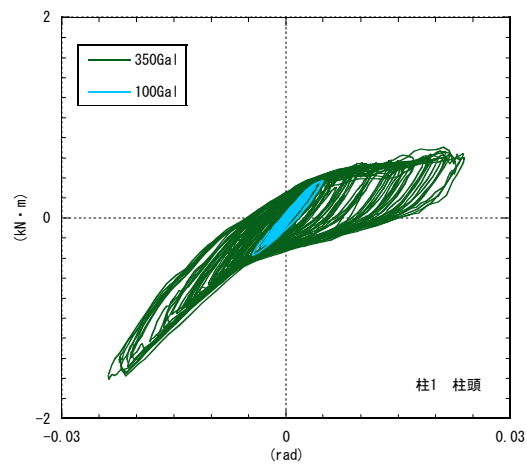


(4) 柱 3 柱頭部

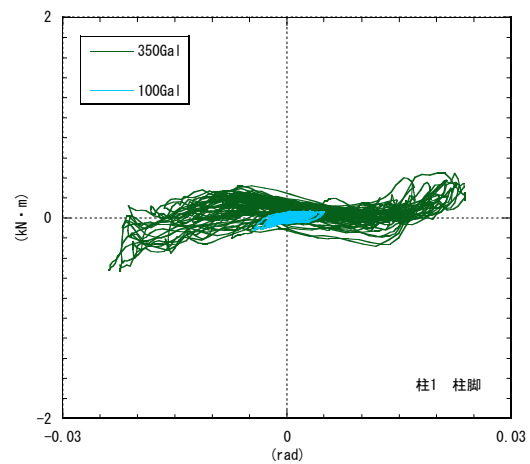


(5) 柱 3 柱脚部

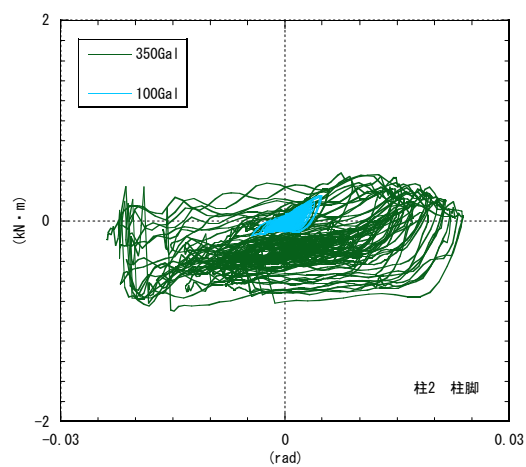
(b) 試験体 C



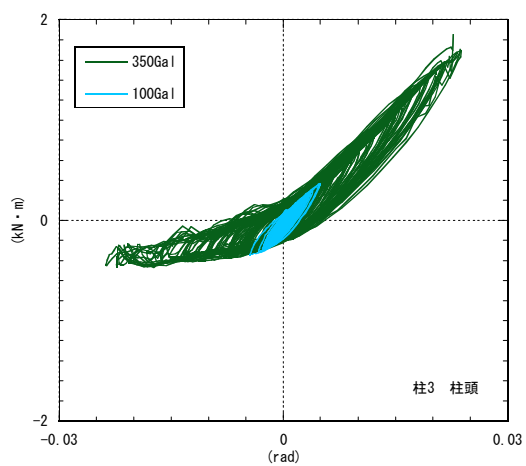
(1) 柱 1 柱頭部



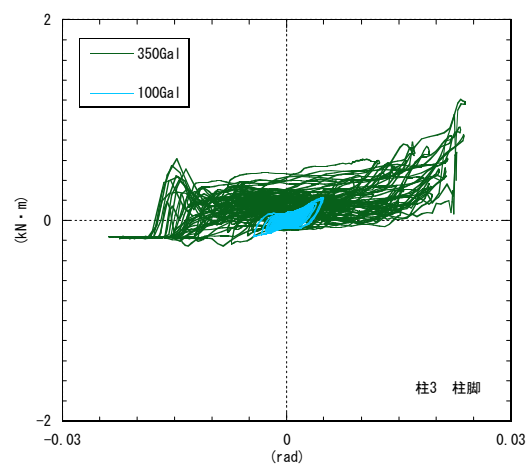
(2) 柱 1 柱脚部



(3) 柱 2 柱脚部



(4) 柱 3 柱頭部



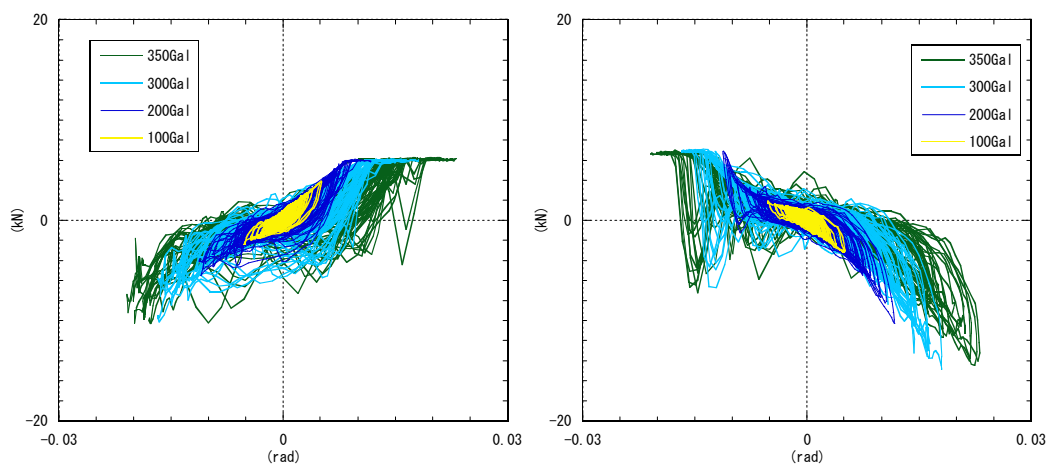
(5) 柱 3 柱脚部

(c) 試験体 D

図 4.2.2-25 柱の柱脚部曲げモーメント-層間変形角関係

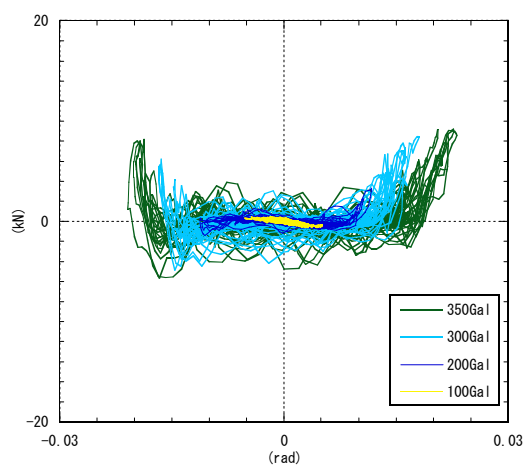
5) 変動軸力-変形角関係

図 4.2.2-26(a)～(c)に各試験体のロードセルにより計測した変動軸力と試験体の層間変形角との関係を示す。ロードセルは、4 隅の通し柱および構面中央の管柱の柱脚部に設置しており、そのうちの Y1 構面の柱 1、2、3 で計測された変動軸力を示している。また同図は、試験体の層間変形角との関係で示しているため、各試験体ともに、柱 1 と柱 3 で軸力の正負が逆のまま示している。



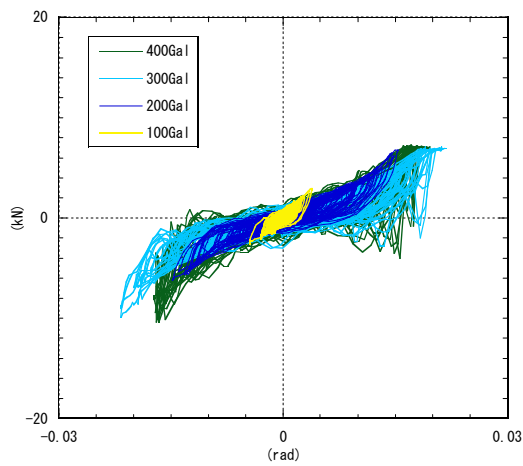
(1) 柱 1

(2) 柱 3

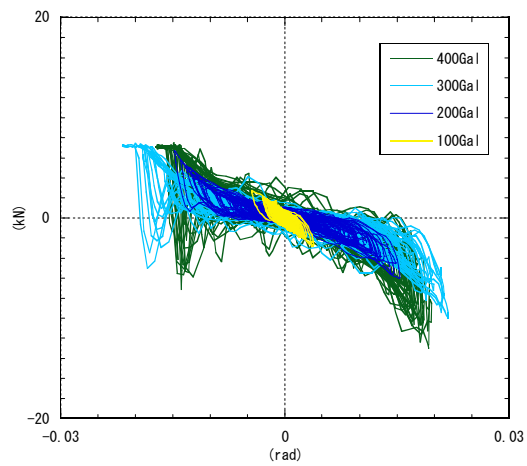


(3) 柱 2

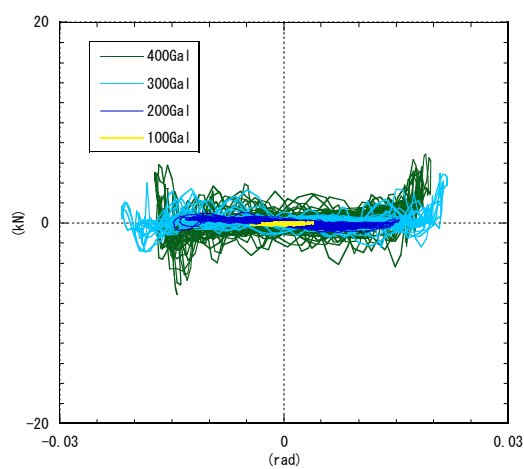
(a) 試験体 B



(1) 柱 1

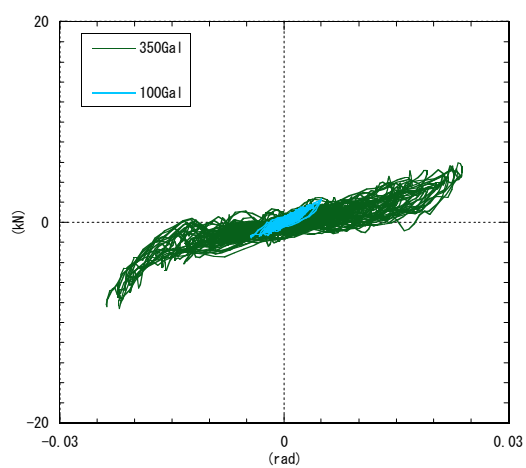


(2) 柱 3

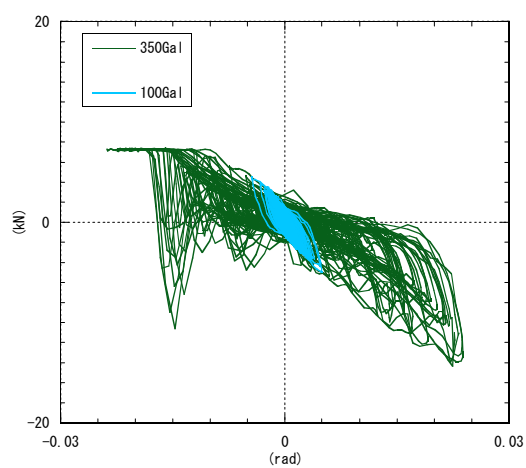


(3) 柱 2

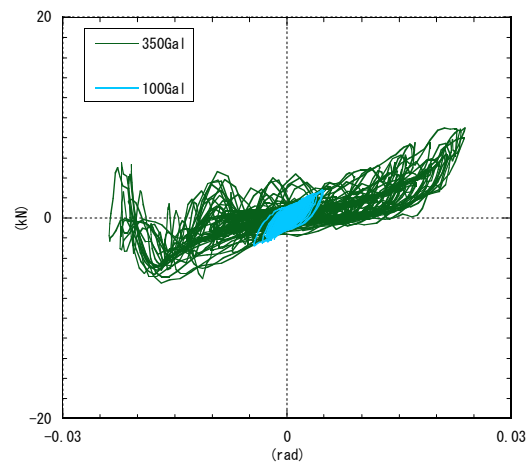
(b) 試験体 C



(1) 柱 1



(2) 柱 3



(3) 柱 2
(c) 試験体 D

図 4. 2. 2-26 柱の変動軸力-層間変形角関係

6) 最大値

①最大応答加速度

各試験体について、足固めレベルと桁レベルで得られた加速度から最大応答加速度を入力毎に表 4.2.2-5～4.2.2-7 に示し、桁レベルの最大応答加速度を図 4.2.2-27～4.2.2-29 に示す。

各試験体について、入力波 BCJ-L2 波加振の入力加速度レベルが 25～200 cm/s² の範囲において、入力レベルに比例して応答加速度も大きくなっており、入力加速度 200 cm/s² を超えると概ね一定した応答加速度になっている。入力波が sin 波の場合、試験体 B では、100cm/s² からほぼ一定の応答加速度となる。同様に試験体 C では、その傾向が 200cm/s² からほぼ一定の応答加速度となった。入力波によって応答の違いはあるものの、同一の入力波および入力加速度においては、各試験体の応答に顕著な差は無い。

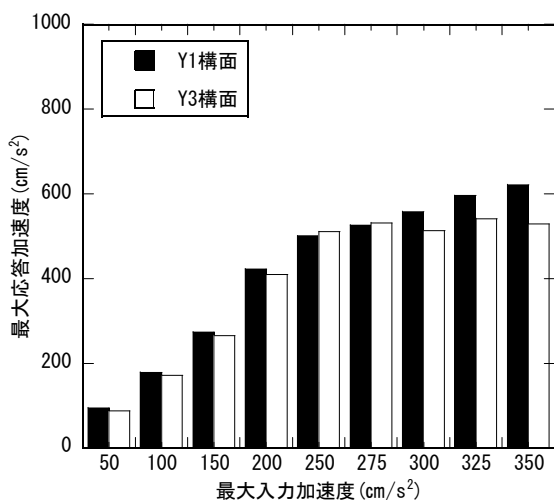
表 4.2.2-5 最大応答加速度(試験体 B)、(cm/s²)

(a) 入力波 BCJ-L2 波

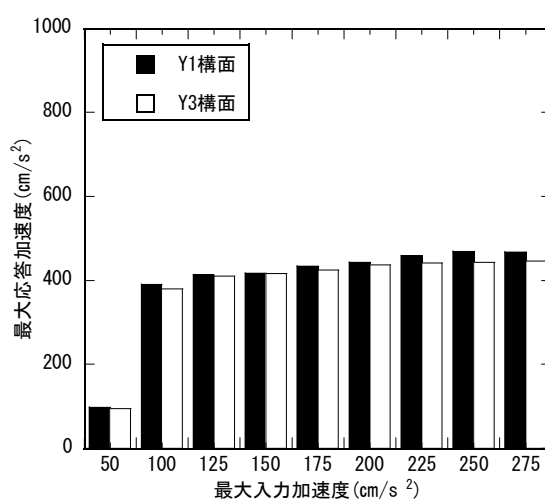
入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y3	Y1	Y3
50	66	74	95	88
100	132	143	178	172
150	210	222	274	266
200	265	314	422	410
250	862	910	501	511
275	1205	1272	526	531
300	1035	1102	559	514
325	1374	1457	596	541
350	1711	1433	621	529

(b) 入力波 sin 波

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y3	Y1	Y3
50	62	68	98	95
100	177	188	390	380
125	207	197	413	410
150	223	245	418	416
175	291	277	434	426
200	340	351	443	438
225	404	423	459	442
250	564	493	469	443
275	693	672	467	447



(a) 入力波 BCJ-L2 波



(b) 入力波 sin 波

図 4.2.2-28 最大応答加速度(試験体 B)

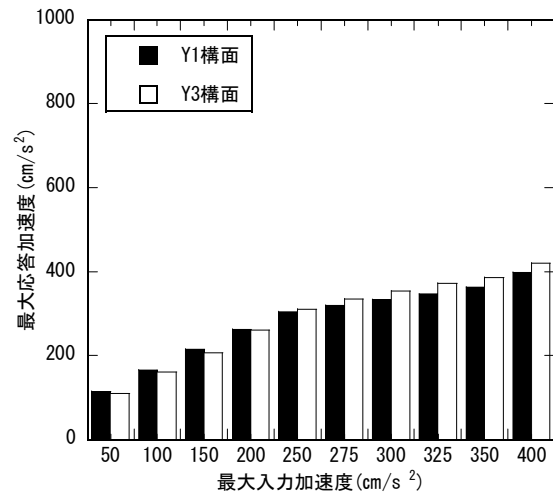
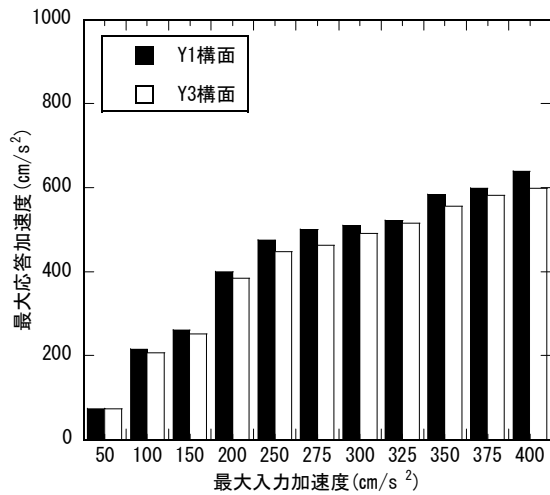
表 4. 2. 2-6 最大応答加速度 (試験体 C)、(cm/s²)

(a) 入力波 BCJ-L2 波

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y3	Y1	Y3
50	59	65	74	74
100	144	158	215	206
150	196	211	260	251
200	262	291	399	385
250	472	506	475	448
275	563	738	501	463
300	699	871	510	491
325	615	812	521	515
350	1116	1377	584	556
375	1487	1640	598	582
400	1655	1890	639	599

(b) 入力波 sin 波

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y3	Y1	Y3
50	61	66	115	110
100	102	111	166	161
150	152	158	215	207
200	222	232	262	261
250	284	311	305	310
275	332	364	320	335
300	367	402	333	355
325	392	430	347	373
350	398	437	363	386
400	428	482	398	421



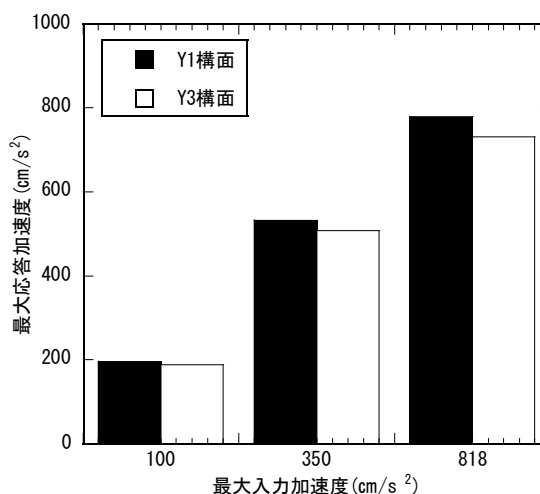
(a) 入力波 BCJ-L2 波

(b) 入力波 sin 波

図 4. 2. 2-29 最大応答加速度 (試験体 C)

表 7 最大応答加速度(試験体 D)、(cm/s²)
入力波 BCJ-L2 波、JMA-KOBE 波

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y3	Y1	Y3
100	142	155	196	188
350	757	828	532	509
818	3553	3665	780	731



入力波 BCJ-L2 波、JMA-KOBE 波
図 4.2.2-30 最大応答加速度(試験体 D)

②最大応答層間変形角

各試験体について、桁-足固め間の層間変形角を入力毎に表 4.2.2-8～4.2.2-10 と図 4.2.2-30～4.2.2-32 に示す。各試験体において、入力に比例して最大層間応答変形角が大きくなっている。ただし、試験体 B の sin 波加振で入力加速度 100cm/s² 以降では、ほぼ一定の応答層間変位となっている。また施工上の不備により試験体 C の BCJ-L2 波加振で入力加速度 350cm/s² で応答層間変位が小さくなっている。

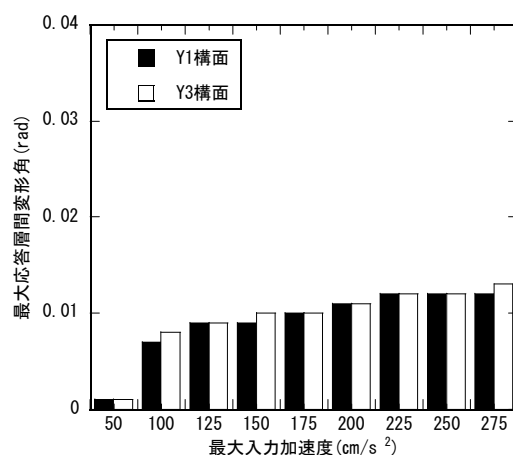
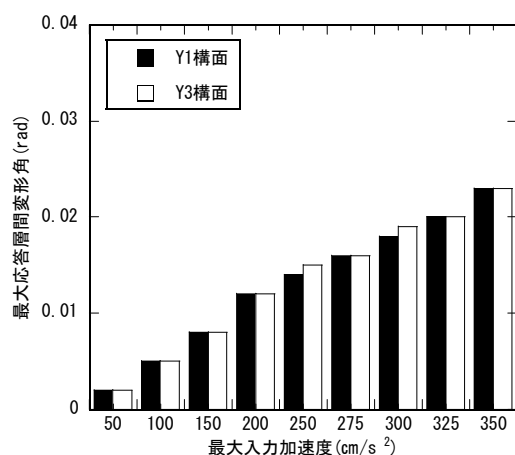
表 4.2.2-8 最大応答層間変形角(試験体 B)、(rad)

(a) 入力波 BCJ-L2 波

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
50	0.002	0.002
100	0.005	0.005
150	0.008	0.008
200	0.012	0.012
250	0.014	0.015
275	0.016	0.016
300	0.018	0.019
325	0.020	0.020
350	0.023	0.023

(b) 入力波 sin 波

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
50	0.001	0.001
100	0.007	0.008
125	0.009	0.009
150	0.009	0.010
175	0.010	0.010
200	0.011	0.011
225	0.012	0.012
250	0.012	0.012
275	0.012	0.013



(a) 入力波 BCJ-L2 波

(b) 入力波 sin 波

図 4.2.2-30 最大応答層間変形角(試験体 B)

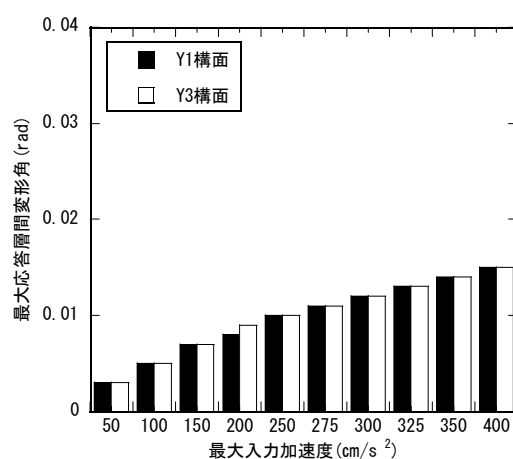
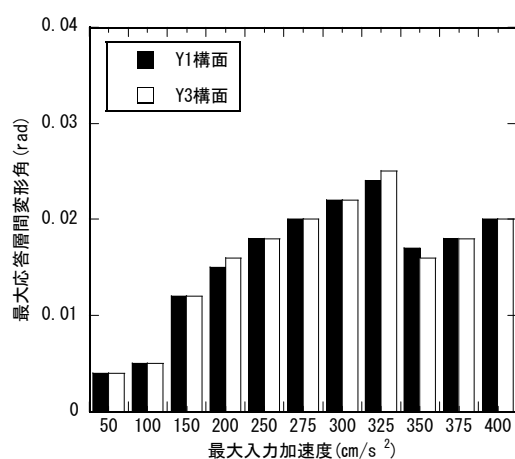
表 4.2.2-9 最大応答層間変形角(試験体 C)、(rad)

(a) 入力波 BCJ-L2 波

(b) 入力波 sin 波

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
50	0.004	0.004
100	0.005	0.005
150	0.012	0.012
200	0.015	0.016
250	0.018	0.018
275	0.020	0.020
300	0.022	0.022
325	0.024	0.025
350	0.017	0.016
375	0.018	0.018
400	0.020	0.020

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
50	0.003	0.003
100	0.005	0.005
150	0.007	0.007
200	0.008	0.009
250	0.010	0.010
275	0.011	0.011
300	0.012	0.012
325	0.013	0.013
350	0.014	0.014
400	0.015	0.015



(a) 入力波 BCJ-L2 波

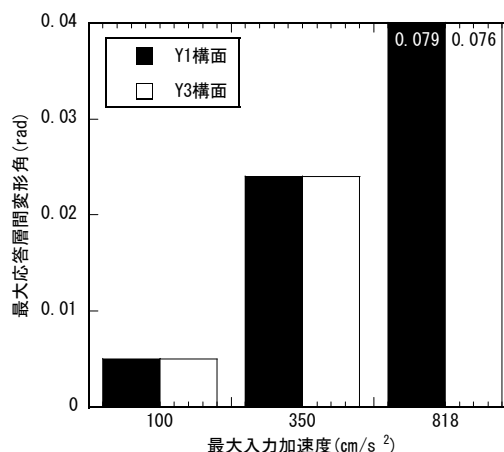
(b) 入力波 sin 波

図 4.2.2-31 最大応答層間変形角(試験体 C)

表 4.2.2-10 最大応答層間変形角(試験体 D)、(rad)

入力波 BCJ-L2 波、JMA-KOBE 波

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
100	0.005	0.005
350	0.024	0.024
818	0.079	0.076



入力波 BCJ-L2 波、JMA-KOBE 波

図 4.2.2-32 最大応答層間変形角(試験体 D)

③最大すべり量

各試験体について、柱脚部の 1 回の最大すべり、累積の最大すべり、加振終了後の残留すべり量を入力毎に表 4.2.2-11～4.2.2-13 に示し、それぞれ図 4.2.2-33～4.2.2-41 に示す。1 回の最大すべり量は、約 2 mm 以上をすべり挙動として判断した。

1 回のすべり量が算出された入力から試験体が滑り出していると判断し、試験体 B では sin 波で入力加速度 125cm/s²、BCJ-L2 波で 200cm/s²、試験体 C では、sin 波で 400cm/s²、BCJ-L2 波で 250cm/s² から滑り出していることとなり、試験体や入力によって滑り出す挙動が大きく異なる。さらに構面によってもすべり挙動は異なっている。そのため、最大すべり量、残留すべり量も同様に、試験体や入力によって異なっている。またおおむね入力が 300cm/s² を超えると大きく滑っている。

表 4.2.2-11 最大すべり量(試験体 B)、(mm)

			最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
			Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
bs2050xa	正弦波2.0Hz	50	—	—	0.43	0.37	0.43	0.37
bs2100xa	正弦波2.0Hz	100	—	—	1.77	0.92	1.77	0.92
bs2125xa	正弦波2.0Hz	125	2.81	1.94	1.93	1.41	1.50	0.03
bs2150xa	正弦波2.0Hz	150	2.84	2.49	3.36	2.22	2.67	0.57
bs2175xa	正弦波2.0Hz	175	3.57	2.52	4.83	3.00	4.12	1.07
bs2200xa	正弦波2.0Hz	200	3.52	2.73	5.46	2.83	5.38	0.79
bs2225xa	正弦波2.0Hz	225	3.66	2.74	7.04	3.16	7.04	1.75
bs2250xa	正弦波2.0Hz	250	3.83	3.24	10.44	4.25	11.65	3.61
bs2275xa	正弦波2.0Hz	275	3.78	2.65	8.87	9.27	11.53	9.02
bbj050xa	BCJ-L2波	50	—	—	0.49	0.37	0.30	0.16
bbj100xa	BCJ-L2波	100	—	—	0.53	0.49	0.01	0.03
bbj150xa	BCJ-L2波	150	—	—	0.93	0.66	0.25	0.18
bbj200xa	BCJ-L2波	200	2.75	1.95	1.49	0.99	1.40	0.95
bbj250xa	BCJ-L2波	250	5.06	4.48	4.67	2.82	5.52	4.00
bbj275xa	BCJ-L2波	275	6.84	5.79	4.91	2.64	12.48	6.50
bbj300xa	BCJ-L2波	300	10.08	6.90	4.25	2.30	15.41	6.42
bbj325xa	BCJ-L2波	325	13.98	9.76	7.76	5.75	17.48	4.88
bbj350xa	BCJ-L2波	350	18.70	8.22	15.09	10.55	34.26	23.68

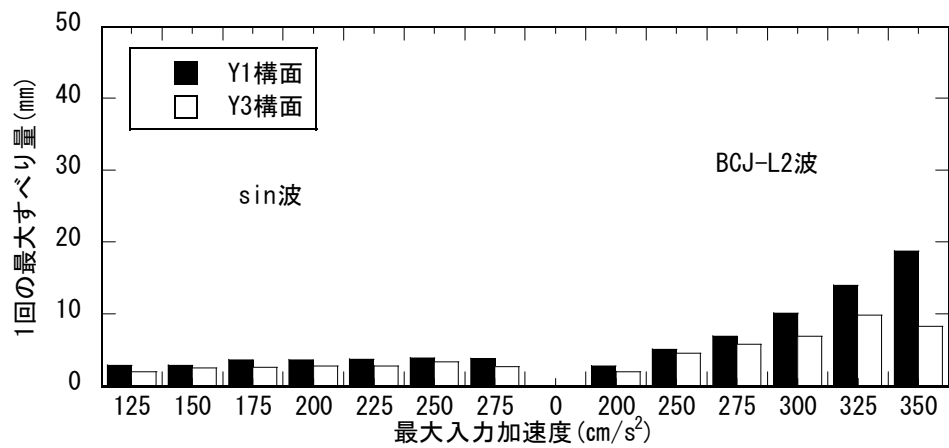


図 4. 2. 2-33 1 回の最大すべり量

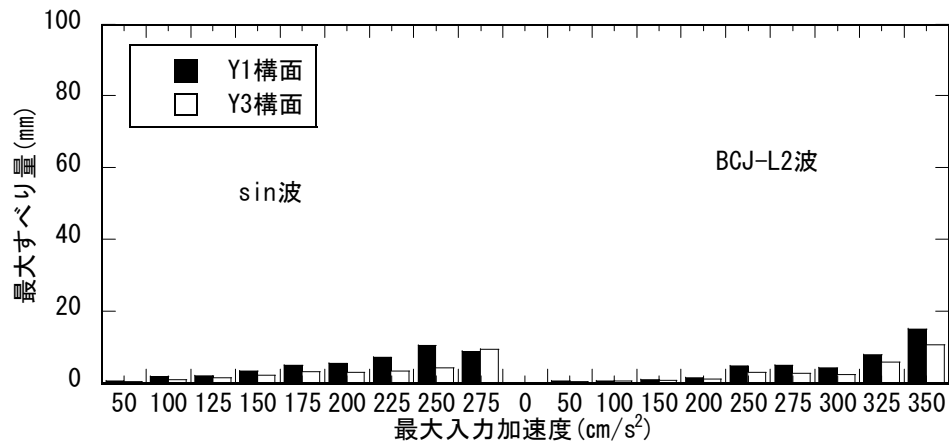


図 4. 2. 2-34 累積最大すべり量

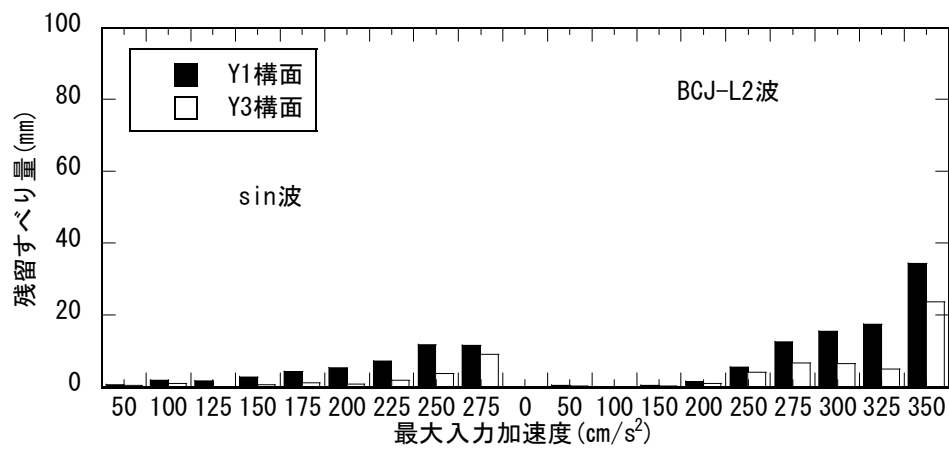


図 4. 2. 2-35 残留すべり量

表 4. 2. 2-12 最大すべり量(試験体 C)、(mm)

			最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
			Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
cs2050xa	正弦波2.0Hz	50	-	-	0.53	0.4	0.02	0.03
cs2100xa	正弦波2.0Hz	100	-	-	0.55	0.5	0.22	0.1
cs2150xa	正弦波2.0Hz	150	-	-	0.89	0.9	0.14	0.27
cs2200xa	正弦波2.0Hz	200	-	-	0.77	0.72	0.02	0.3
cs2250xa	正弦波2.0Hz	250	-	-	0.97	0.88	0.18	0.29
cs2275xa	正弦波2.0Hz	275	-	-	1	0.83	0.23	0.02
cs2300xa	正弦波2.0Hz	300	-	-	0.95	0.84	0.18	0.24
cs2325xa	正弦波2.0Hz	325	-	-	1.05	0.82	0.02	0
cs2350xa	正弦波2.0Hz	350	-	-	1.13	0.91	0.37	0.19
cs2400xa	正弦波2.0Hz	400	2.41	2.42	1.57	2.01	0.85	0.01
cbj050xa	BCJ-L2波	50	-	-	0.48	0.42	0.16	0.08
cbj100xa	BCJ-L2波	100	-	-	0.59	0.56	0.11	0.08
cbj150xa	BCJ-L2波	150	-	-	0.82	0.76	0.16	0.07
cbj200xa	BCJ-L2波	200	-	-	1.08	0.79	0.0004	0.06
cbj250xa	BCJ-L2波	250	3.25	2.27	1.86	2.13	0.07	1.15
cbj275xa	BCJ-L2波	275	5.52	5.05	4.39	4.21	2.06	3.2
cbj300xa	BCJ-L2波	300	7.73	6.55	3.45	3.92	1.52	1.37
cbj325xa	BCJ-L2波	325	7.92	7.05	4.62	5.07	0.06	2.06
cbj350xa	BCJ-L2波	350	34.29	29.77	38.77	36.72	14.74	1.65
cbj375xa	BCJ-L2波	375	39.25	34.89	33.21	32.91	37.43	18.08
cbj400xa	BCJ-L2波	400	43.08	39.62	65.84	64.13	32.68	6.6

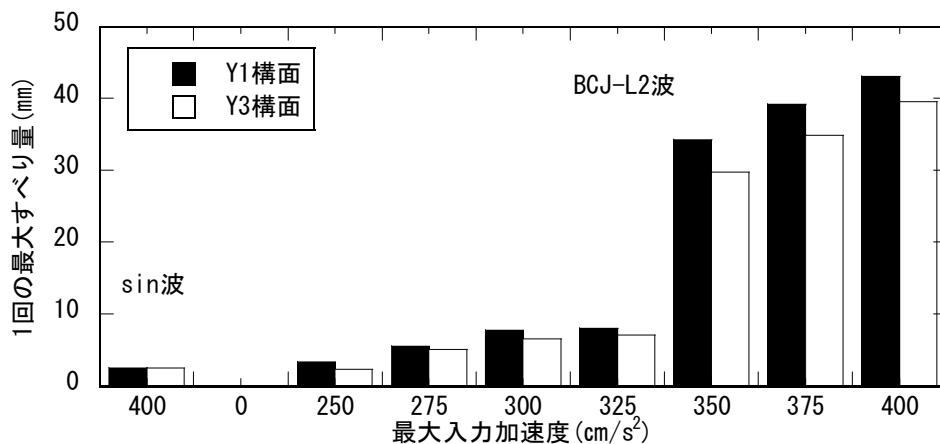


図 4. 2. 2-36 1 回の最大すべり量

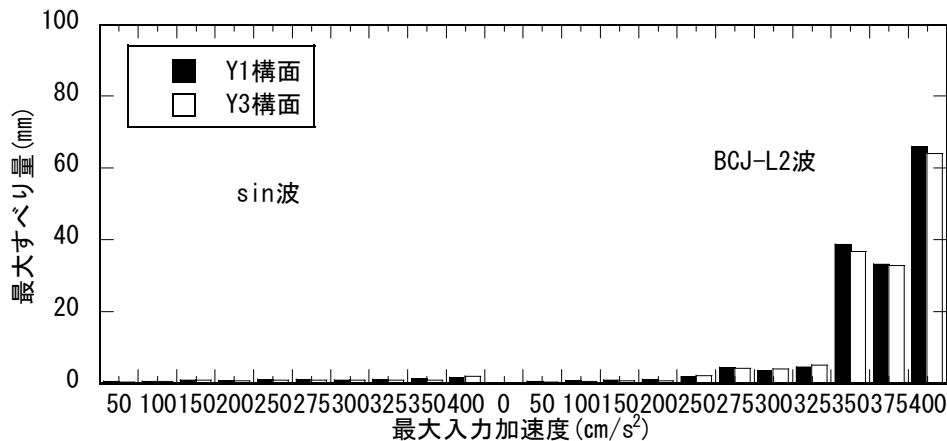


図 4. 2. 2-37 累積最大すべり量

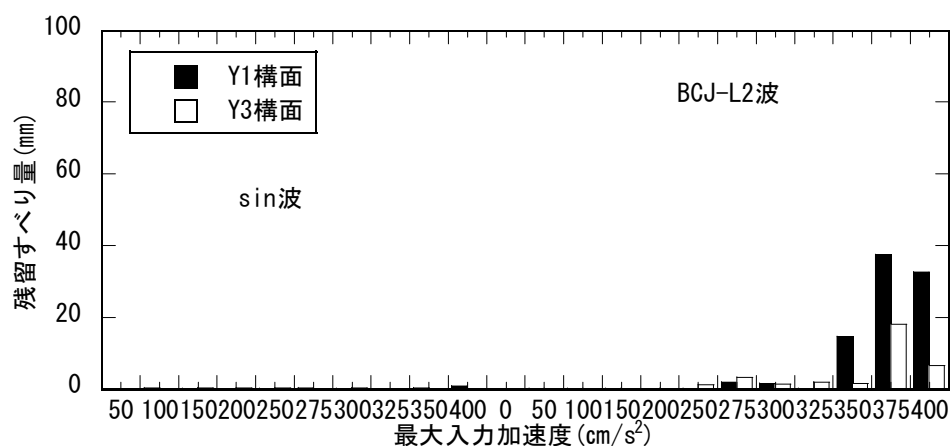


図 4.2.2-38 残留すべり量

表 4.2.2-13 最大すべり量(試験体 D)、(mm)

			最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
			Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
dbj100xa	BCJ-L2波	100	—	—	0.58	0.498	0.15	0.09
dbj350xa	BCJ-L2波	350	11.28	9.13	2.22	4.11	14.89	5.81
dkb818xa	JMA神戸波	818	122.37	117.87	236.02	237.65	236.02	236.6

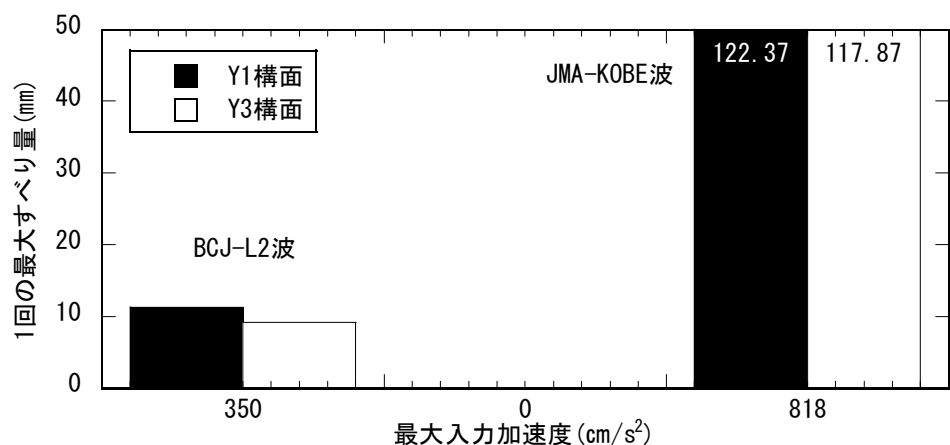


図 4.2.2-39 1回の最大すべり量

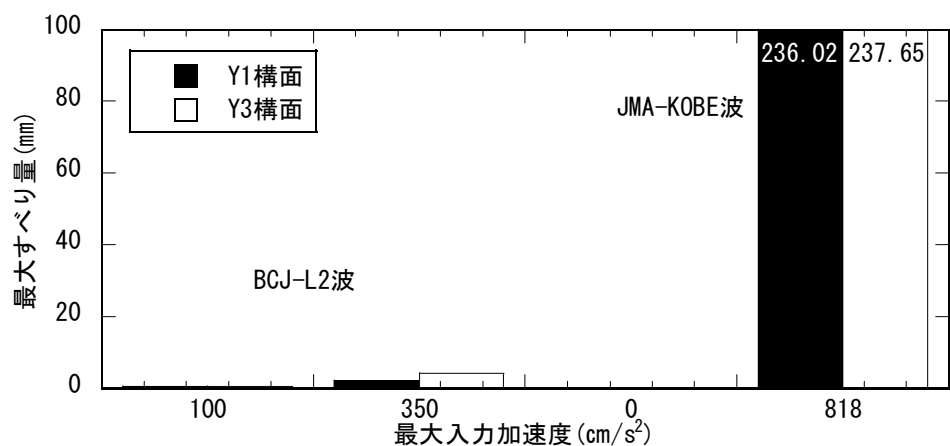


図 4.2.2-40 累積最大すべり量

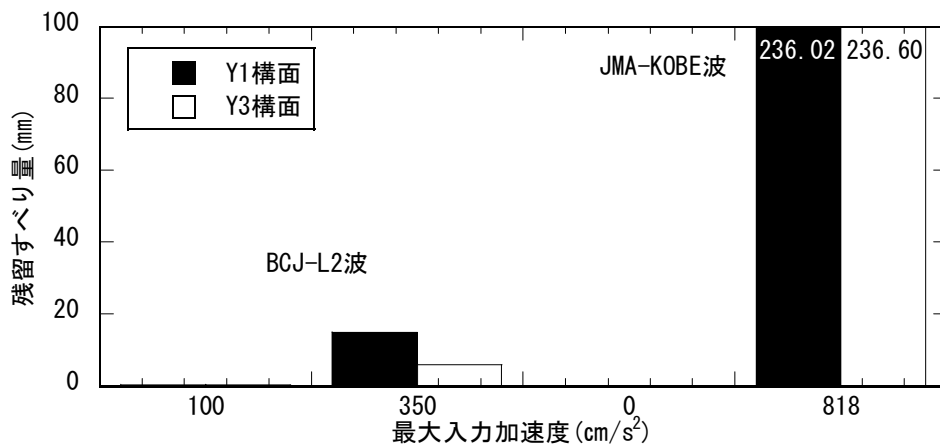
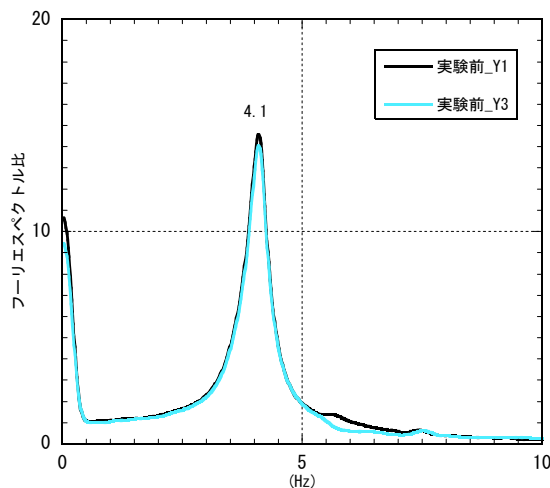


図 4.2.2-41 残留すべり量

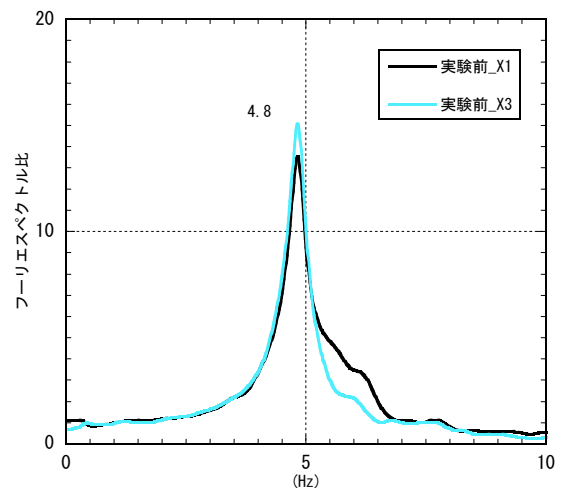
7) 卓越振動数

ホワイトノイズ加振による加速度データを用いて、FFT 解析をおこない、試験体頂部の加速度データと振動台上の加速度データのスペクトル比を求めて、図 4.2.2-42 に示す。FFT 処理は計測した全データを用いて行い、Parzen ウィンドウによるウィンドウ幅 0.5Hz で平滑化を行った。

加振前の各試験体の卓越振動数は試験体 B で 4.1Hz、試験体 C で 3.5、試験体 D で 3.0Hz となり、加振後には、試験体 C が 3.6Hz、試験体 D が 1.9Hz となった。試験体 D では JMA-KOBE 波加振により大変形を経験したことで大きく低下した。試験体 C では、実験途中で施工上の不備があったため壁の締め直しを行った影響により、加振後の卓越振動数が、加振前と比べて若干大きくなっている。入力方向と直角の X 構面については、加振前後で大きな変化はない。

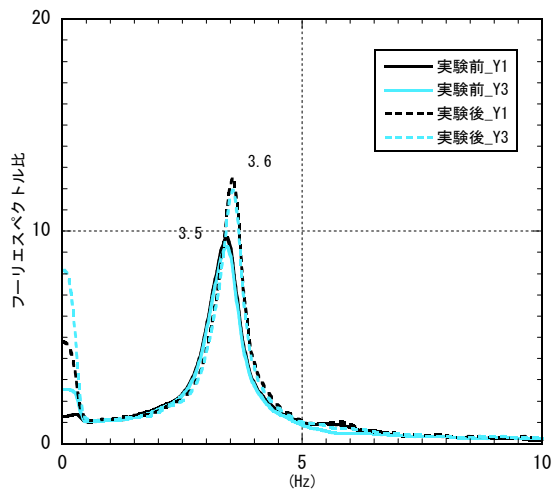


(1) 加振方向_Y1 構面、Y3 構面

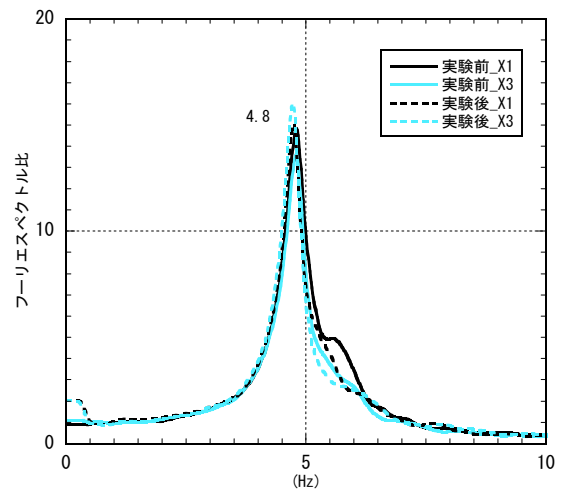


(2) 加振直行方向_X1 構面、X3 構面

(a) 試験体 B

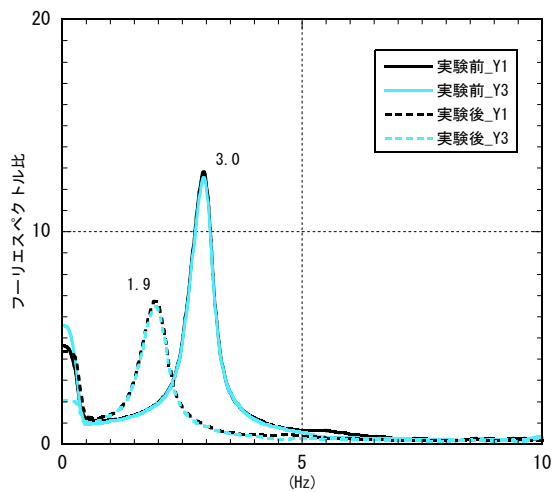


(1) 加振方向_Y1 構面、Y3 構面

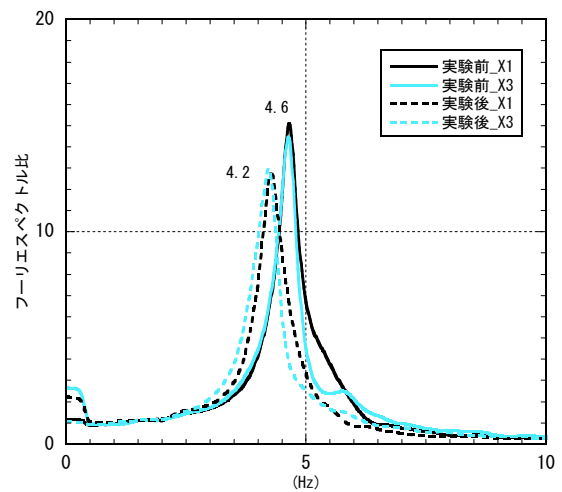


(2) 加振直行方向_X1 構面、X3 構面

(b) 試験体 C



(1) 加振方向_Y1 構面、Y3 構面



(2) 加振直行方向_X1 構面、X3 構面

(c) 試験体 D

図 4.2.2-42 フーリエスペクトル比

4. 2. 3 骨組みモデルの加振実験（2）

（1）目的

本実験は、E-ディフェンスによる石場建て木造建築物の振動台実験の予備実験として位置づけしており、本実験の試験体の軸組および鉛直構面、水平構面等の仕様、錘の加工、設置方法等は、E-ディフェンスで実験する試験体の仕様に準じており、その一部を再現した試験体である。これにより、E-ディフェンス実験での計測方法、錘の性能等を確認すると共に、試験体の動特性、応答、すべり挙動を確認することを目的としている。

本実験は、2010年10月12日から29日の期間で京都大学防災研究所の強震応答実験室を利用して行われている。実行メンバーは以下のとおりである。

須田 達	立命館大学グローバル・イノベーション研究機構	准教授
向坊恭介	立命館大学理工学部建築都市デザイン学科	助教
吉田尚弘	立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻	修士課程2年
有山睦美	立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻	修士課程2年
福田由惟	立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻	修士課程2年
廣瀬大介	立命館大学 理工学部 建築都市デザイン学科	4回生
田中瑛子	奈良女子大学大学院人間文化研究科住環境学専攻	修士課程2年
大岡 優	立命館大学大学院 理工学研究科 創造理工学専攻	博士課程3年

（2）試験体の概要

試験体は、基礎となる礎石の上に柱を固定せずに設置し、接合部は、直交する桁は相欠き接合、桁と柱は長ほぞ込み栓留め接合、柱と足固めは、ほぞ差し車知栓留め接合とした石場建て伝統構法である。規模は平面寸法 3640 mm×3640 mm、高さは 3110 mm、隅柱の断面は 150 mm 角の通し柱、中柱の断面は 120 mm 角、桁および足固めの断面は 120×240 mm である。礎石は、平面 500 mm×500 mm、厚み 50 mm の御影石として、表面は仕上げ無しの切りっぱなしとした。

耐力要素は鉛直構面の片面貼り荒壁パネルと足固め、柱などの軸組である。基本となる平面図および立面図を図 4.2.3-1 に示し、各部の状況を写真 4.2.3-1 の(a)から(o)に示す。

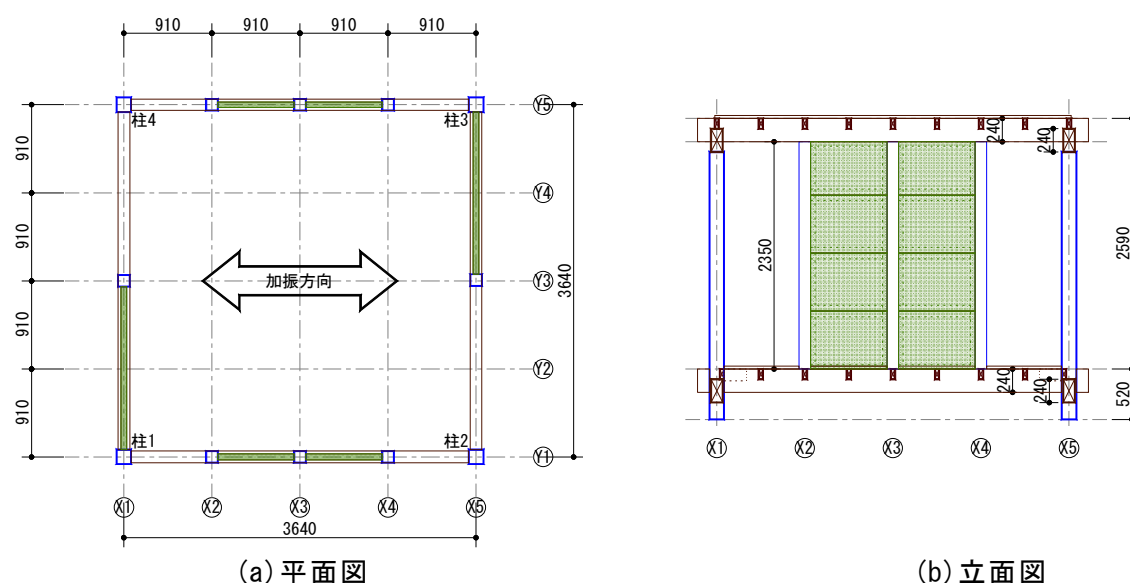


図 4. 2. 3-1 試験体基本図面



(a) 足固め-柱接合部



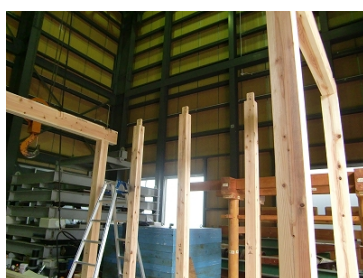
(b) 足固めのほぞと車知栓



(c) 足固めの受け材



(d) 桁-柱接合部



(e) 中柱のほぞ



(f) 中柱-足固めの接合部と込み栓



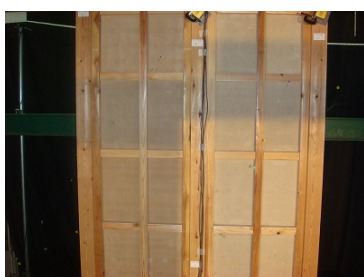
(g) 大引き-足固め接合



(h) 水平構面と根太



(i) 桁の接合部



(j) 鉛直構面



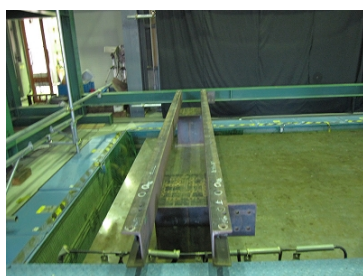
(k) 礎石



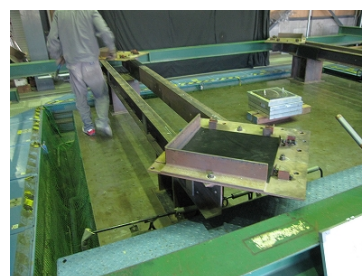
(l) 試験体軸組



(m) 架台のボックス



(n) 架台の梁

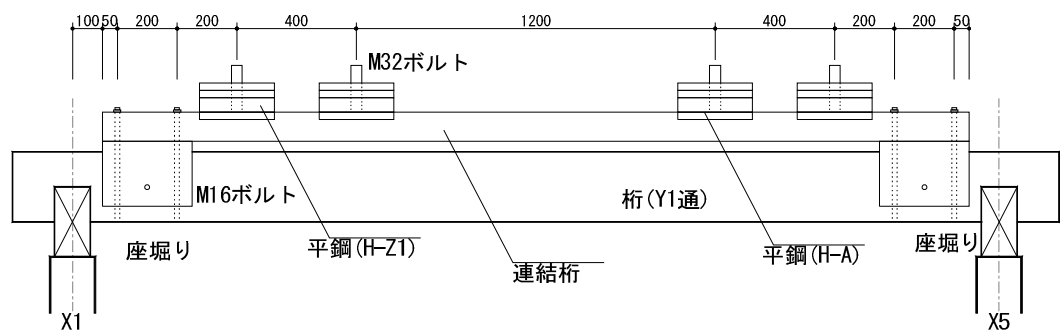


(o) 礎石固定治具

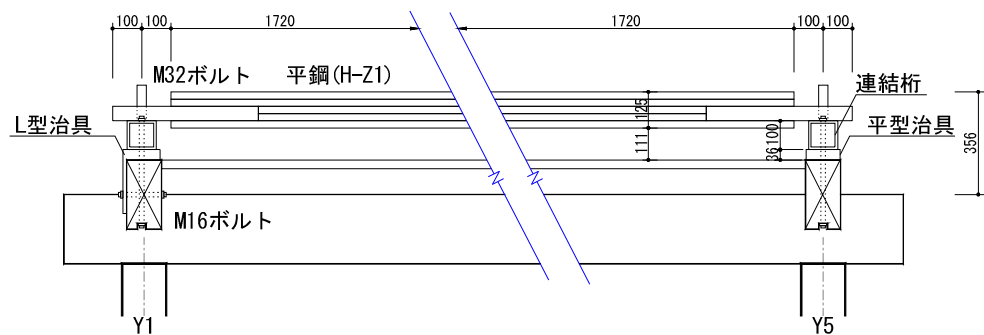
写真 4.2.3-1 試験体と設置状況

試験体載荷重量は、水平構面の剛性に影響しないように、屋根構面に鋼製錘を設置した。
図 4.2.3-2 に屋根構面に設置した鋼製錘図を示し、設置状況を写真 4.3.2-2 に示す。試験体

重量は、試験体を設置する際、事前に軸力計を設置して錘を含む試験体総重量を計測し、実験後の試験体解体時に部材ごとに計測した重量を積算して算出した。なお壁配置によって若干変更するが、試験体 A に基づいて、試験体重量、鋼製錘重量、鋼製錘を含む総重量を表 1 に示す。



(a) おもり側面図 (X 方向)



(b) おもり側面図 (Y 方向)

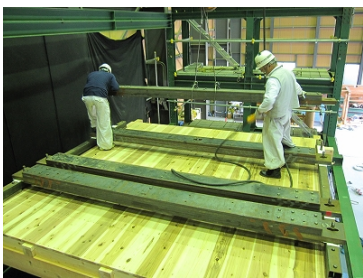
図 4. 2. 3-2 天井に設置したおもりの側面図および設置状況



(1) 連結桁おもり



(2) 平鋼おもり



(3) おもりの設置状況

写真 4. 2. 3-2 おもりと設置状況

表 4. 2. 3-1 試験体の重量

試験体全重量計測値	59.191	kN
おもり重量	42.350	kN
木材と壁計測重量	16.842	kN
内訳		
上部	8.884	kN
下部	7.957	kN

地震時設計用建物重量 51.23 kN

(3) 実験方法

実験は、加振方向の壁配置をパラメータとし、試験体 A は Y1 構面に 2P、Y5 構面に 2P の荒壁パネルを配置し、試験体 B は、それぞれ 1P と 2P を配置、試験体 C はそれぞれ 1P と 1P、試験体 D は、それぞれ 3P と 1P を配置した。図 4.2.3-3 に各試験体の壁配置を示す。

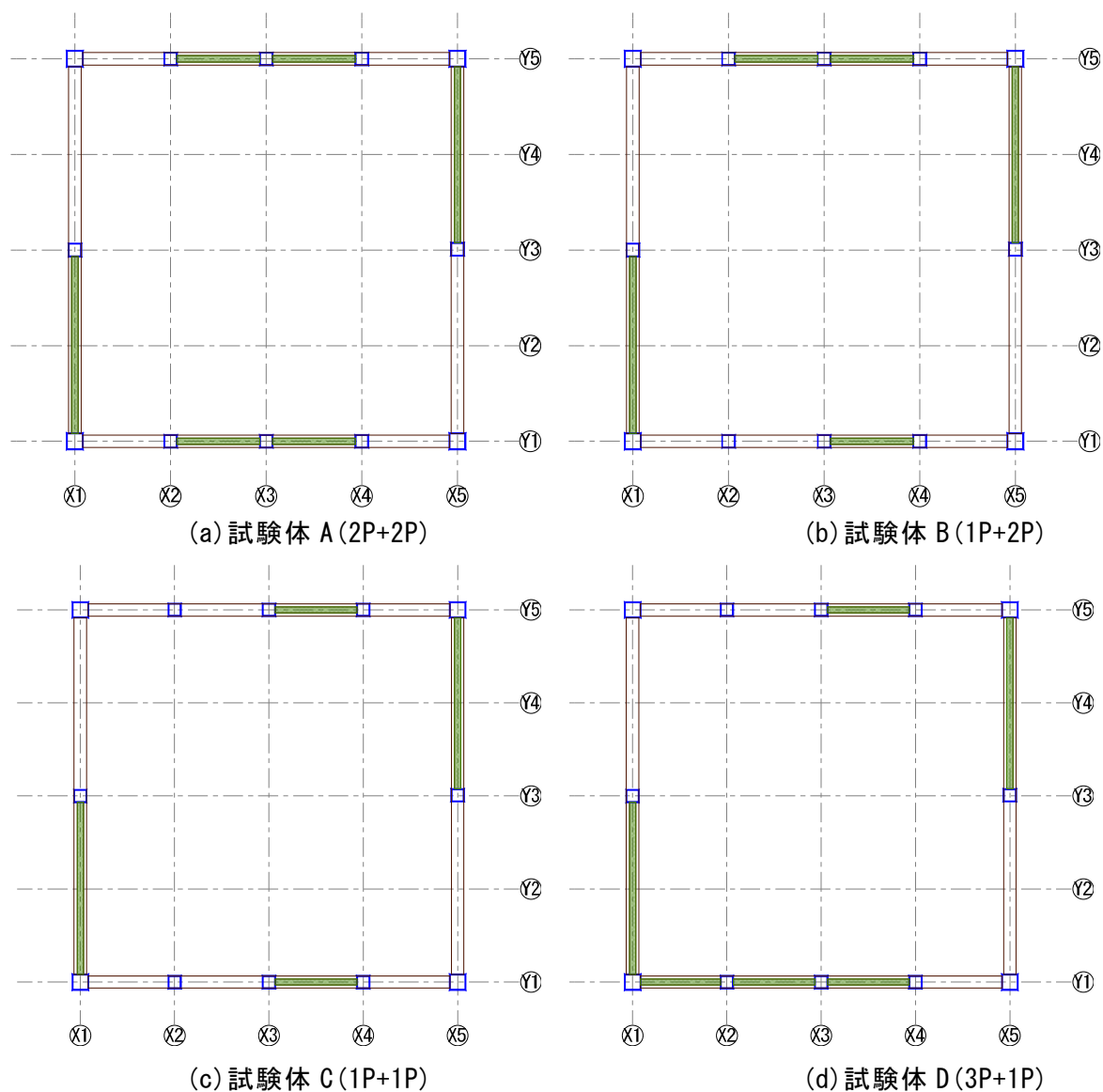


図 4.2.3-3 試験体壁配置

入力は最大入力加速度をパラメータとして、最大入力加速度 25 cm/s^2 から開始して、 25 cm/s^2 づつ加速度レベルを上げて、試験体柱脚部のすべり挙動が目視で確認できるまでとした。また最初と最後には、試験体の動特性を確認するため、ホワイトノイズを入力した。表 4.2.3-2 に各試験体の加振リストを示す。

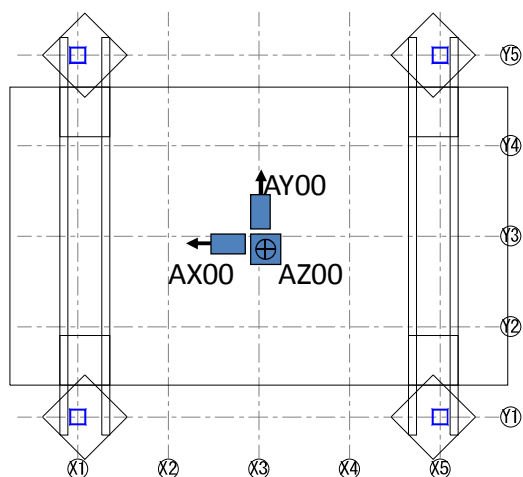
表 4.2.3-2 試験体加振リスト

	ファイル名	入力波	入力方向	最大加速度 (cm/s ²)	試験体A	試験体B	試験体C	試験体D
					○:加振 —:加振なし			
1	awh010xa	ホワイトノイズ	X	10	○	○	○	○
2	awh010ya	ホワイトノイズ	Y	10	○	○	○	○
3	abj025xa	BCJ-L2G2	X	25	○	○	○	○
4	abj050xa	BCJ-L2G2	X	50	○	○	○	○
5	abj075xa	BCJ-L2G2	X	75	○	○	○	○
6	abj100xa	BCJ-L2G2	X	100	○	○	○	○
7	abj125xa	BCJ-L2G2	X	125	○	○	○	○
8	abj150xa	BCJ-L2G2	X	150	○	○	○	○
9	abj175xa	BCJ-L2G2	X	175	○	○	○	○
10	abj200xa	BCJ-L2G2	X	200	○	○	○	○
11	abj225xa	BCJ-L2G2	X	225	○	○	○	○
12	abj250xa	BCJ-L2G2	X	250	○	○	○	○
13	abj275xa	BCJ-L2G2	X	275	○	○	—	○
14	abj300xa	BCJ-L2G2	X	300	○	—	—	○
15	abj325xa	BCJ-L2G2	X	325	—	—	—	—
16	abj350xa	BCJ-L2G2	X	350	○	—	—	—
17	abj375xa	BCJ-L2G2	X	375	—	—	—	—
18	abj400xa	BCJ-L2G2	X	401.156	○	—	—	○
19	awh010xb	ホワイトノイズ	X	10	○	○	○	○
20	awh010yb	ホワイトノイズ	Y	10	○	○	○	○

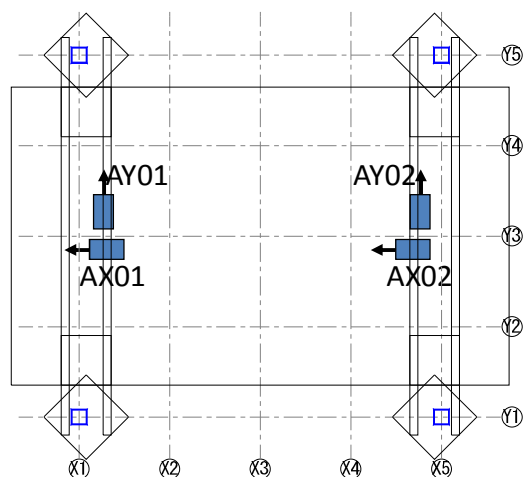
(4) 計測方法

計測は、E ディフュゼンスによる本実験を想定して、加速度計、変位計、ひずみゲージ、軸力計を用いた。加速度計は振動台上、鉄骨架台、足固めレベル、桁レベルに設置し、変位計は鉛直構面の対角にワイヤー変位計を設置して層間変形角の計測を試みた。計測精度を検証するため、桁レベル、足固めレベル、柱脚レベルにレーザー変位計を設置している。桁レベルと足固めレベルは、振動台外部に設置されている安全フレームからの絶対変位計測とし、柱脚部のレーザー変位計は振動台に固定して相対変位計測とした。また柱脚部の相対変位計測により、柱脚部のすべり量の計測を兼ねている。柱の浮き上がりは、柱脚部に接触型変位計を側面に取り付けて計測した。ひずみゲージは、柱頭と柱脚の柱・足固め接合部上下に貼り付けて、軸力、曲げモーメントを計測した。軸力計測は、礎石と柱の間に軸力計も設置して計測を行った。図 4.2.3-4 に計測器の設置図を示す。

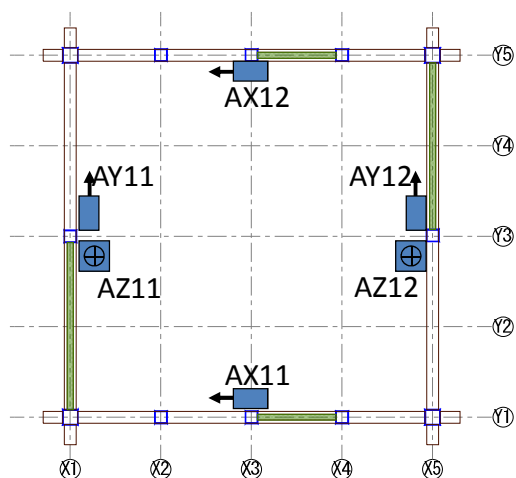
計測はサンプリング周波数を 200Hz として、加振開始数秒前から加振終了数秒後までを計測した。



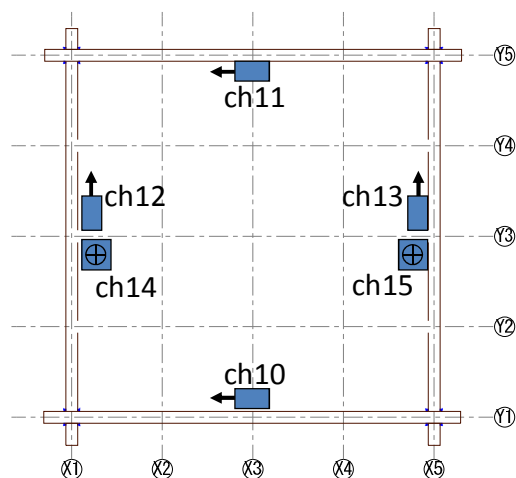
(1) 振動台レベル (TL)



(2) 鉄骨架台レベル (TL+600 mm)



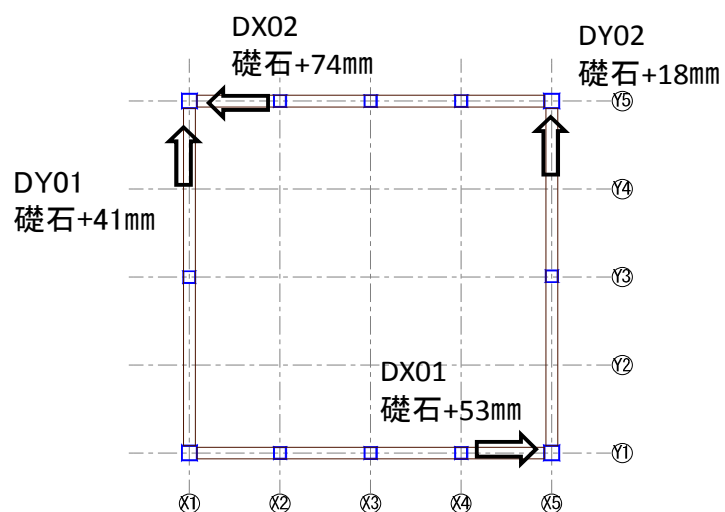
(3) 足固めレベル (礎石レベル+400 mm)



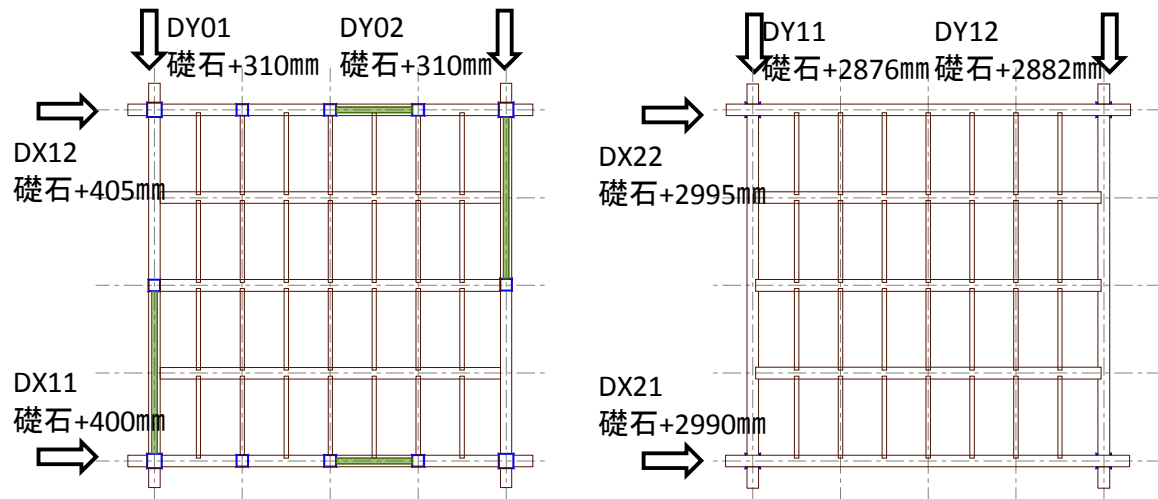
(4) 桁レベル (礎石+2870 mm)

凡例 :   : 水平加速度  : 鉛直加速度

(a) 加速度計測



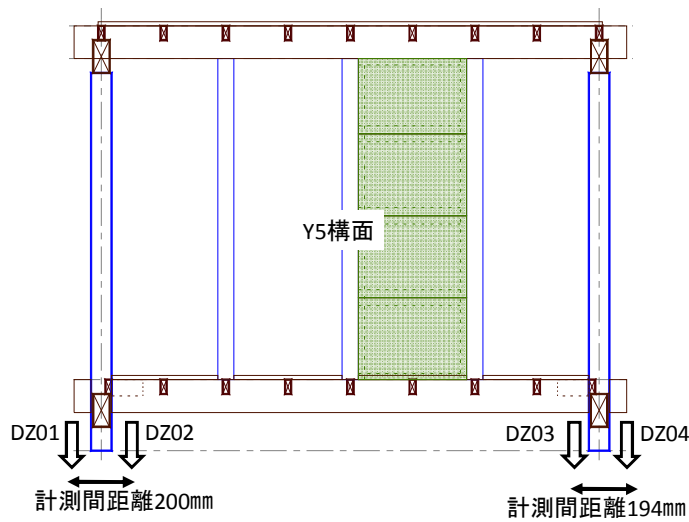
(b) 柱脚部のすべり (レーザー計測、相対変位)



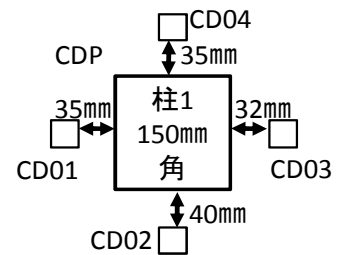
(1) 足固めレベル

(2) 桁レベル

(c) 試験体の変位（レーザー計測、絶対変位）

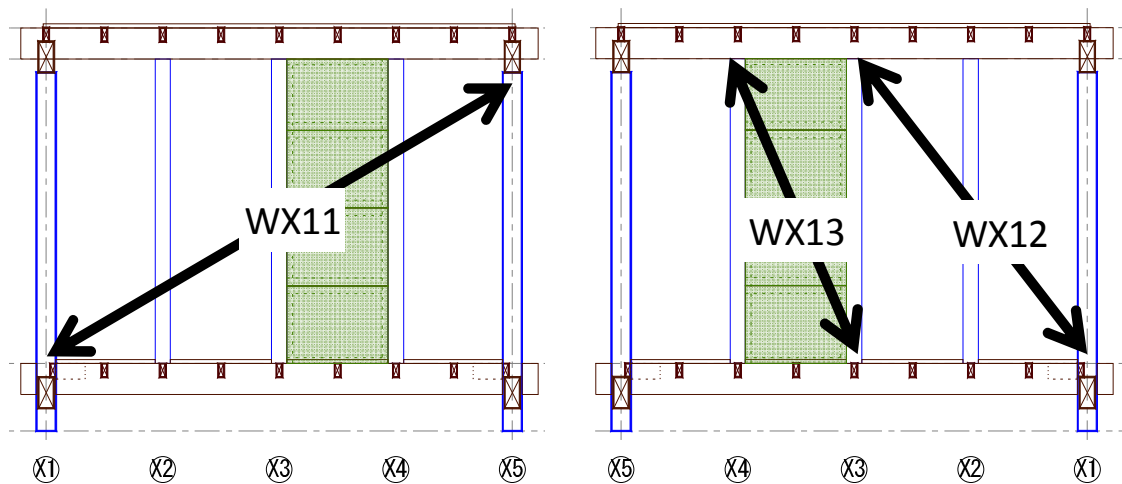


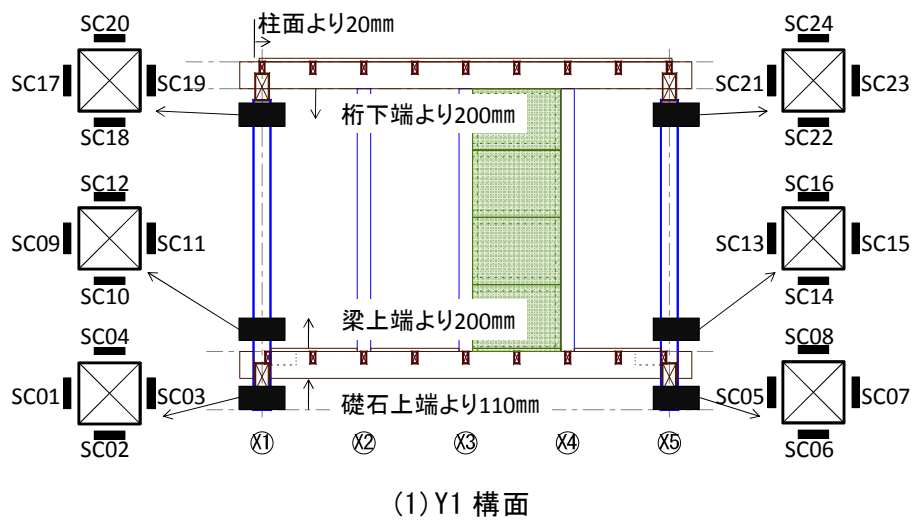
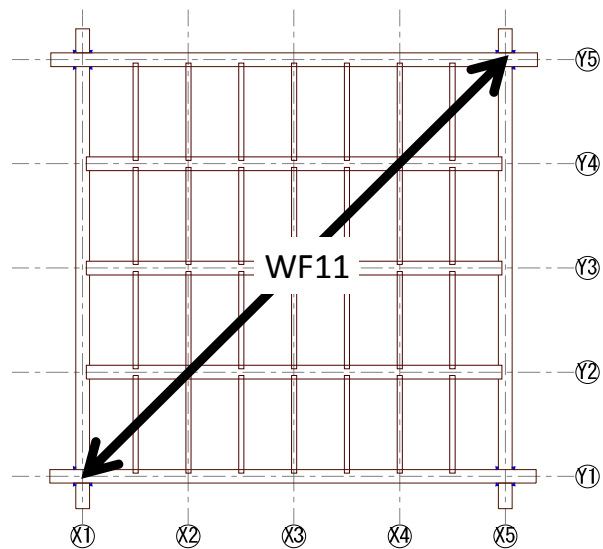
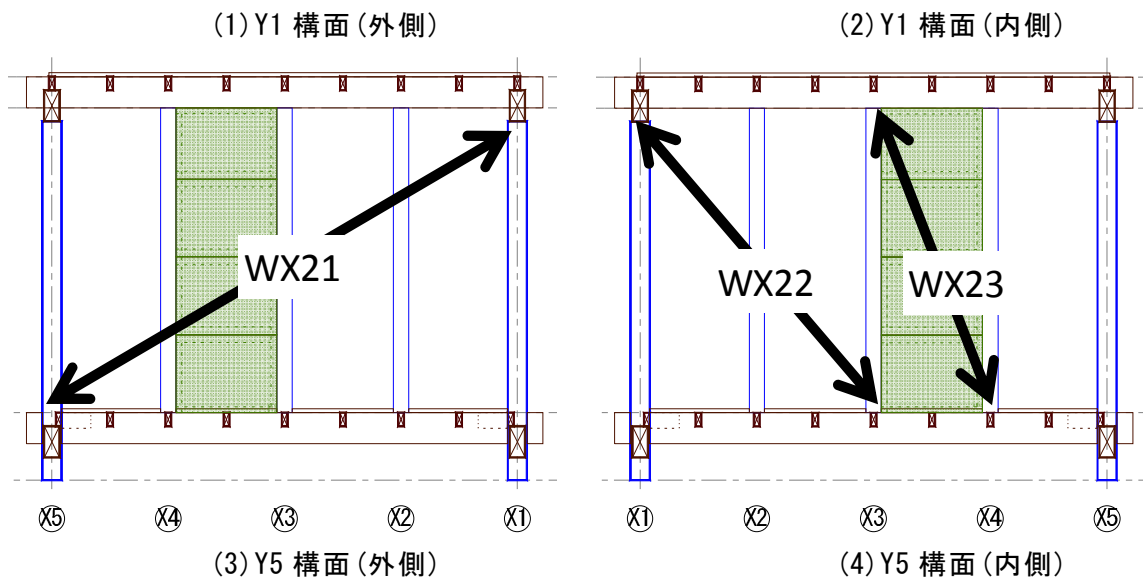
(1) 柱 3 と 柱 4 (レーザー計測)

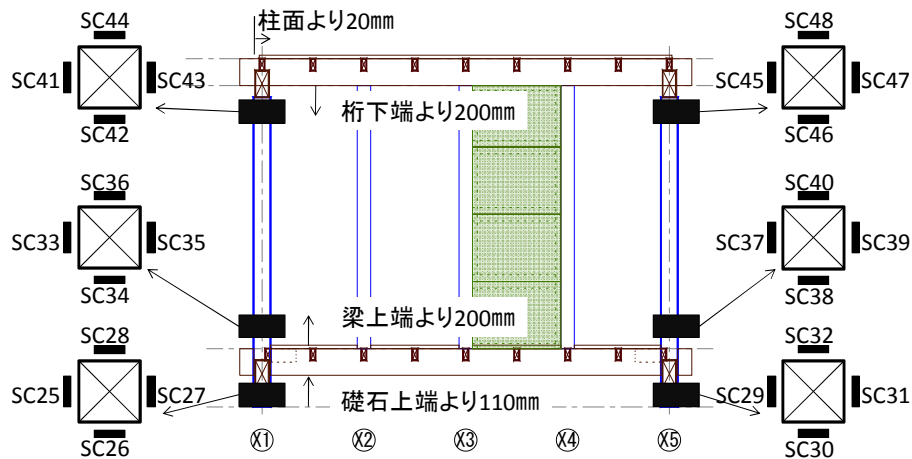


(2) 柱 1 (接触型変位計)

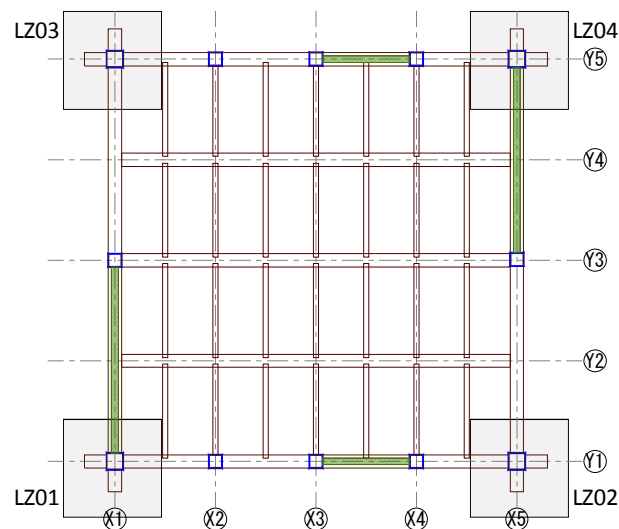
(d) 柱脚の浮き上がり







(2) Y5 構面
(f) 柱のひずみ



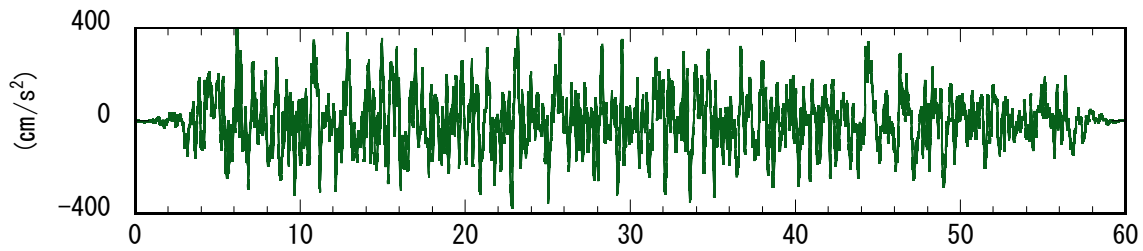
(g) 柱の軸力 (軸力計)

図 4.2.3-4 計測器の配置

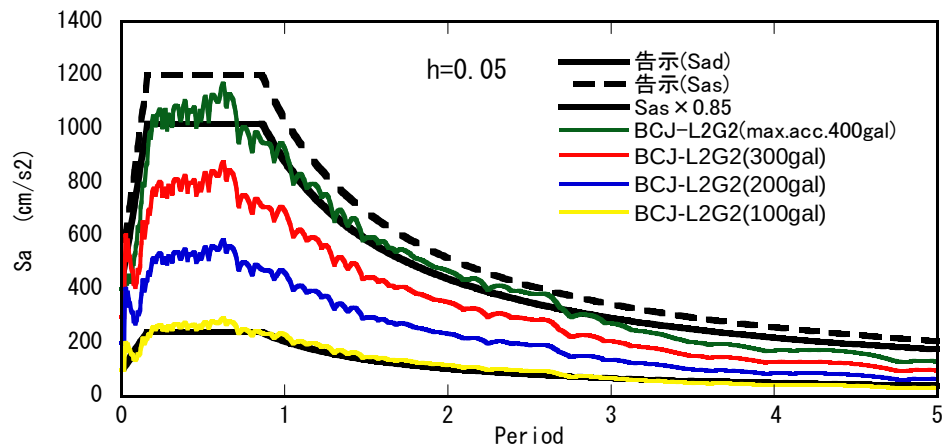
(5) 入力波

実験に用いた入力波は建築センター波レベル 2(BCJ-L2)を、告示で示される、2 種地盤の増幅率を乗じた加速度応答スペクトル相当に調整されたものを用いた。図 4.2.3-5 に実験で使用了入力波(BCJ-L2G2)示す。

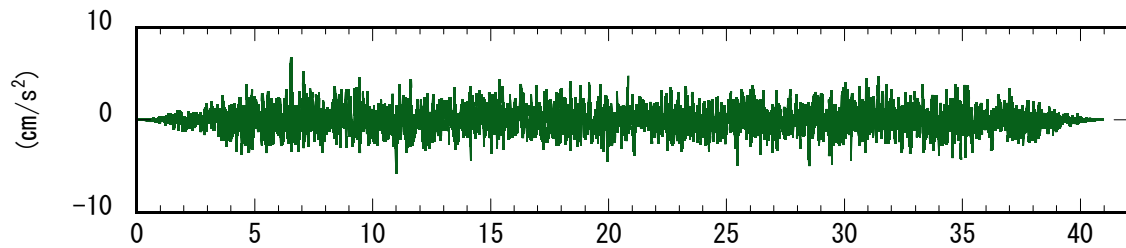
また実験の前後において、動特性を検証するためにホワイトノイズ波(0.03~20Hz)を入力している。あわせて図 4.2.3-5 にホワイトノイズ波も合わせて示す。



(a) BCJ-L2G2 の時刻歴波形



(b) BCJ-L2G2 の応答スペクトル



(c) ホワイトノイズの時刻歴波形

図 4.2.3-5 入力波

(6) 実験結果

1) 実験データの処理

得られたデータのうち、加速度データは図 4.2.3-6 に示すウィンドウによるローパスフィルター処理を行った。また 5.3 節に示す履歴特性では、加速度データを同図に示すバンドパスフィルター処理を行った。

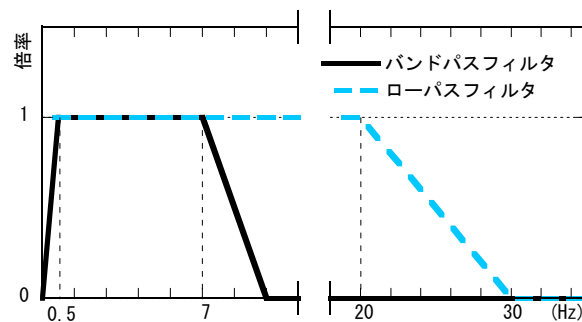


図 4.2.3-6 フィルターウィンドウ

試験体の層間変形角は、レーザー変位計による絶対変位とワイヤー変位計による鉛直構面の対角変位により計測している。レーザー変位計による計測において、試験体のすべり移動が大きく、計測許容値を超えてしまう場合は、ワイヤー変位計による計測値を使用している。計測値の精度を確認するため、図 4.2.3-7 に試験体 A の最大入力加速度 200Gal のときのレーザー変位計とワイヤー変位計で計測された層間変形角を示す。

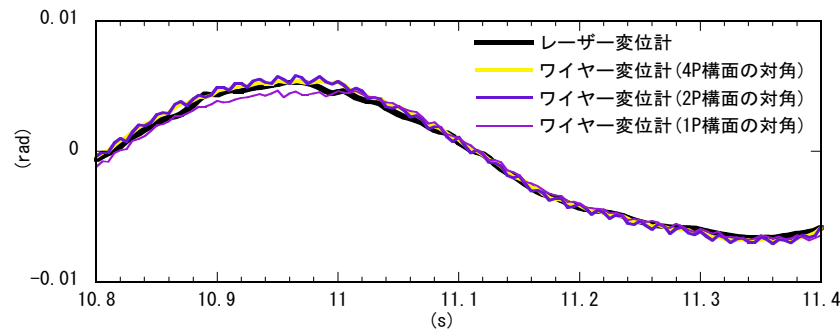


図 4.2.3-7

歪みゲージによる柱の軸力および曲げモーメントは、柱 2 面に貼り付けた歪みゲージの計測値から、軸力成分と曲げ成分を抽出して算出した。その際のヤング係数、ゲージファクター、断面積、断面係数を表 4.2.3-3 に示す。計測値の精度を確認するため、図 4.2.3-8 に軸力計と歪みゲージで計測された変動軸力を示す。

表 4.2.3-3

木材ヤング係数	—	11000	N/mm ²
柱断面積	150×150	22500	mm ²
柱断面係数	$(150 \times 150^2)/6$	562500	mm ³
ゲージファクター	2/2.12	0.943	

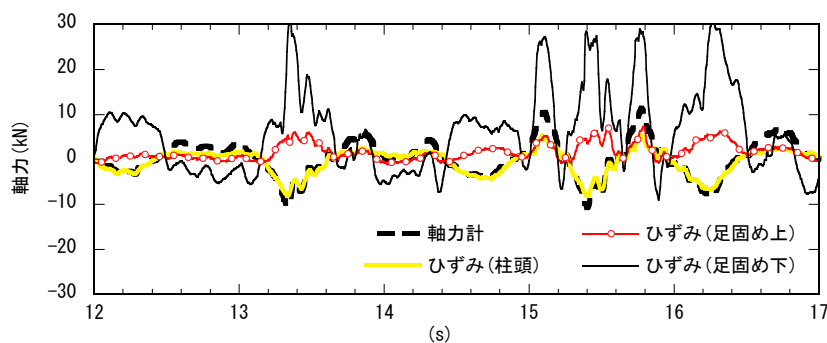
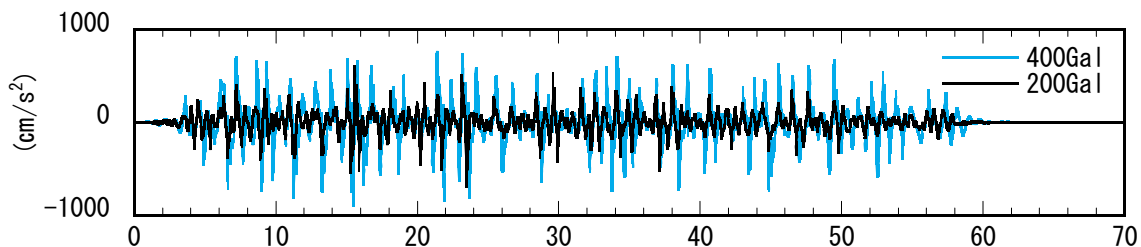


図 4.2.3-8

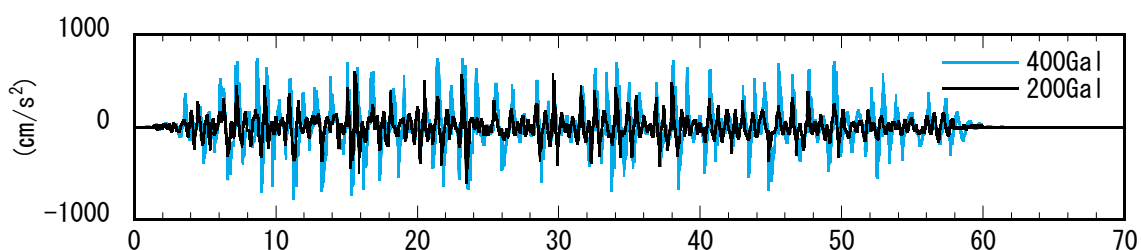
2) 時刻歴波形

① 応答加速度

各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時の桁レベルで計測された応答加速度の時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-9～4.2.3-12 に示す。

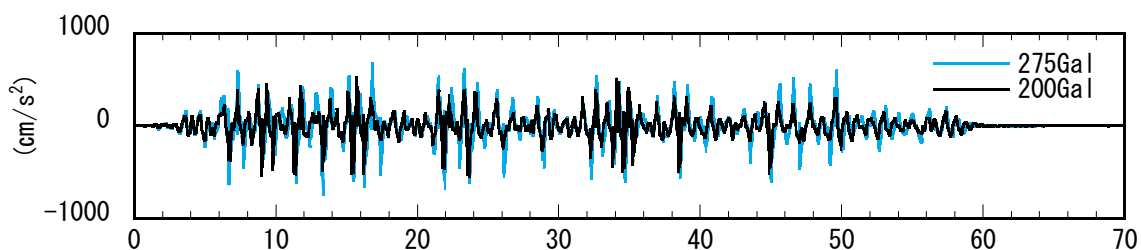


試験体 A Y1 構面 桁レベル

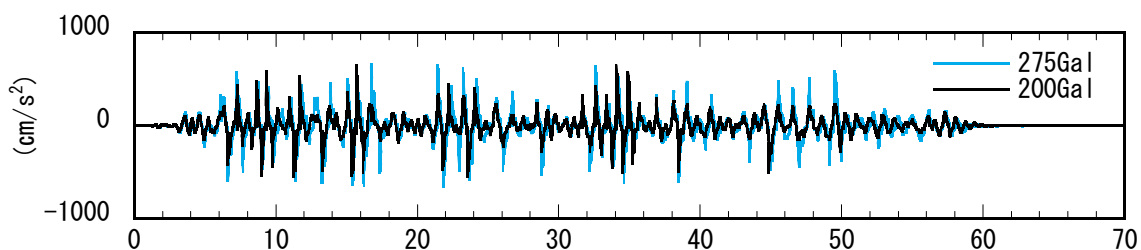


試験体 A Y5 構面 桁レベル

図 4.2.3-9 試験体 A の応答加速度 (最大入力加速度 400gal)

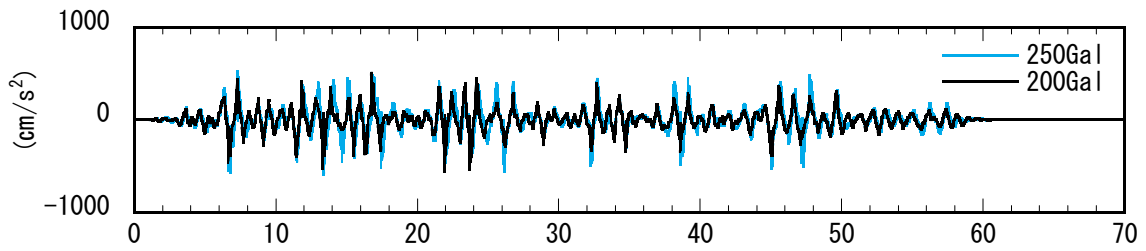


試験体 B Y1 構面 桁レベル

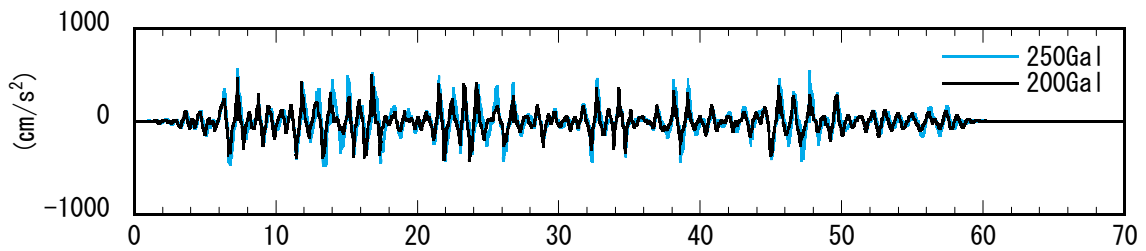


試験体 B Y5 構面 桁レベル

図 4.2.3-10 試験体 B の応答加速度

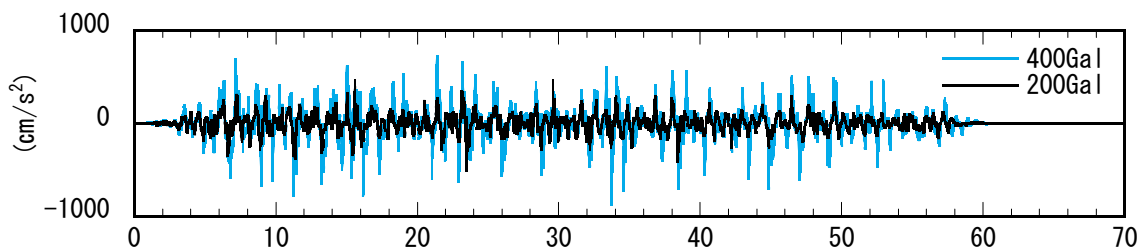


試験体 C Y1 構面 桁レベル

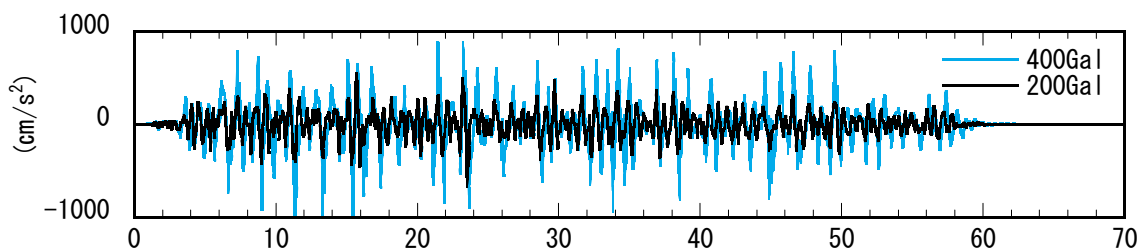


試験体 C Y5 構面 桁レベル

図 4.2.3-11 試験体 C の応答加速度



試験体 D Y1 構面 桁レベル

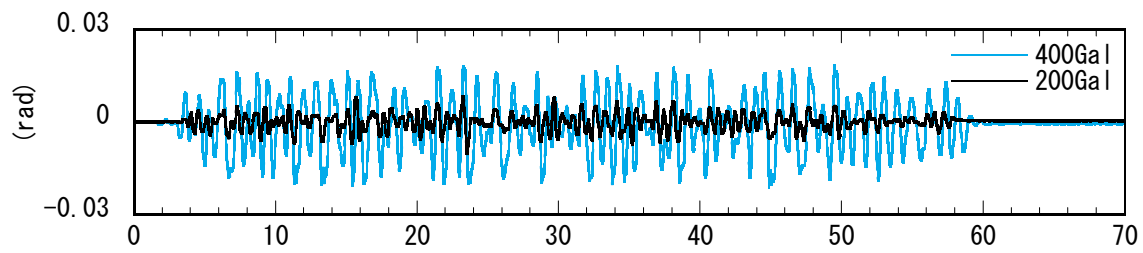


試験体 D Y5 構面 桁レベル

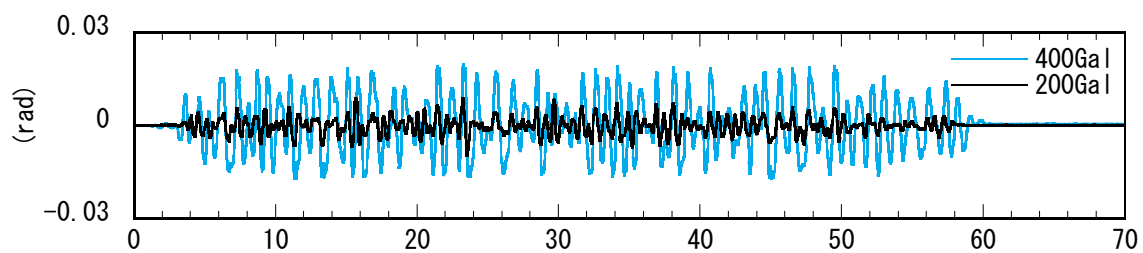
図 4.2.3-12 試験体 D の応答加速度

②応答層間変形角

各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時の桁-足固め間の層間変形角の時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-13～4.2.3-16 に示す。

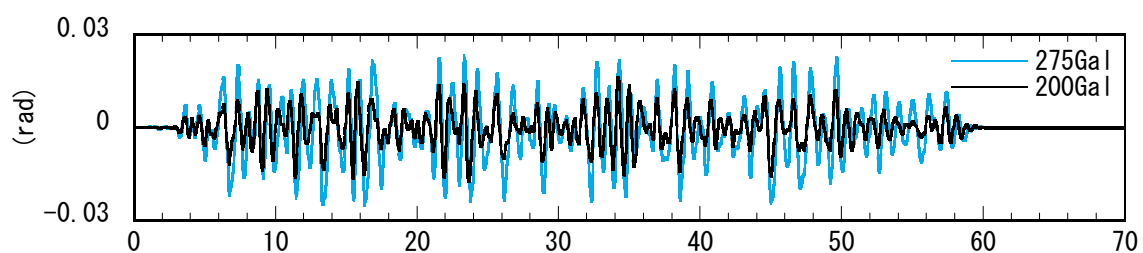


試験体 A Y1 構面

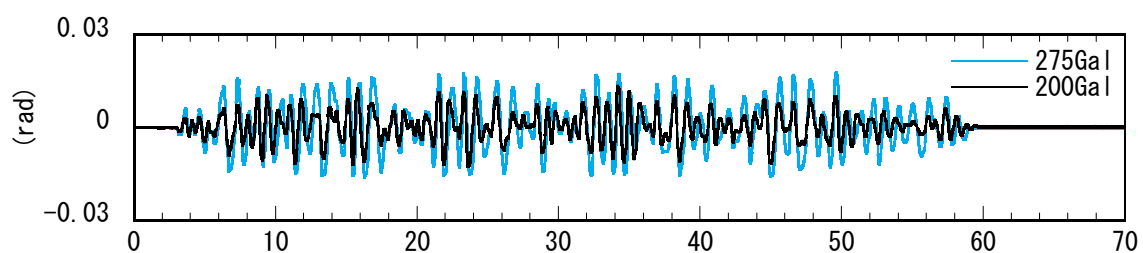


試験体 A Y5 構面

図 4.2.3-13 試験体 A の応答層間変形角

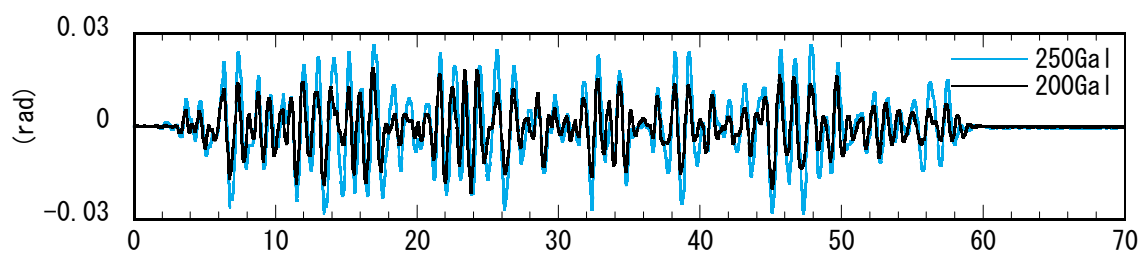


試験体 B Y1 構面

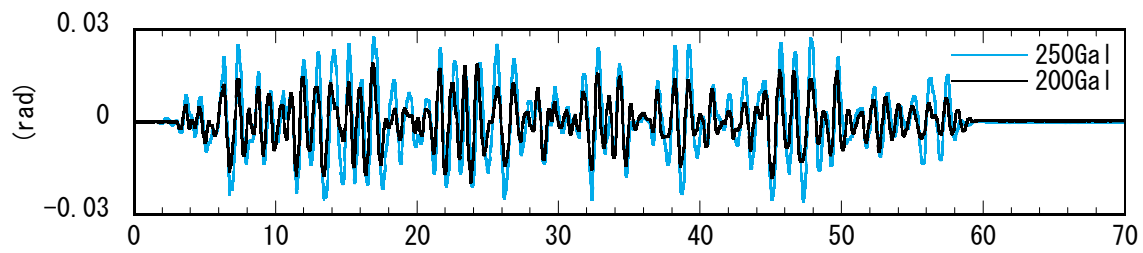


試験体 B Y5 構面

図 4.2.3-14 試験体 B の応答層間変形角

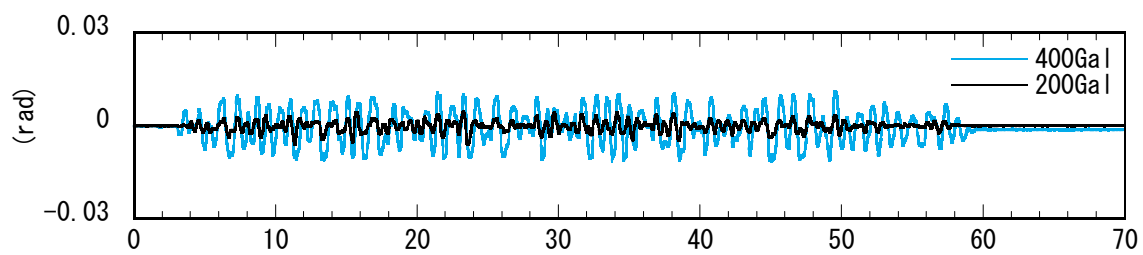


試験体 C Y1 構面

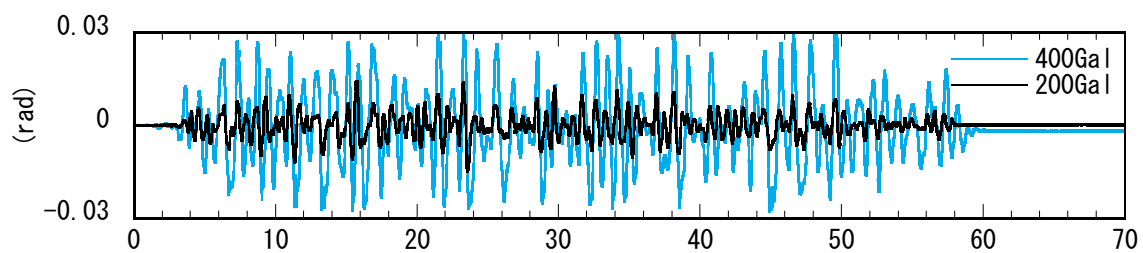


試験体 C Y5 構面

図 4.2.3-15 試験体 C の応答層間変形角



試験体 D Y1 構面

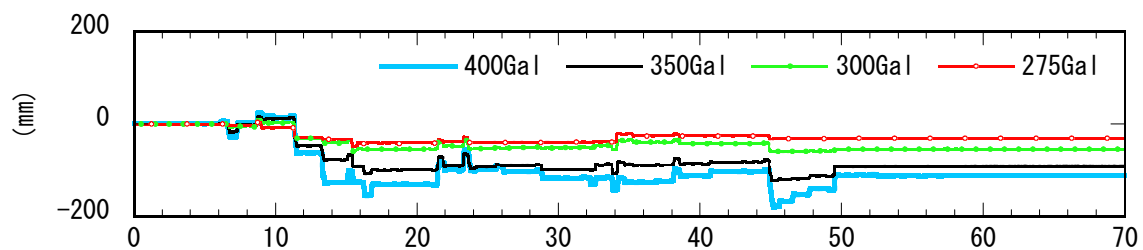


試験体 D Y5 構面

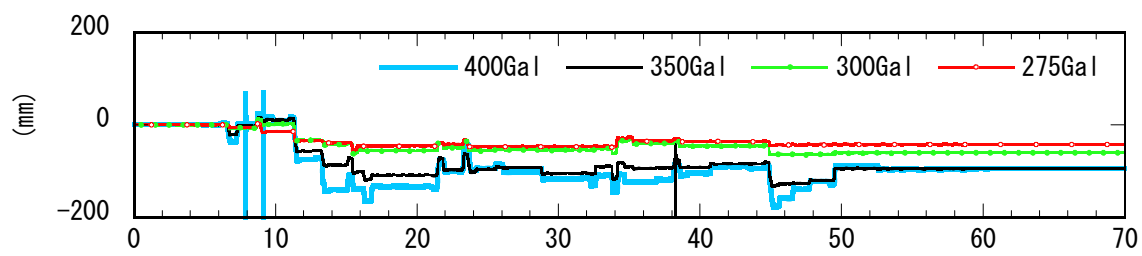
図 4.2.3-16 試験体 D の応答層間変形角

③柱脚部のすべり

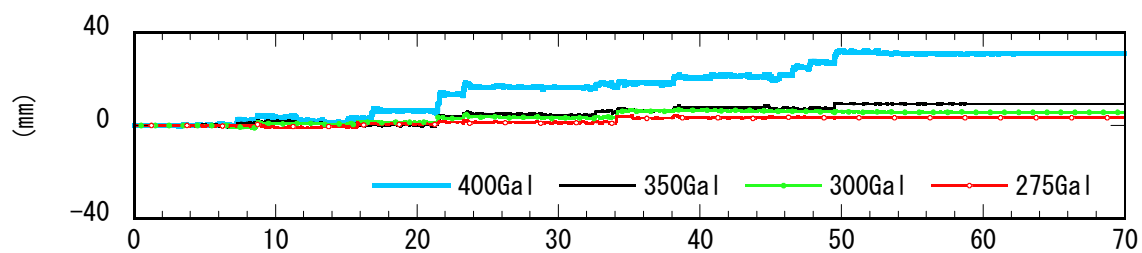
各試験体において入力加速度 275 cm/s² 以降の柱脚すべりの時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-17～4.2.3-20 に示す。



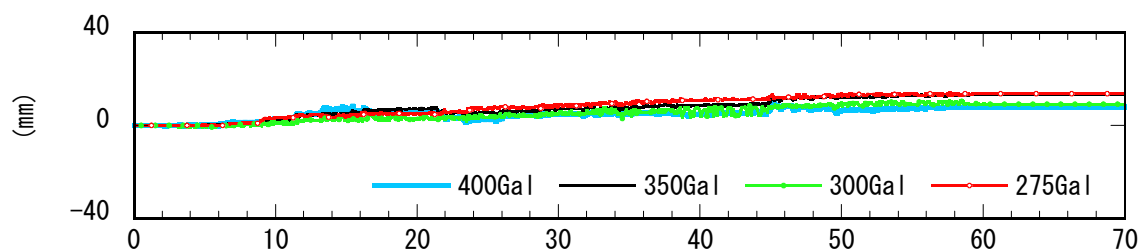
試験体 A Y1 構面



試験体 A Y5 構面

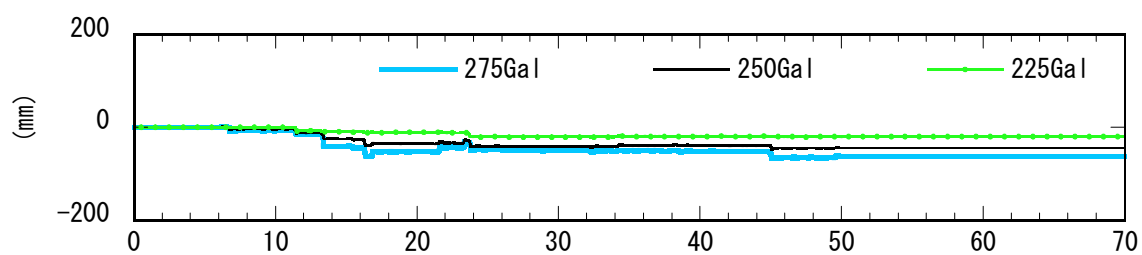


試験体 A X1 構面

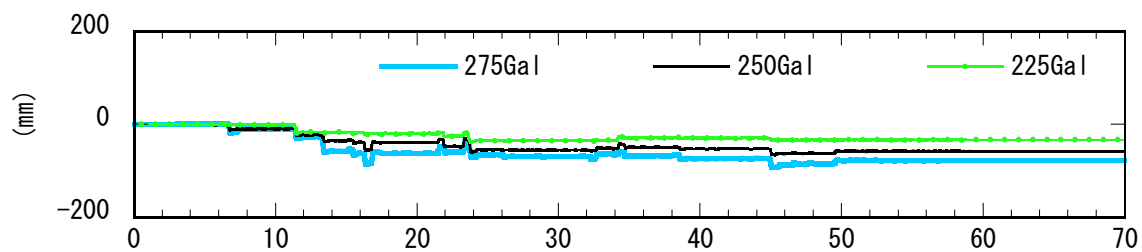


試験体 A X5 構面

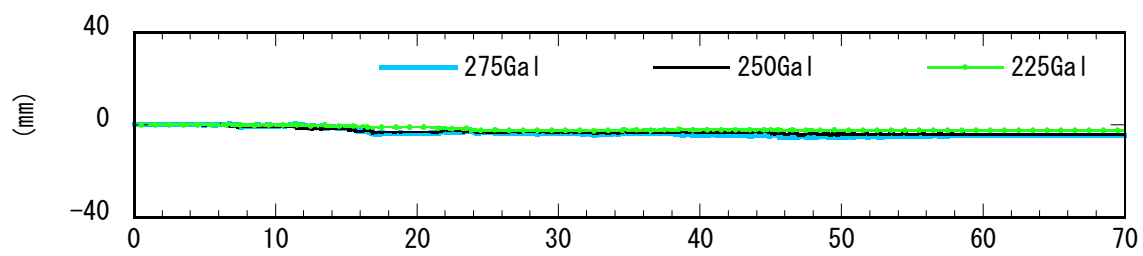
図 4.2.3-17 試験体 A の柱脚すべり



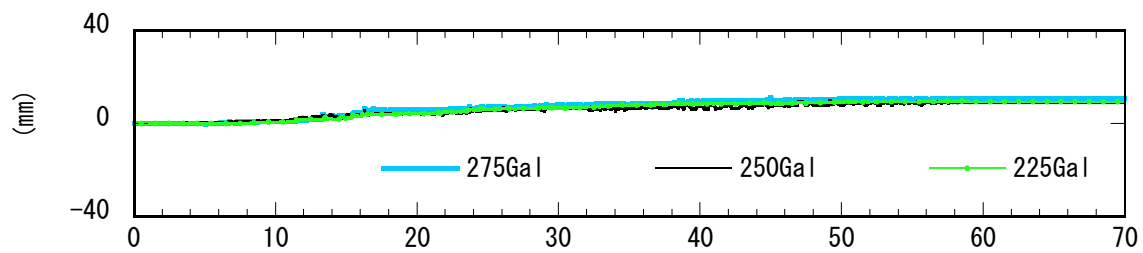
試験体 B Y1 構面



試験体 B Y5 構面

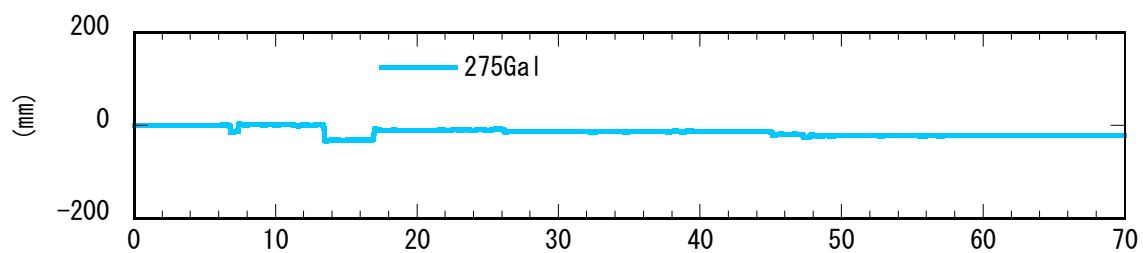


試験体 B X1 構面

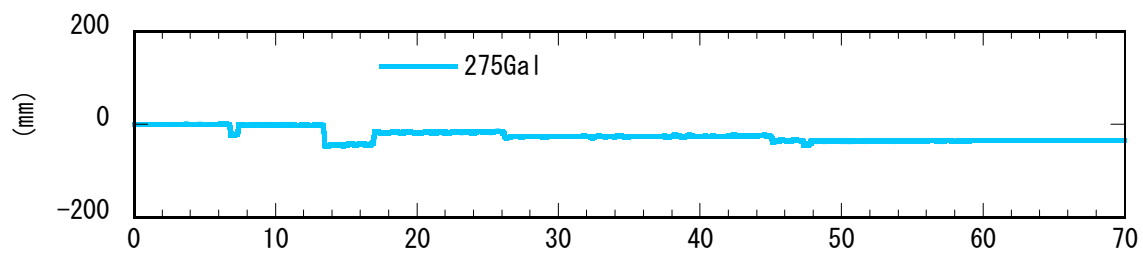


試験体 B X5 構面

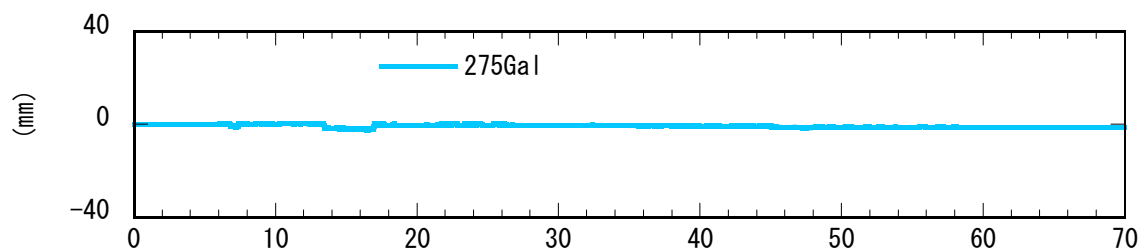
図 4.2.3-18 試験体 B の柱脚すべり



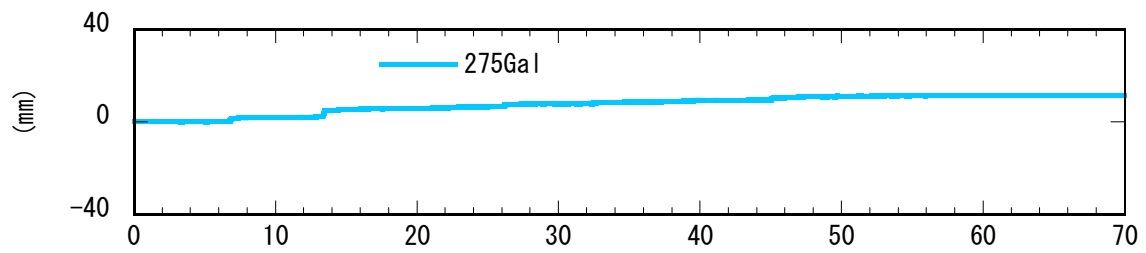
試験体 C Y1 構面



試験体 C Y5 構面

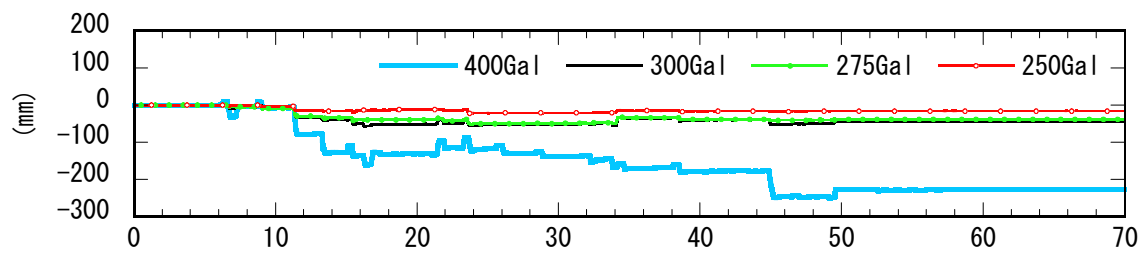


試験体 C X1 構面

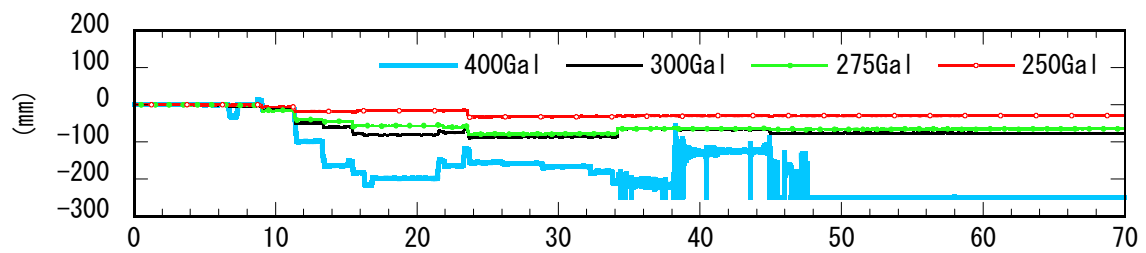


試験体 C X5 構面

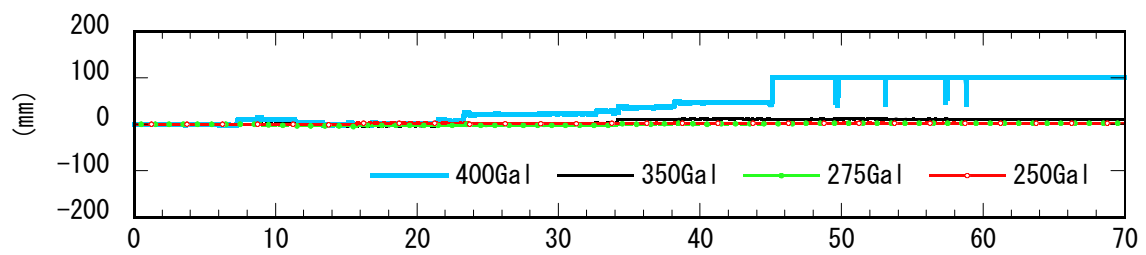
図 4.2.3-19 試験体 C の柱脚すべり



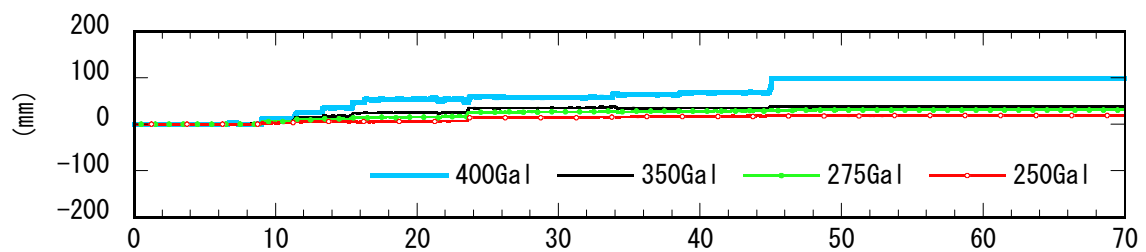
試験体 D Y1 構面



試験体 D Y5 構面



試験体 D X1 構面



試験体 D X5 構面

図 4.2.3-20 試験体 D の柱脚すべり

④柱脚部の浮き上がり

各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時の柱脚部浮き上がりの時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-21～4.2.3-24 に示す。ただし柱 a 側面は試験体正面に対して左面、b 側面は試験体正面、c 側面は試験体正面に対して右面、d 側面は試験体裏面としている。

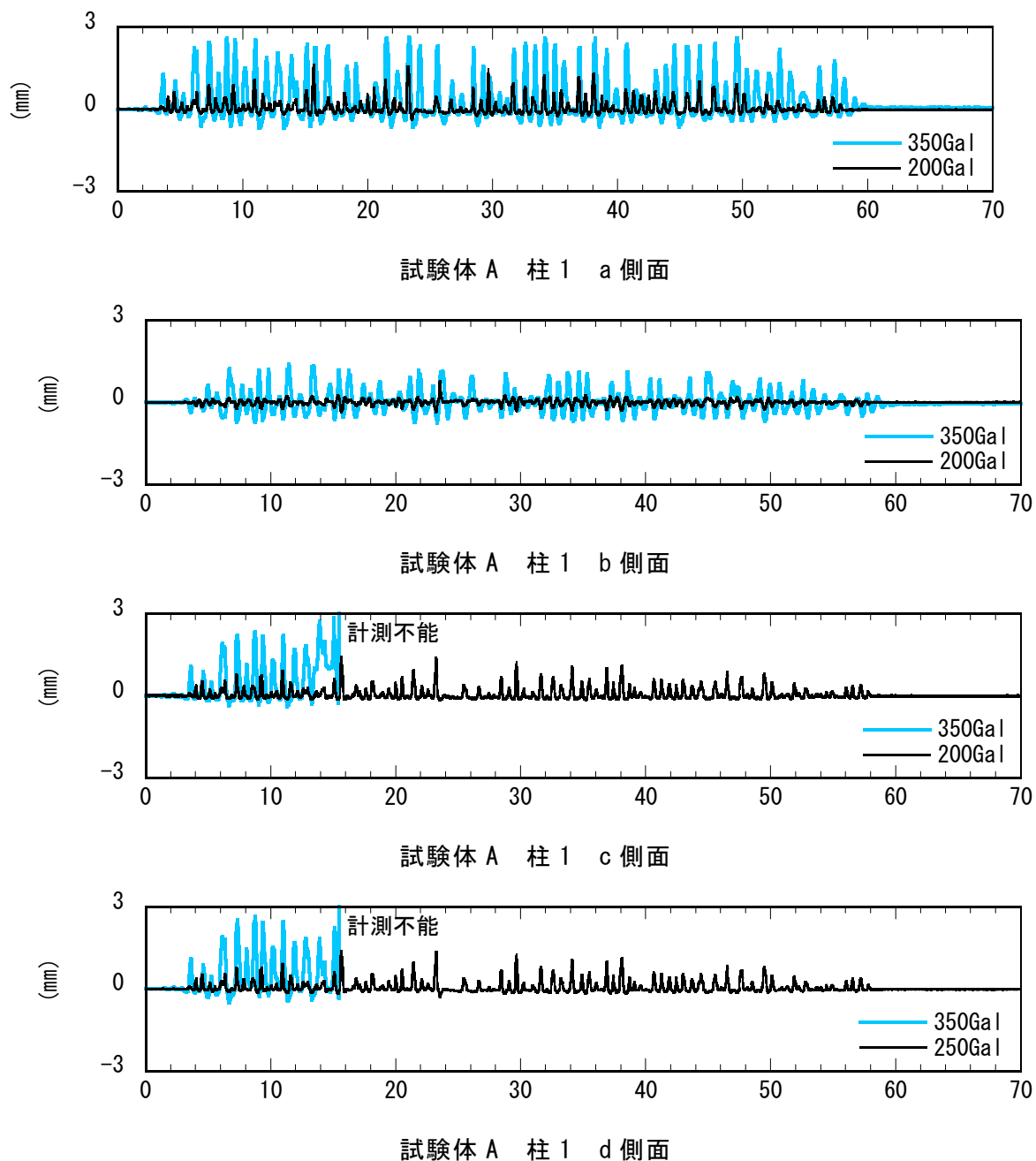
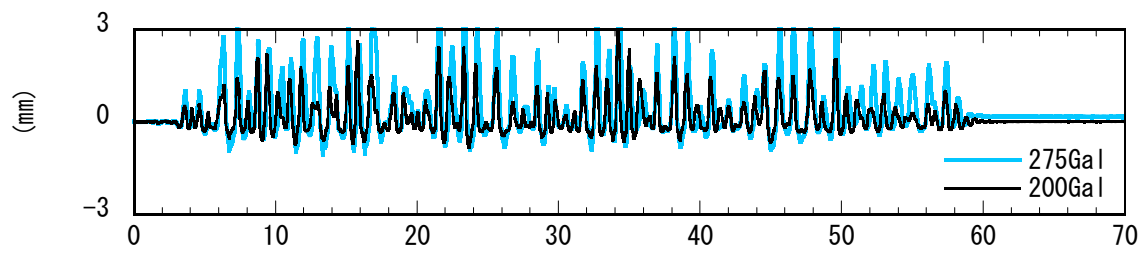
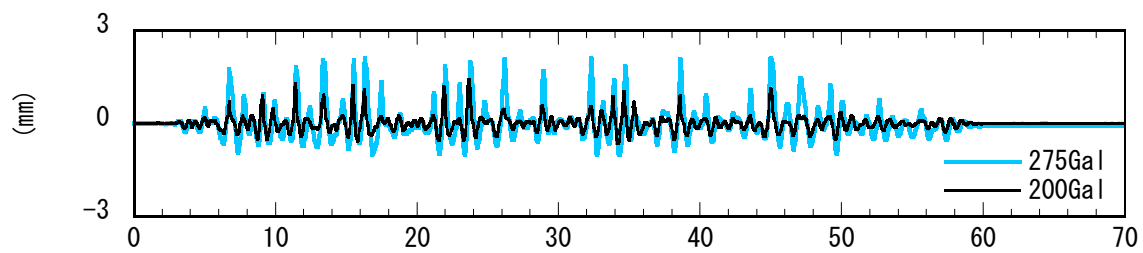


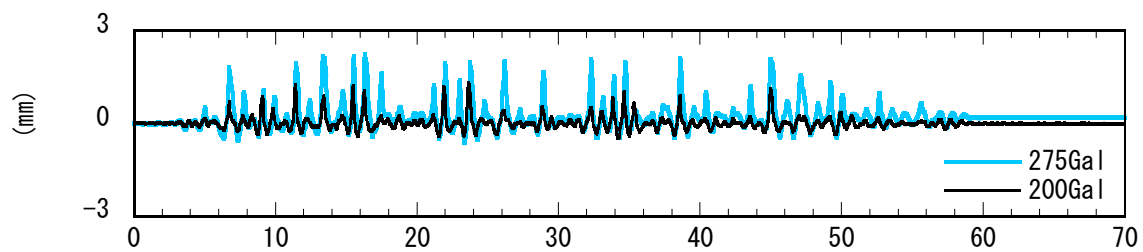
図 4.2.3-21 試験体 A 柱 1 の浮き上がり



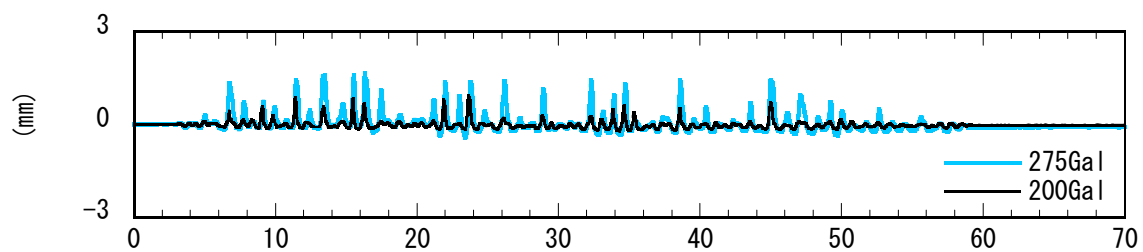
試験体 B 柱 1 a 側面



試験体 B 柱 1 b 側面

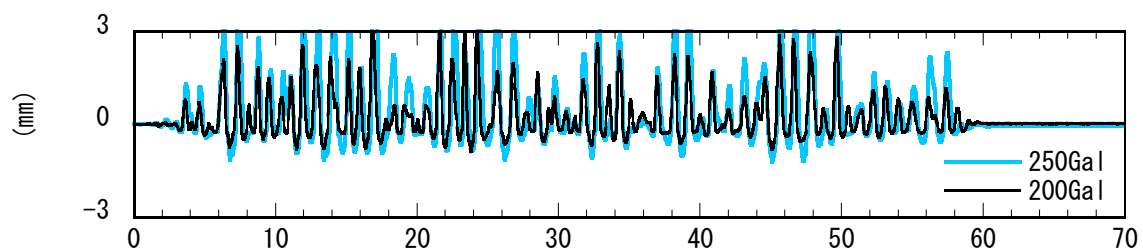


試験体 B 柱 1 c 側面

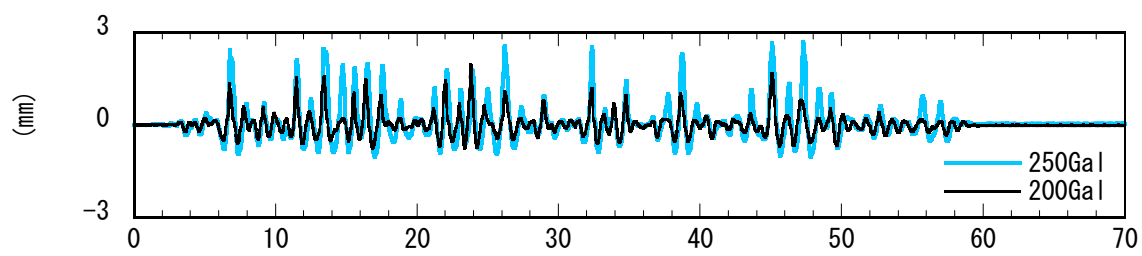


試験体 B 柱 1 d 側面

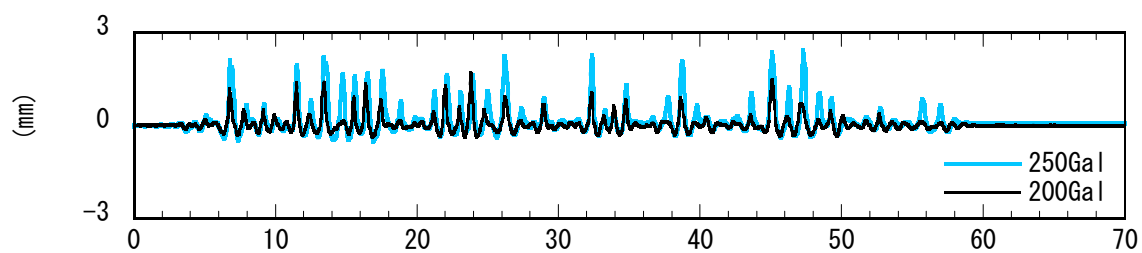
図 4.2.3-22 試験体 B 柱 1 の浮き上がり



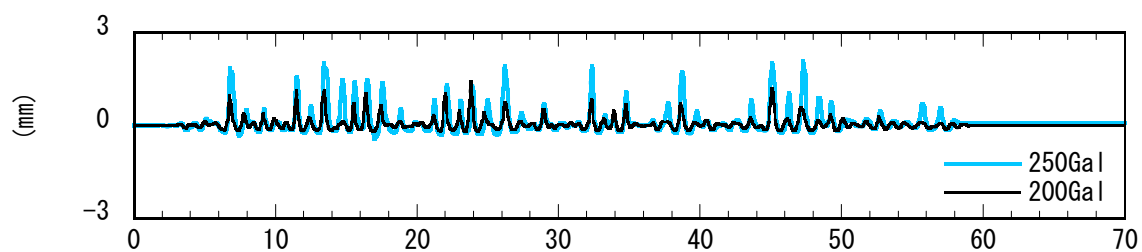
試験体 C 柱 1 a 側面



試験体 C 柱 1 b 側面

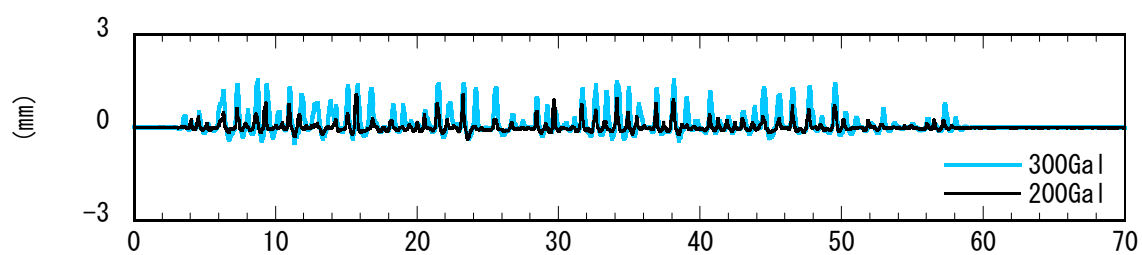


試験体 C 柱 1 c 側面

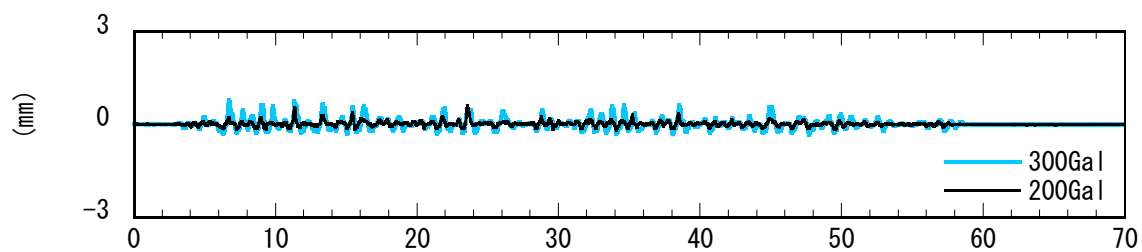


試験体 C 柱 1 d 側面

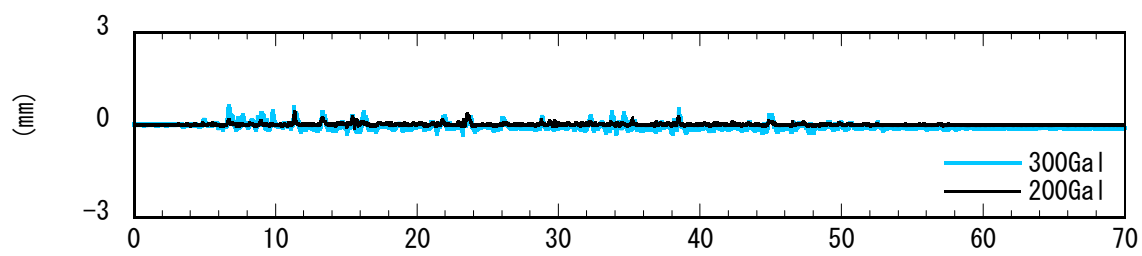
図 4.2.3-23 試験体 C 柱 1 の浮き上がり



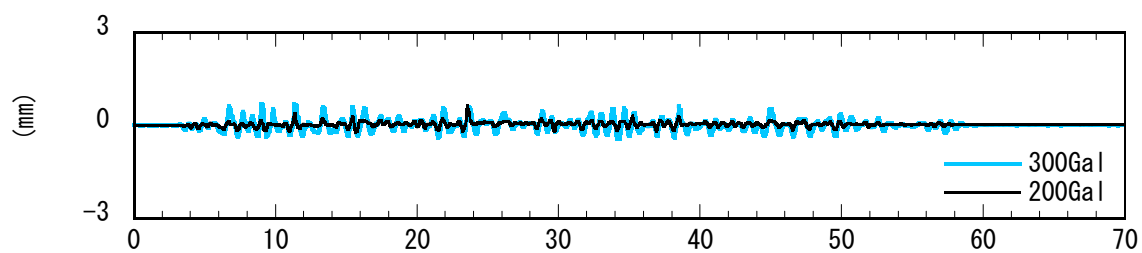
試験体 D 柱 1 a 側面



試験体 D 柱 1 b 側面



試験体 D 柱 1 c 側面

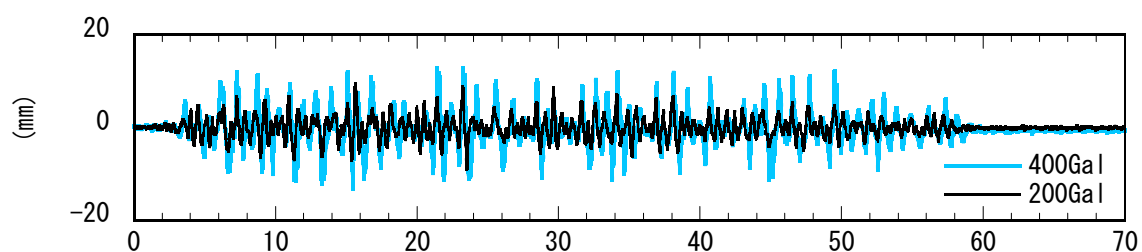


試験体 D 柱 1 d 側面

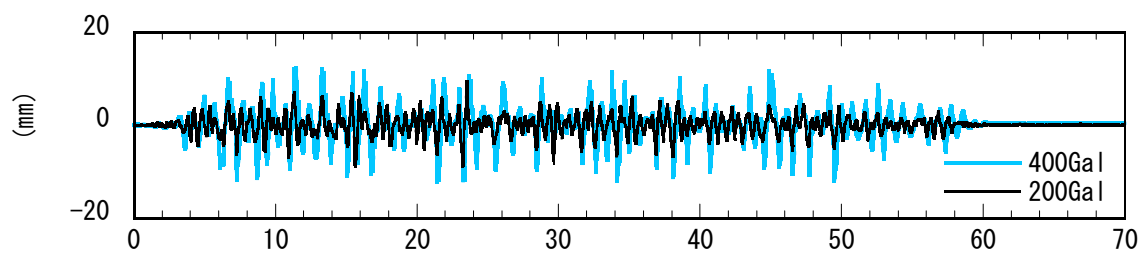
図 4.2.3-24 試験体 D 柱 1 の浮き上がり

⑤軸力

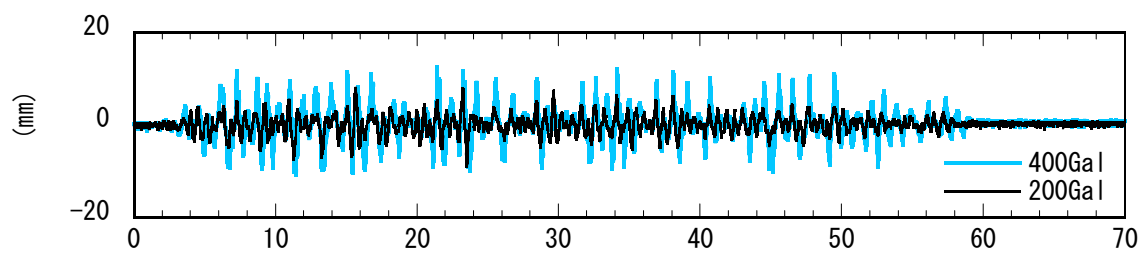
各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時のロードセルで計測された変動軸力の時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-25～4.2.3-28 に示す。



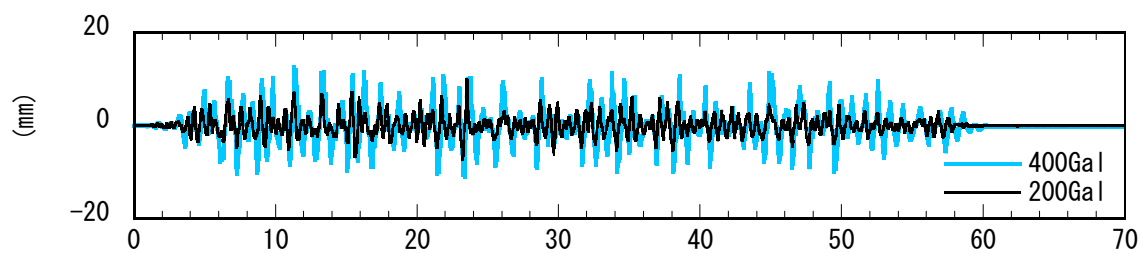
試験体 A 柱 1



試験体 A 柱 2

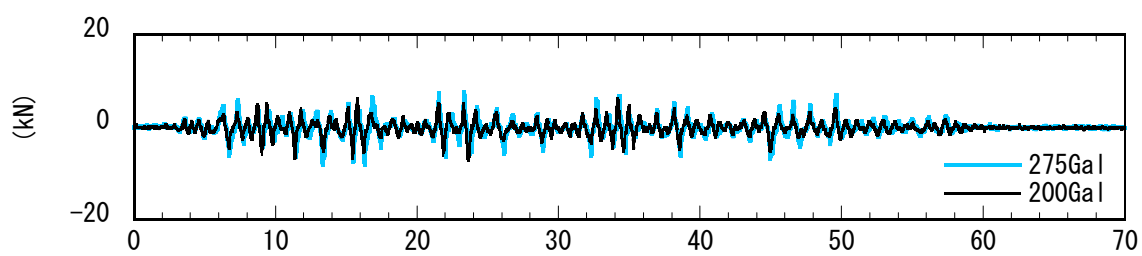


試験体 A 柱 3

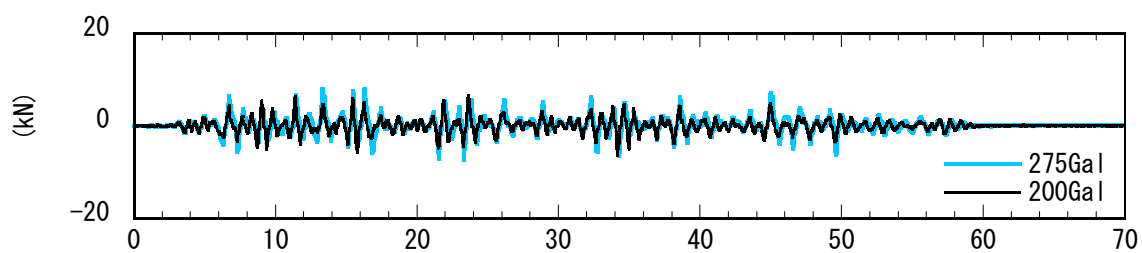


試験体 A 柱 4

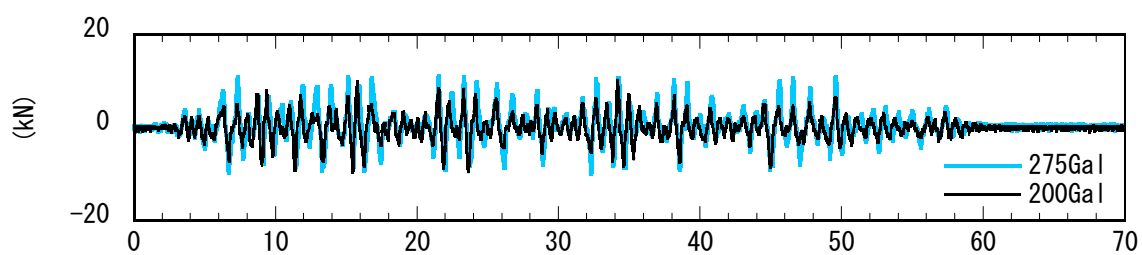
図 4.2.3-25 試験体 A の変動軸力



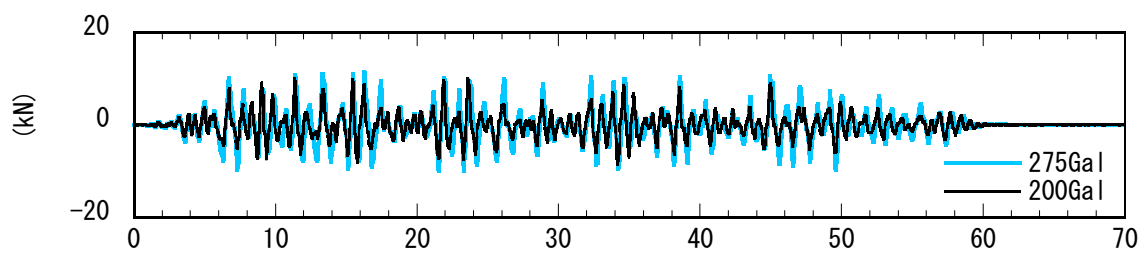
試験体 B 柱 1



試験体 B 柱 2

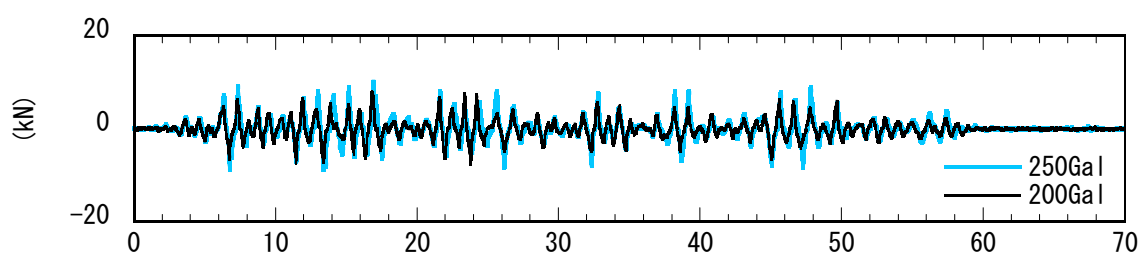


試験体 B 柱 3

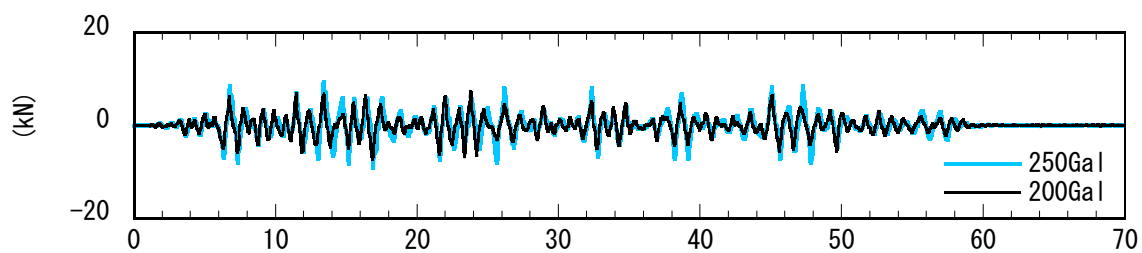


試験体 B 柱 4

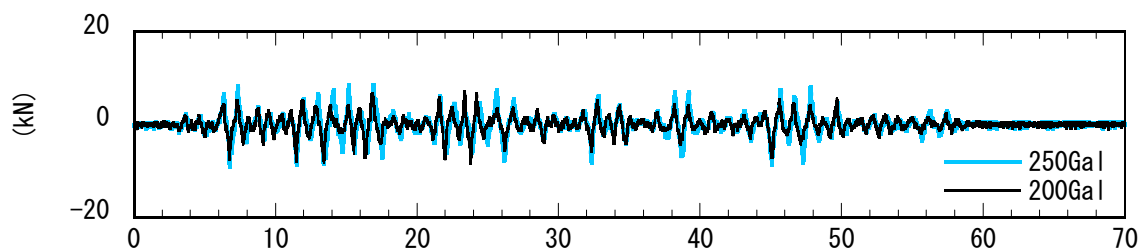
図 4.2.3-26 試験体 B の変動軸力



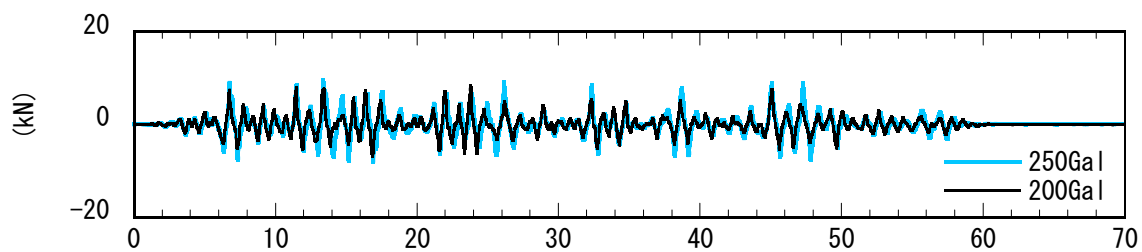
試験体 C 柱 1



試験体 C 柱 2



試験体 C 柱 3



試験体 C 柱 4

図 4.2.3-27 試験体 C の変動軸力

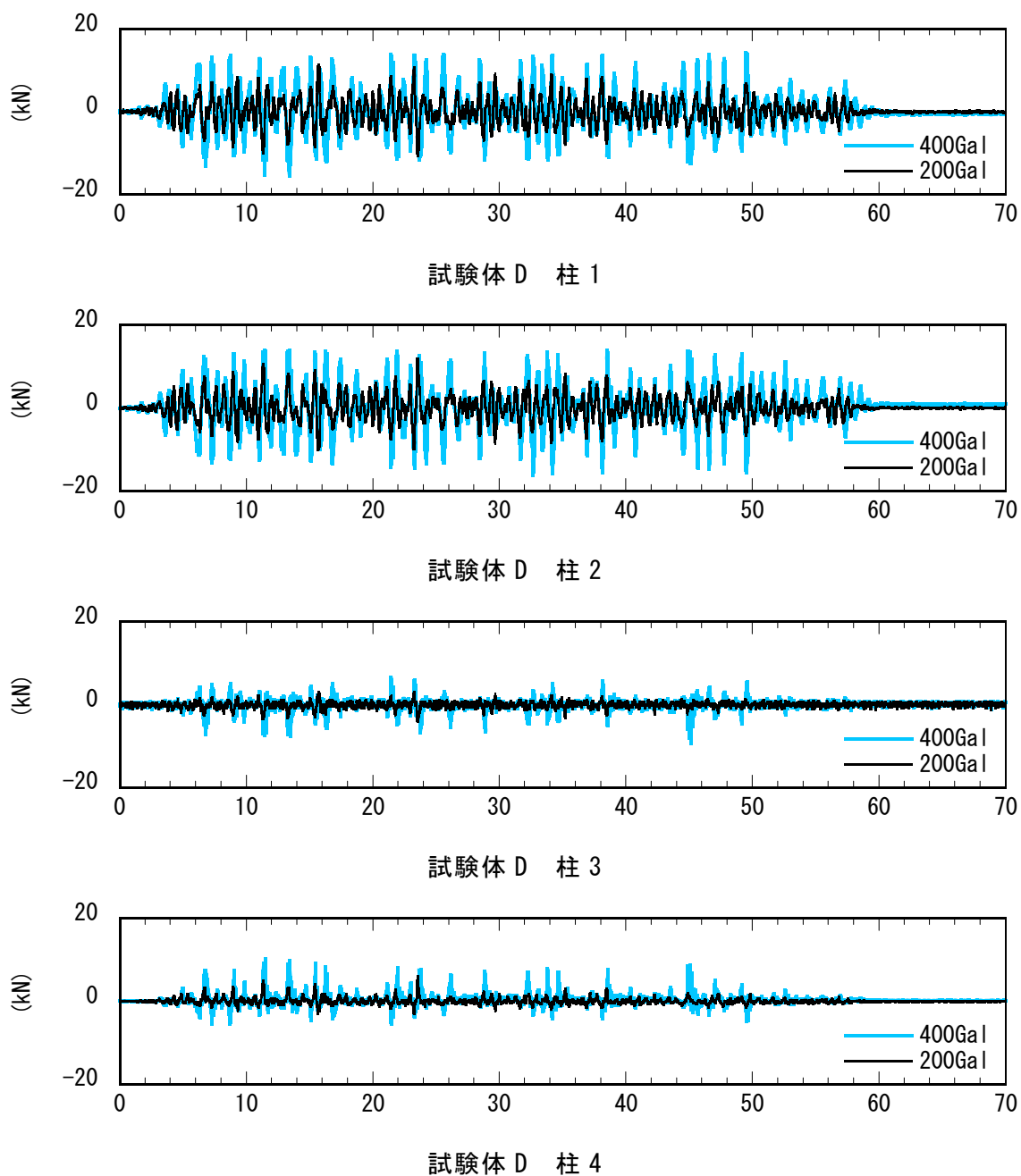
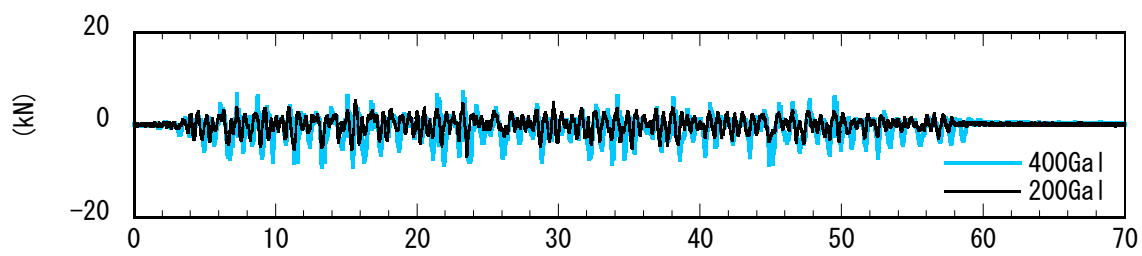


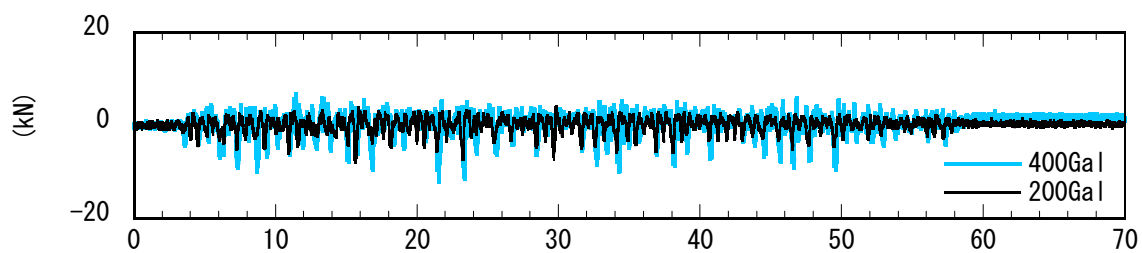
図 4.2.3-28 試験体 D の変動軸力

⑥ひずみ(軸力)

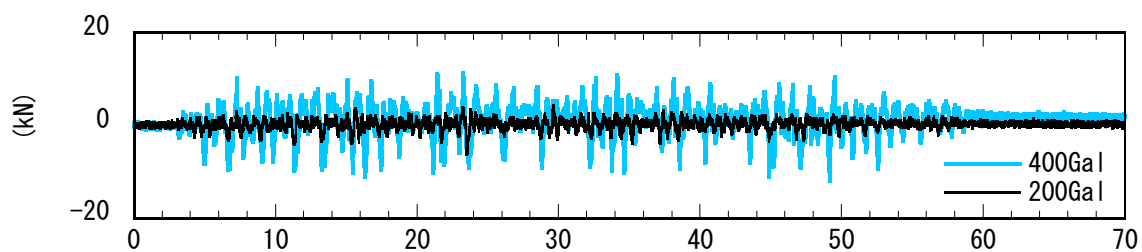
各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時のひずみゲージによって計測された変動軸力の時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-29～4.2.3-4.2.3-32 に示す。



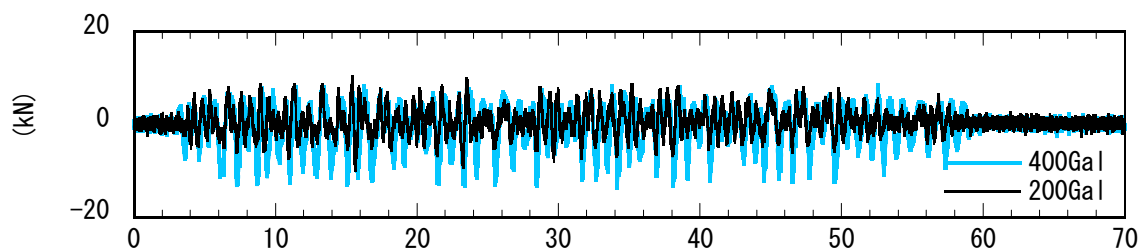
試験体 A 柱 1



試験体 A 柱 2

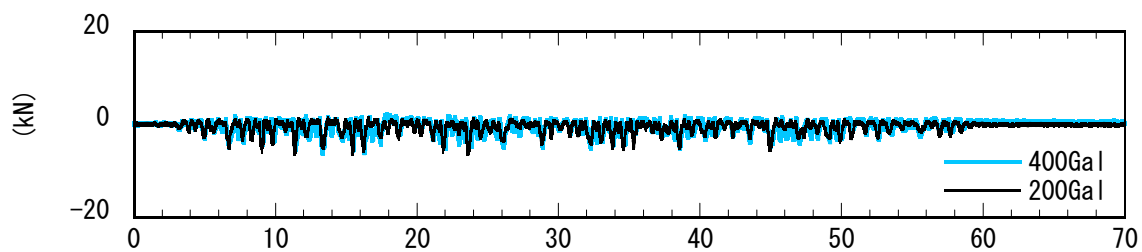


試験体 A 柱 3

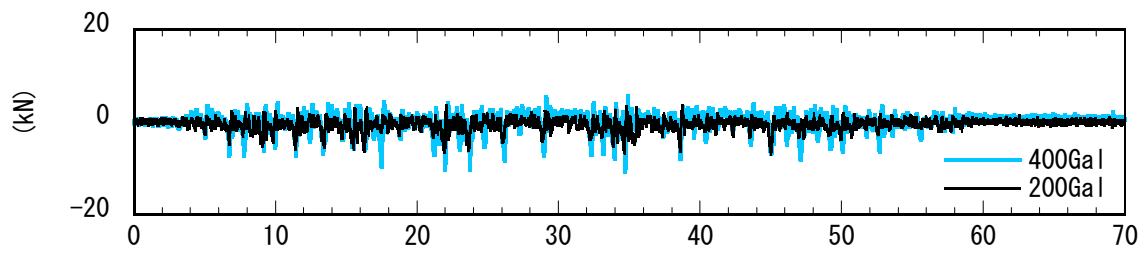


試験体 A 柱 4

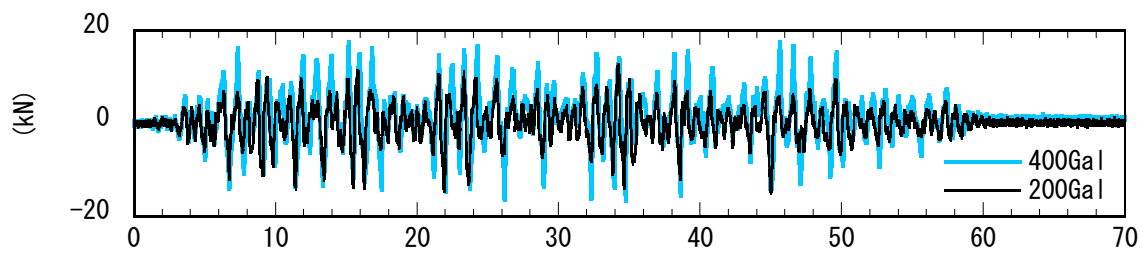
図 4. 2. 3-29 試験体 A の変動軸力 (ひずみ)



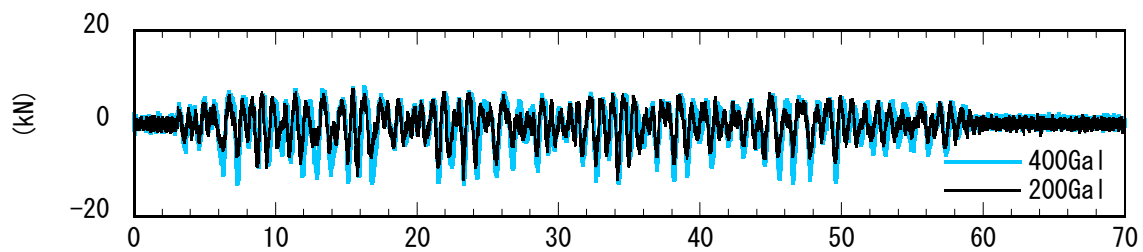
試験体 B 柱 1



試験体 B 柱 2

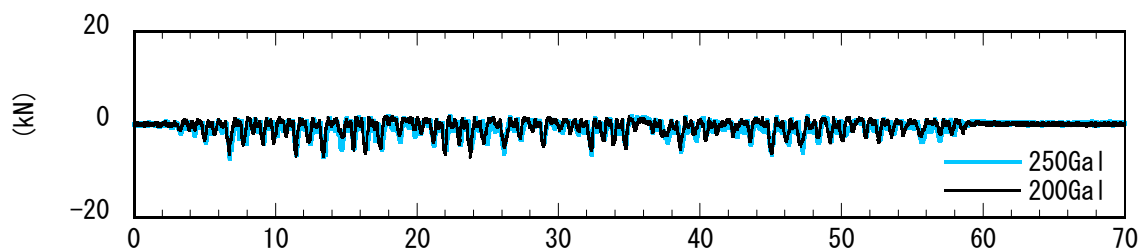


試験体 B 柱 3

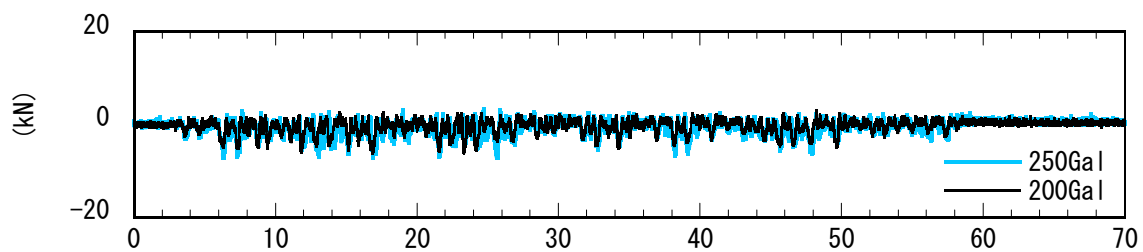


試験体 B 柱 4

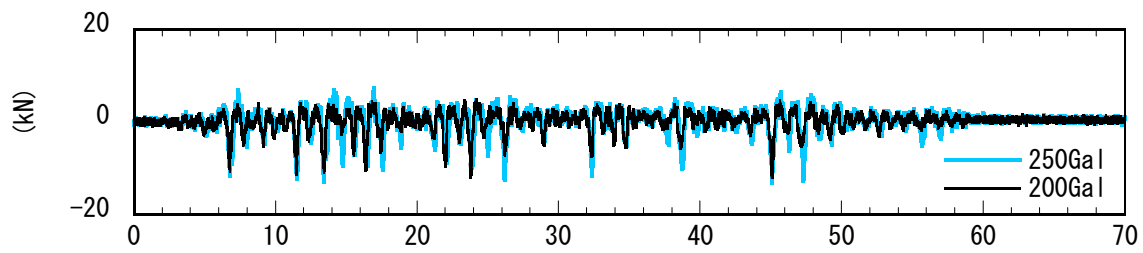
図 4. 2. 3-30 試験体 B の変動軸力 (ひずみ)



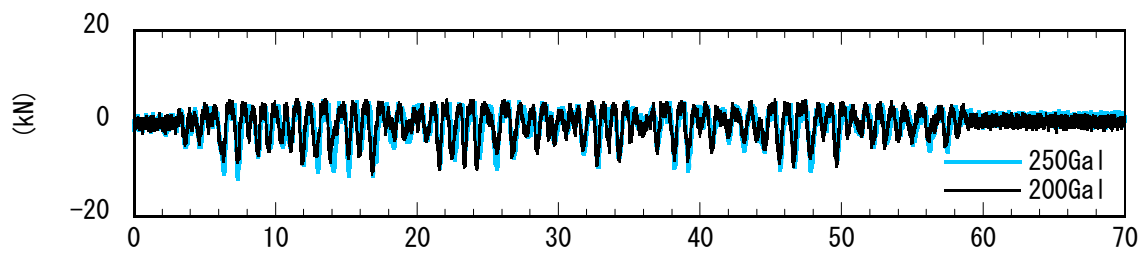
試験体 C 柱 1



試験体 C 柱 2

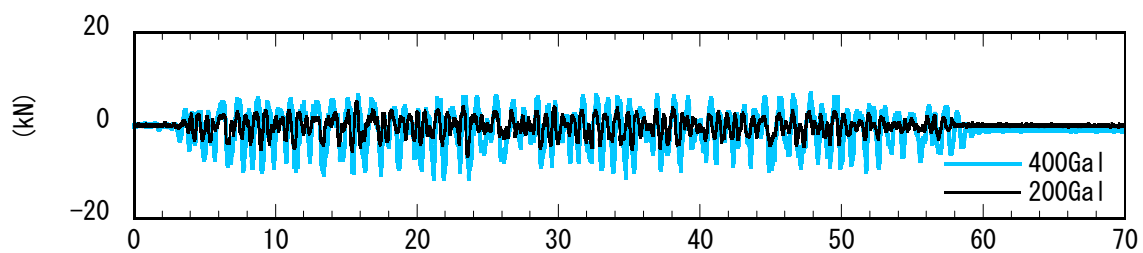


試験体 C 柱 3

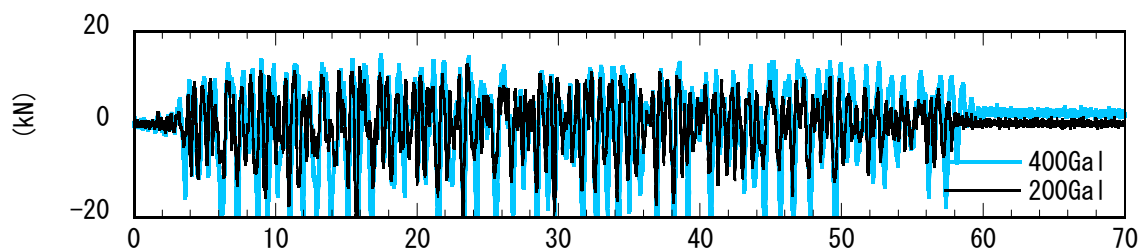


試験体 C 柱 4

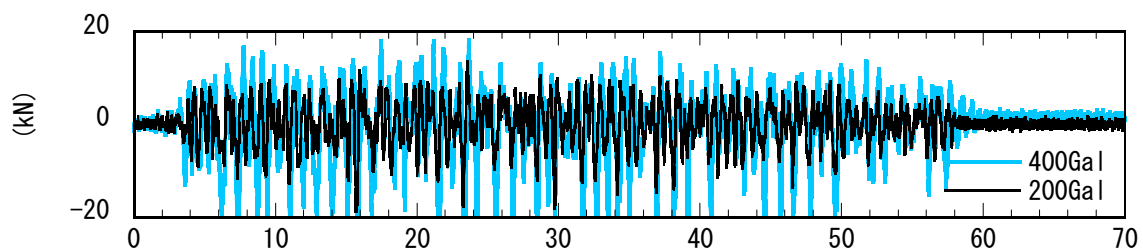
図 4.2.3-31 試験体 C の変動軸力 (ひずみ)



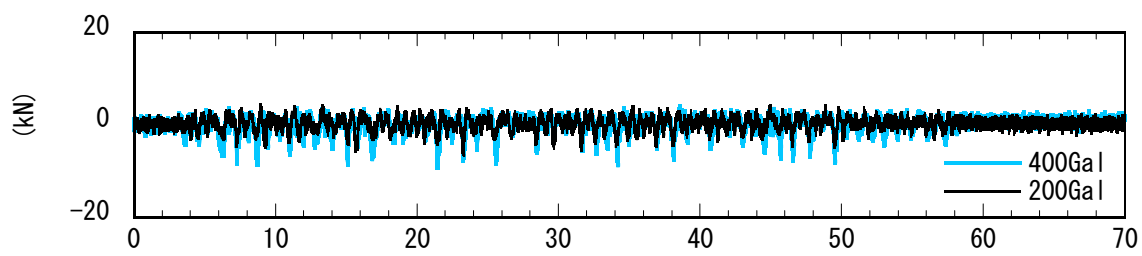
試験体 D 柱 1



試験体 D 柱 2



試験体 D 柱 3

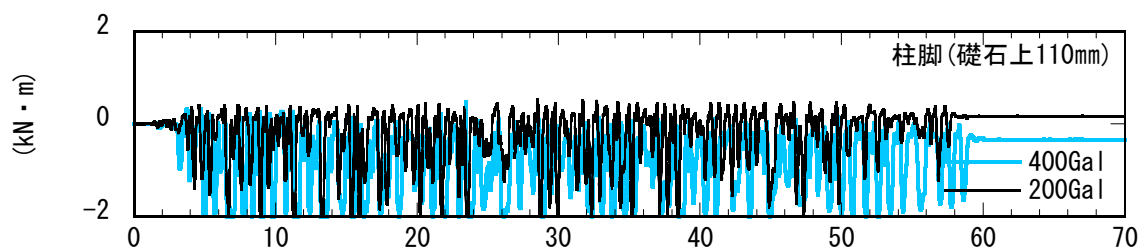
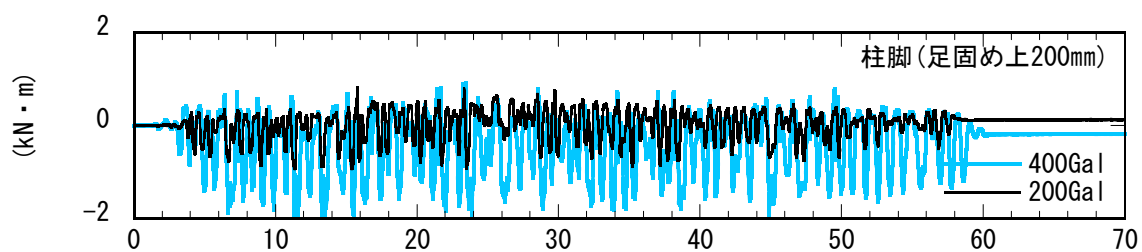


試験体 D 柱 4

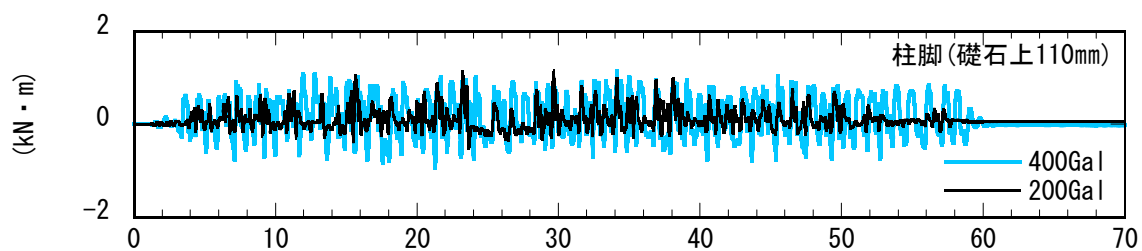
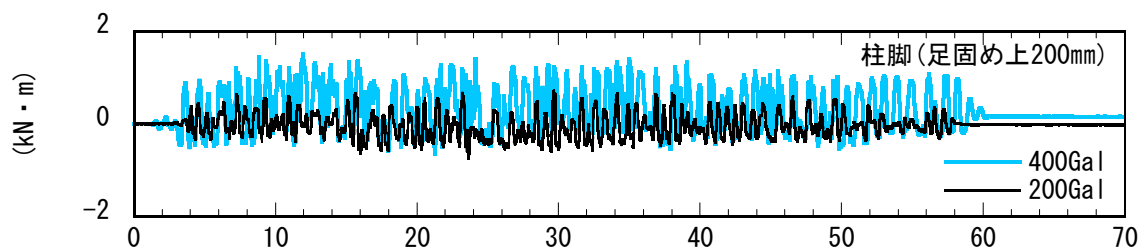
図 4.2.3-32 試験体 D の変動軸力 (ひずみ)

⑦ひずみ(曲げ)

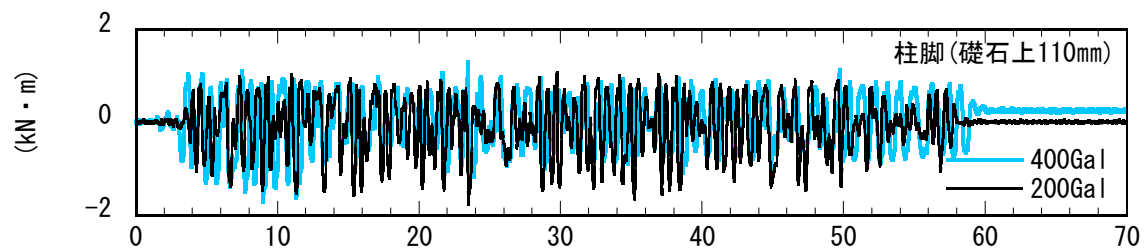
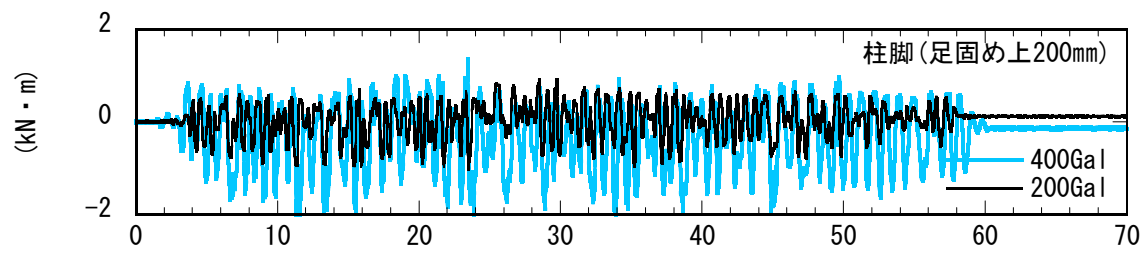
各試験体において入力加速度 200 cm/s² 時と最も大きく入力した時のひずみゲージによって計測された柱の曲げモーメントの時刻歴をそれぞれ図 4.2.3-33～4.2.3-36 に示す。



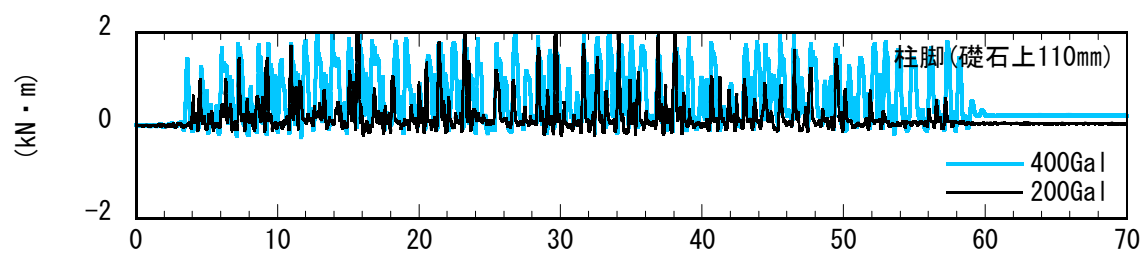
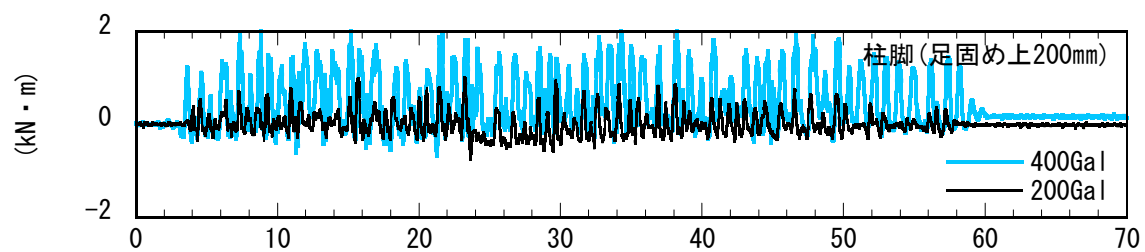
試験体 A 柱 1



試験体 A 柱 2

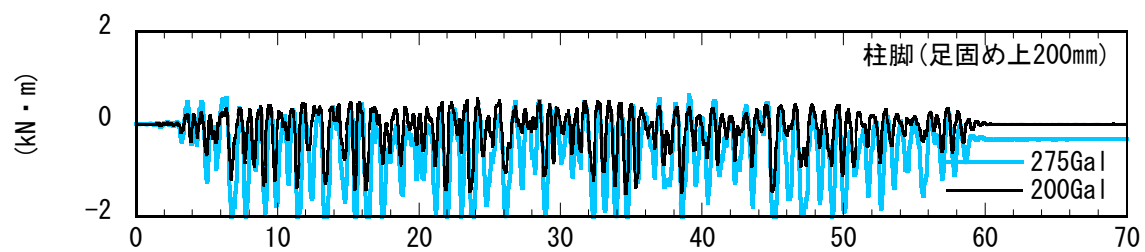


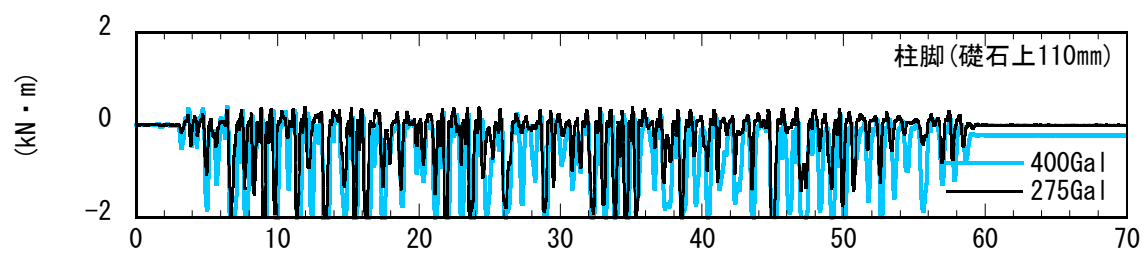
試験体 A 柱 3



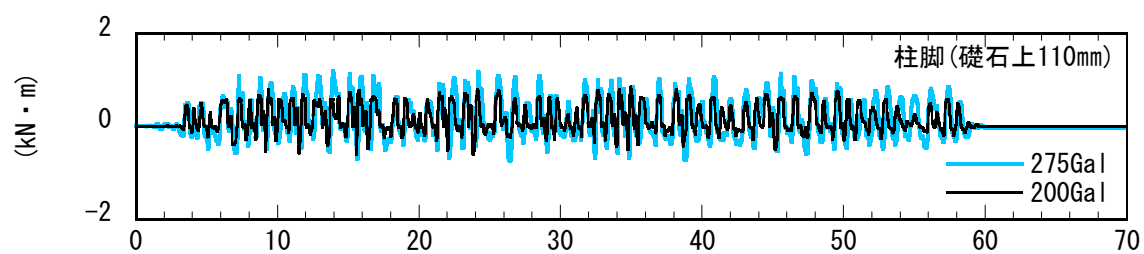
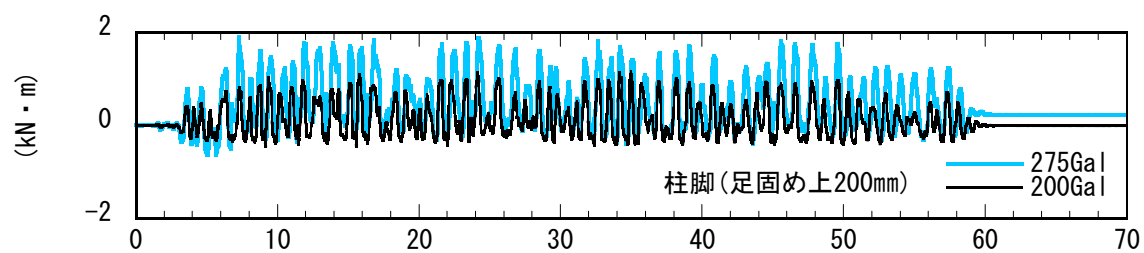
試験体 A 柱 4

図 4.2.3-33 試験体 A の曲げモーメント

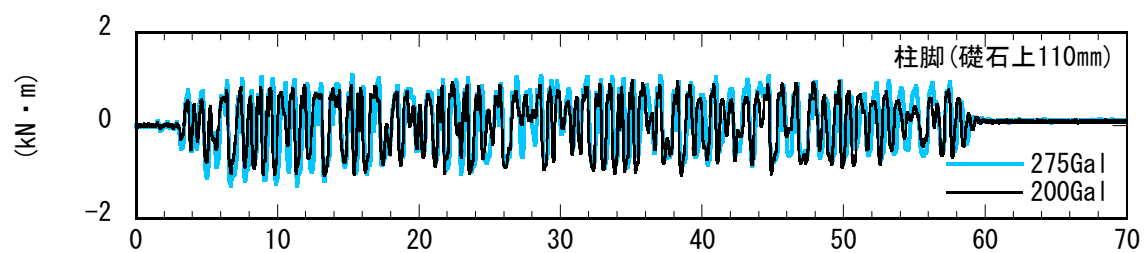
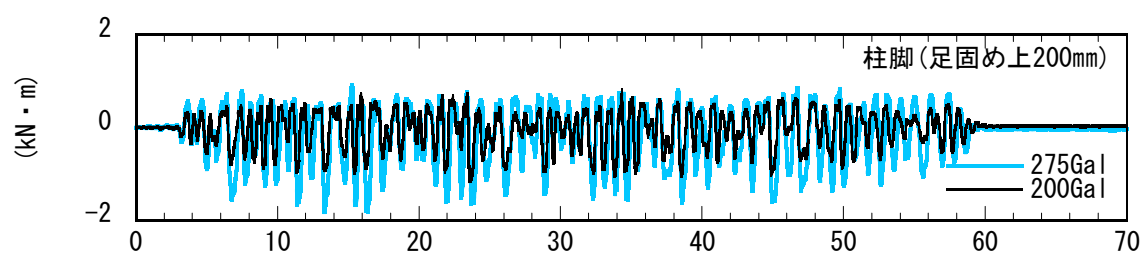




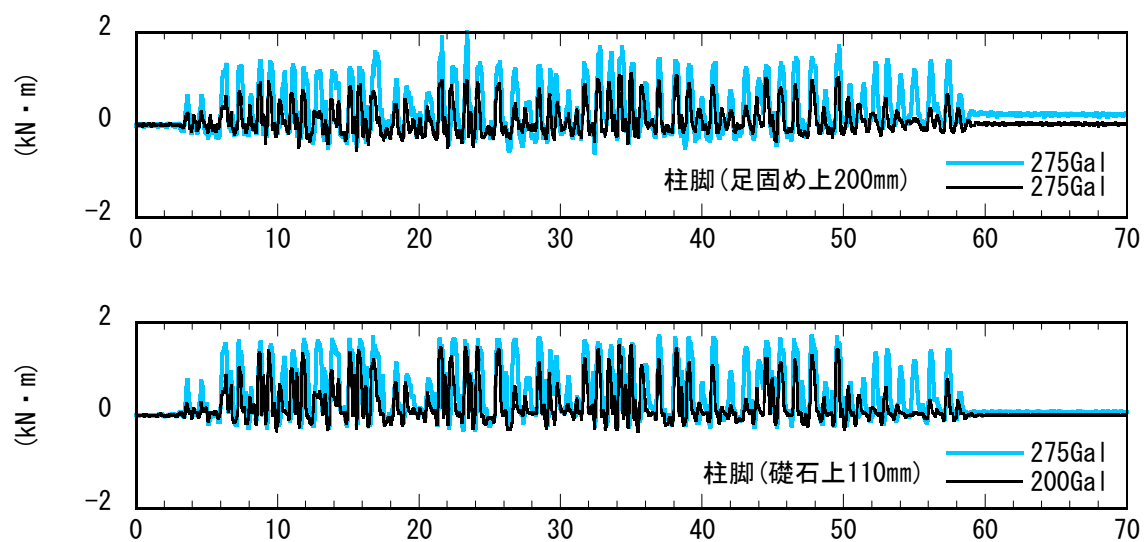
試験体 B 柱 1



試験体 B 柱 2

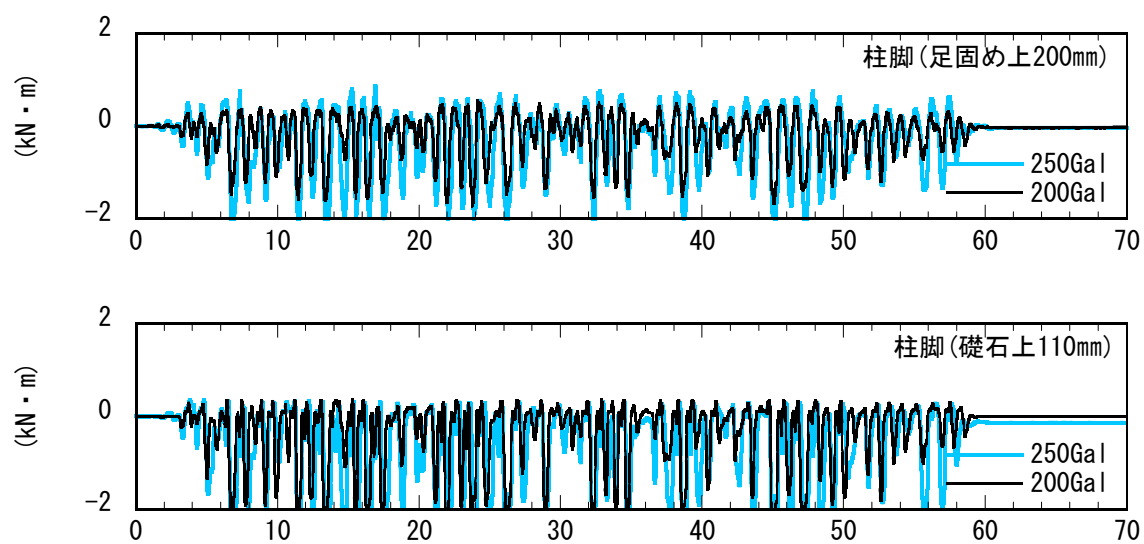


試験体 B 柱 3

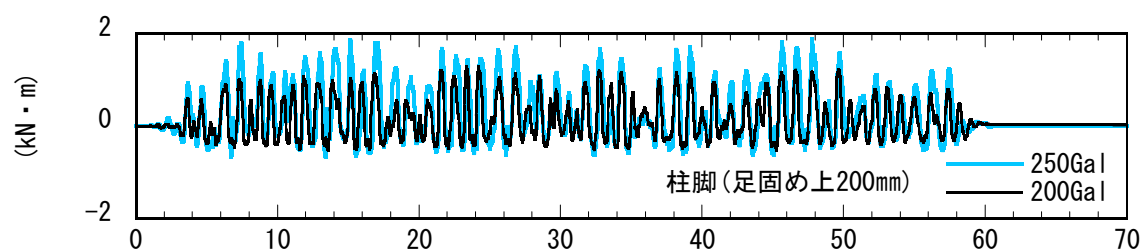


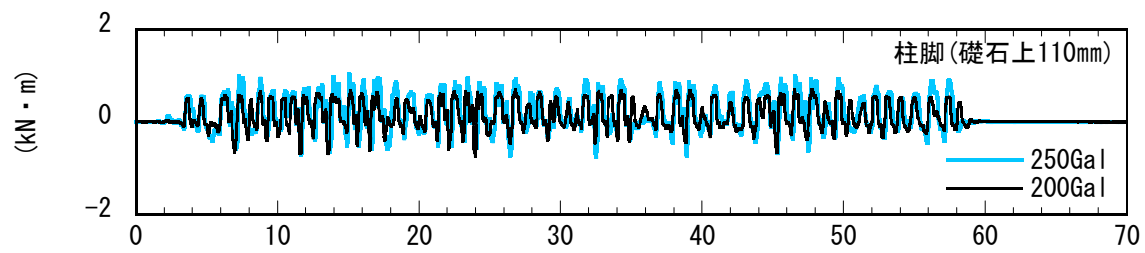
試験体 B 柱 4

図 4.2.3-34 試験体 B の曲げモーメント

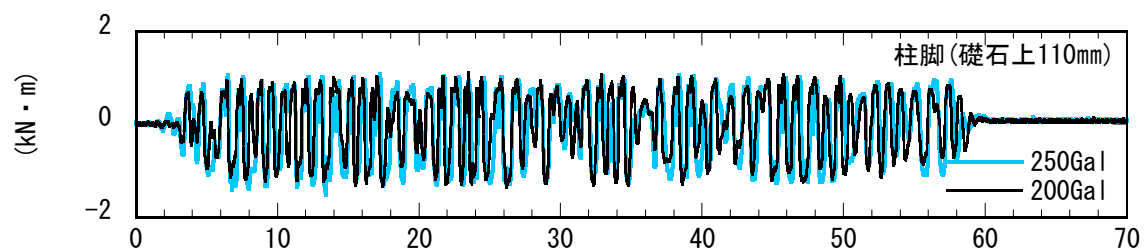
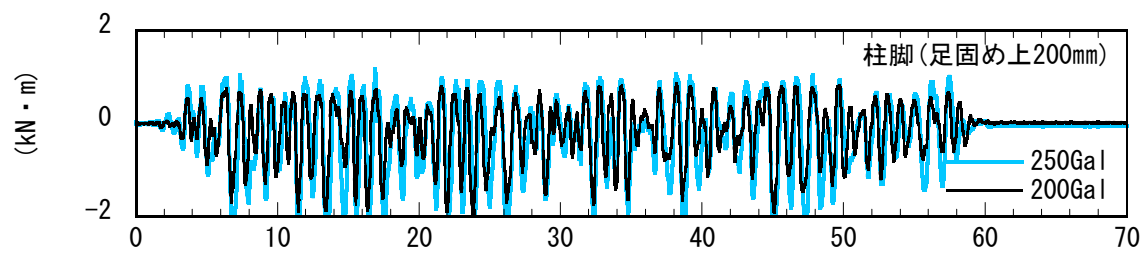


試験体 C 柱 1

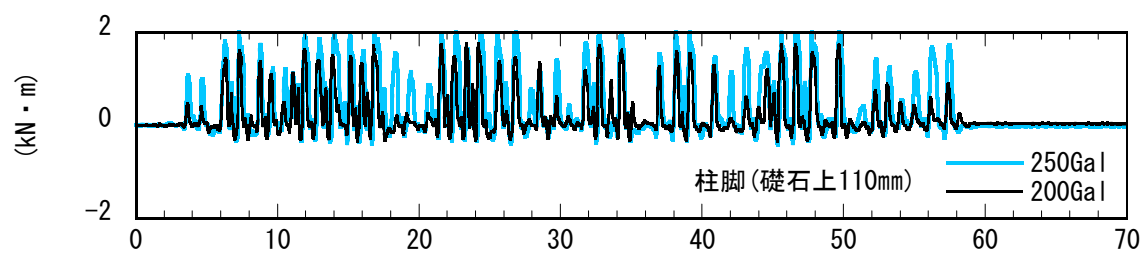
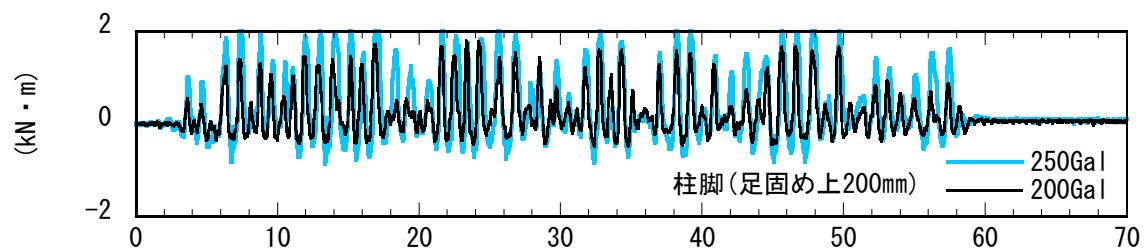




試験体 C 柱 2

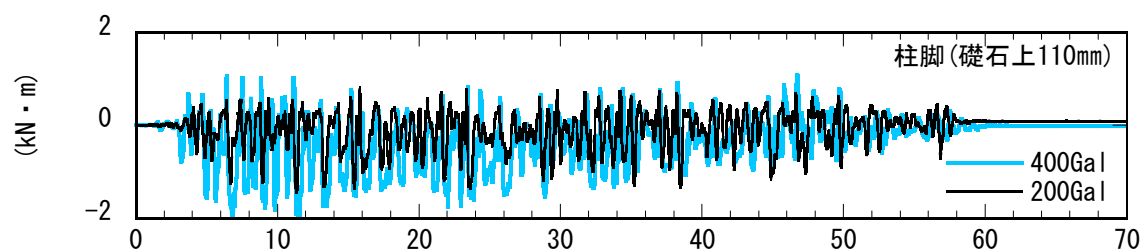
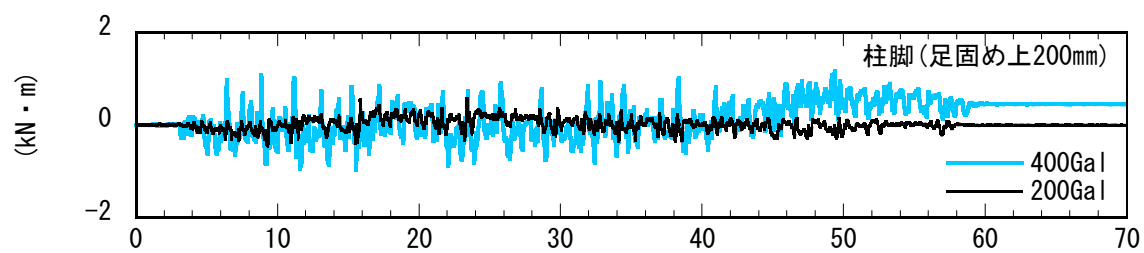


試験体 C 柱 3

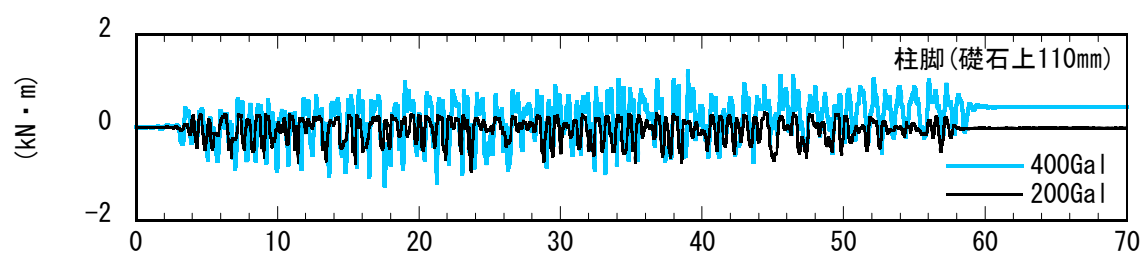
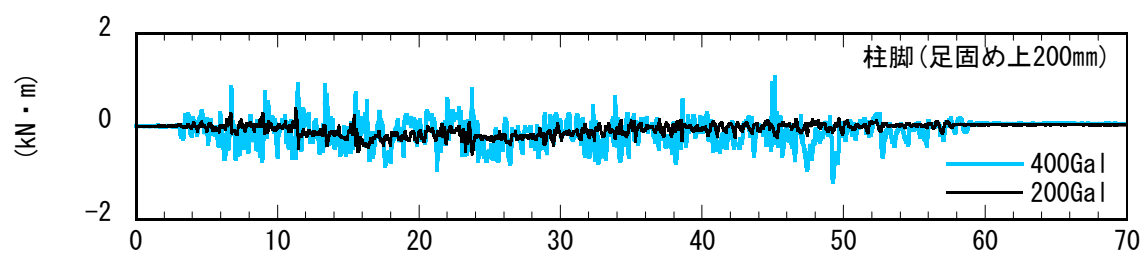


試験体 C 柱 4

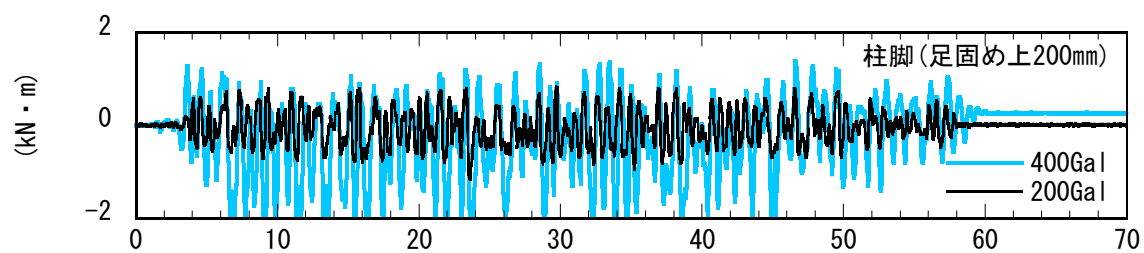
図 4.2.3-35 試験体 C の曲げモーメント

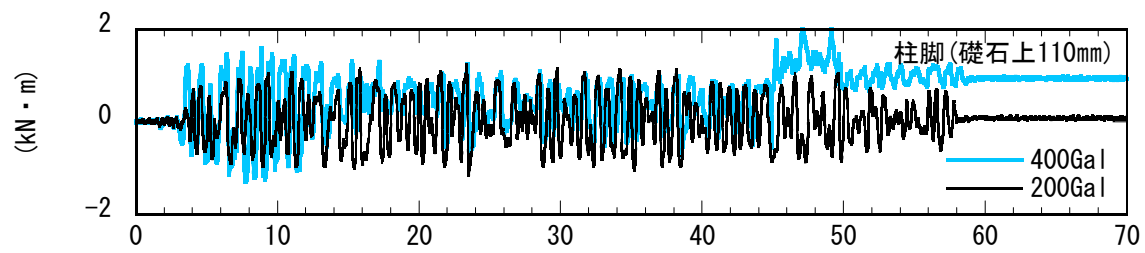


試験体 D 柱 1

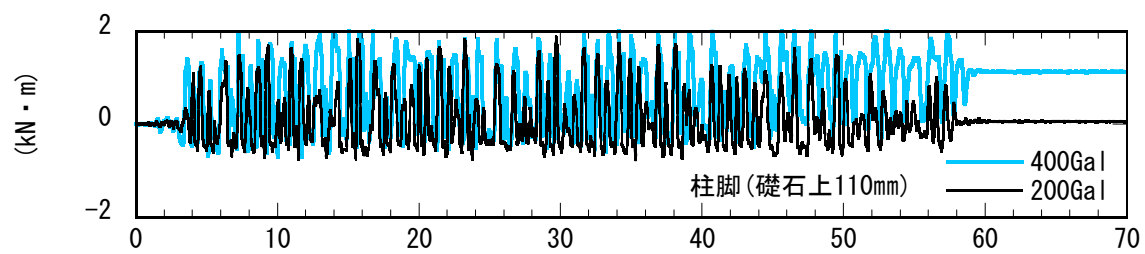
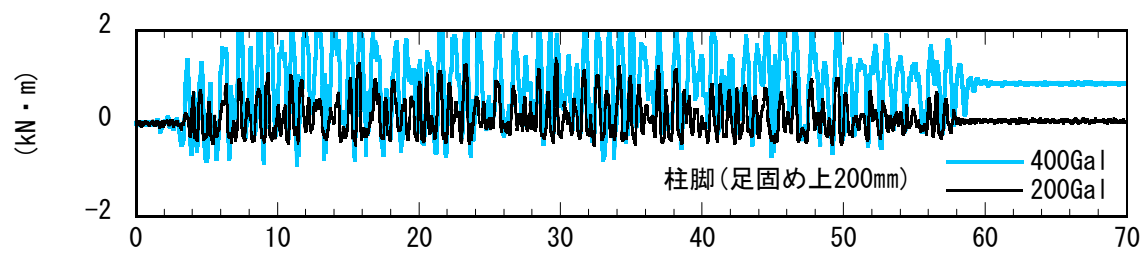


試験体 D 柱 2





試験体 D 柱 3



試験体 D 柱 4

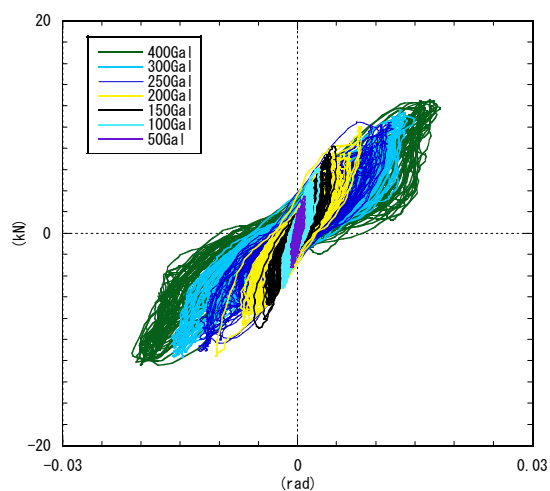
図 4.2.3-36 試験体 D の曲げモーメント

3) 履歴特性

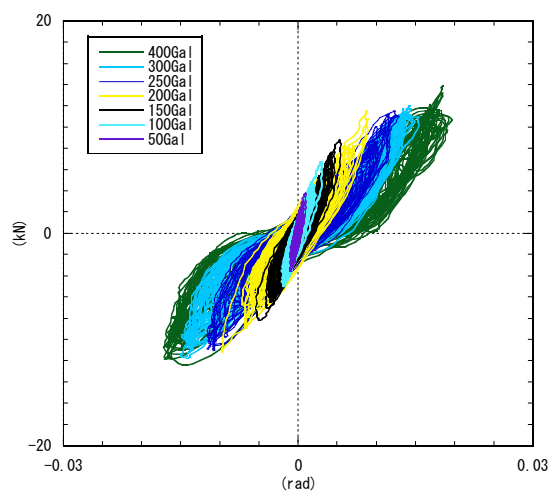
①復元力-変形角関係

図 4.2.3-37(a)～(d)に各試験体の復元力と層間変形角関係を構面ごとに示す。

試験体 A と試験体 C は、構面間に耐力差が無いため、Y1 構面と Y5 構面は、ほぼ同等の復元力-変形角関係を示している。試験体 C と試験体 D では、同一の入力において、壁の少ない構面に比べて壁の多い構面の変形は小さく復元力も小さい。

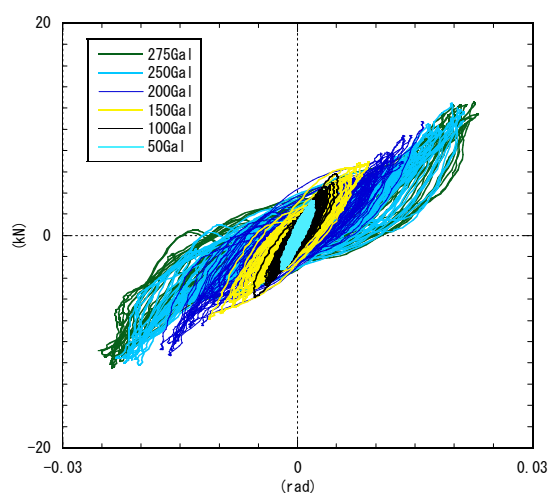


(1) Y1 構面

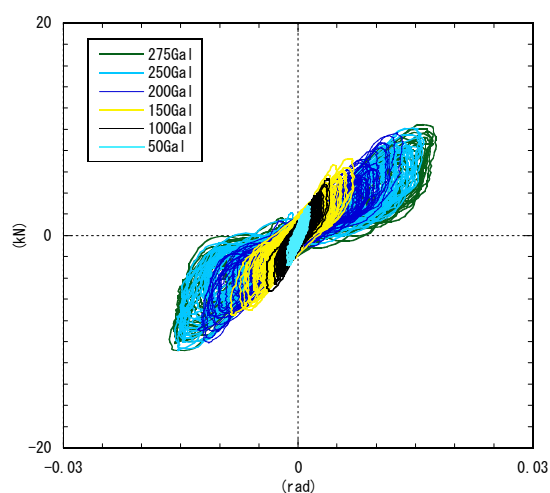


(2) Y5 構面

(a) 試験体 A

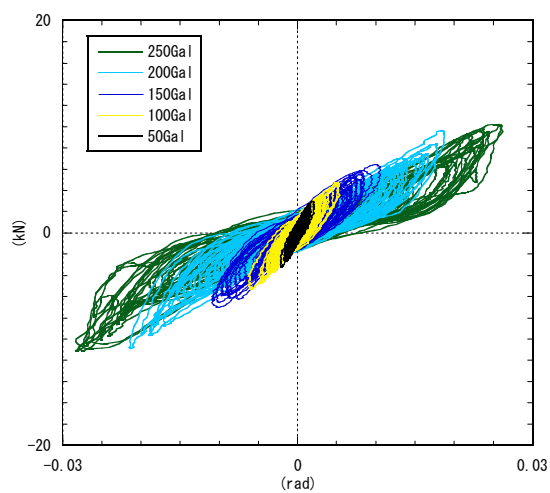


(1) Y1 構面

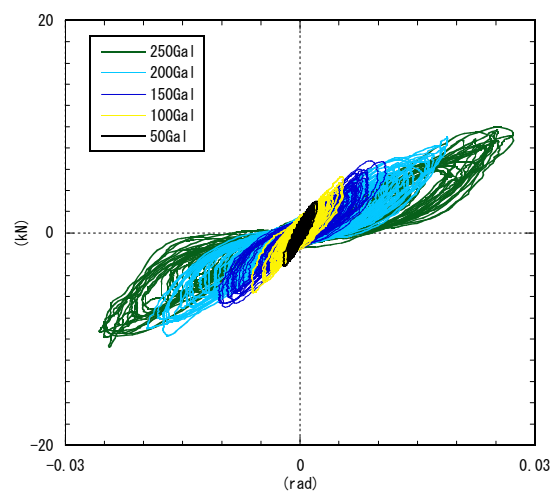


(2) Y5 構面

(a) 試験体 B

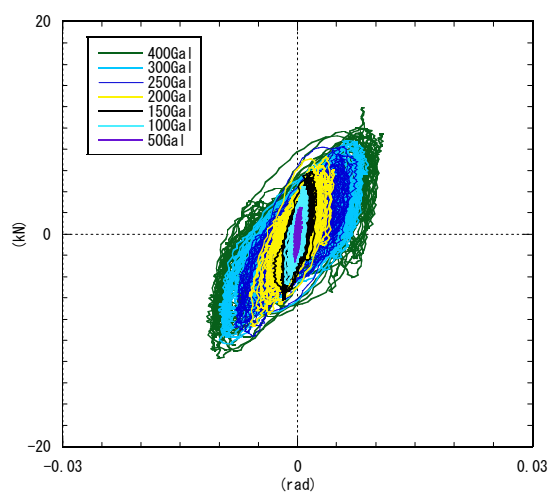


(1) Y1 構面

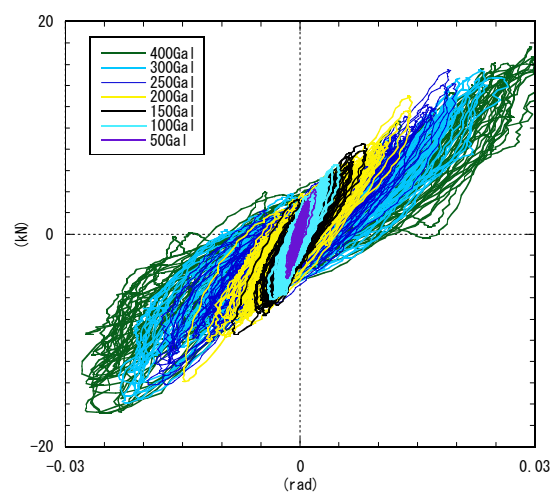


(2) Y5 構面

(a) 試験体 C



(1) Y1 構面



(2) Y5 構面

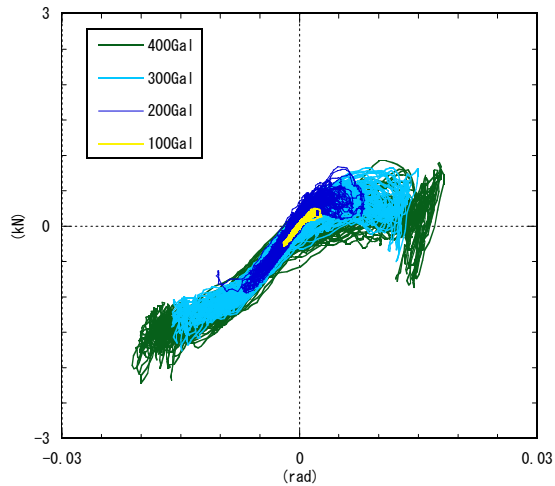
(a) 試験体 D

図 4. 2. 3-37 復元力-層間変形角関係

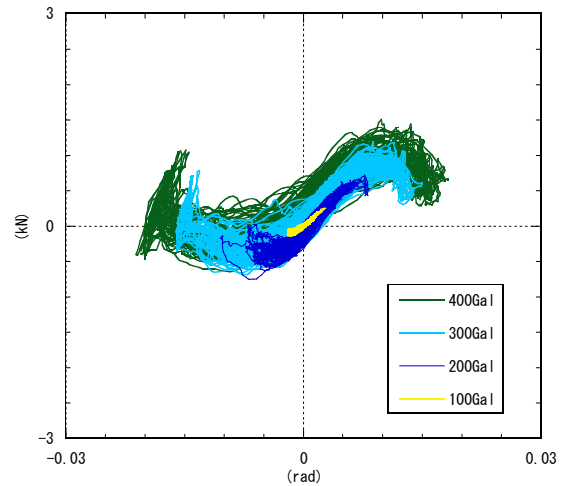
②曲げモーメント-変形角関係

図 4.2.3-38(a)～(d)に各試験体の足固め上 200 mmの位置でひずみゲージにより計測した柱の曲げモーメントと試験体の層間変形角との関係を示す。

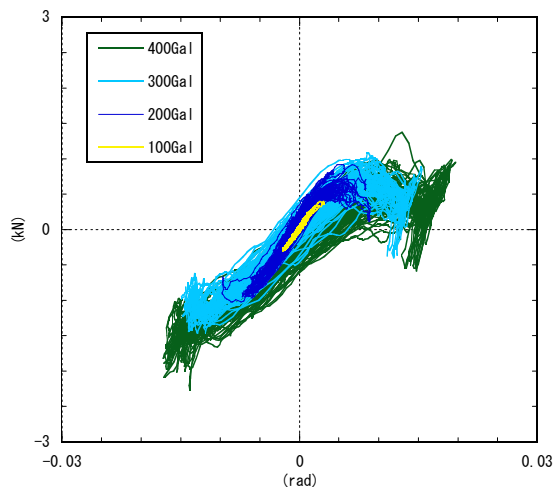
試験体 A では、各柱ともほぼ同じ曲げモーメント-変形角関係を示しており、特に柱 1 と柱 3、柱 2 と柱 4 はよく似た履歴を示している。試験体 B では、柱 1 と柱 2 に比べて柱 3 と柱 4 は小さい履歴を示している。試験体 C では、試験体 A と似た傾向で、全体的に細い履歴を示している。試験体 D では、柱 1 と柱 2 に比べて柱 3 と柱 4 は大きい履歴を示しており、最大曲げモーメントも大きく異なっている。



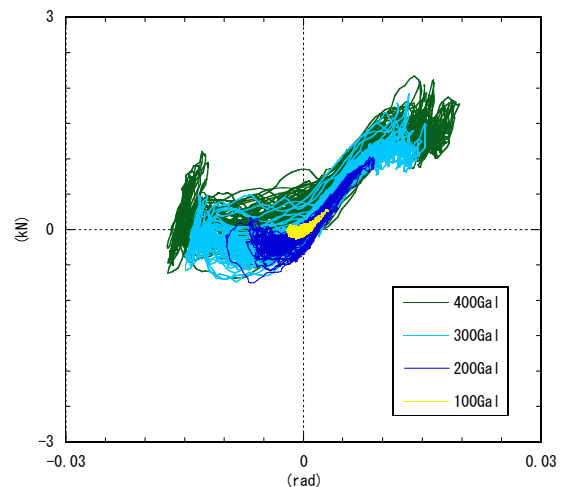
(1) 柱 1



(2) 柱 2

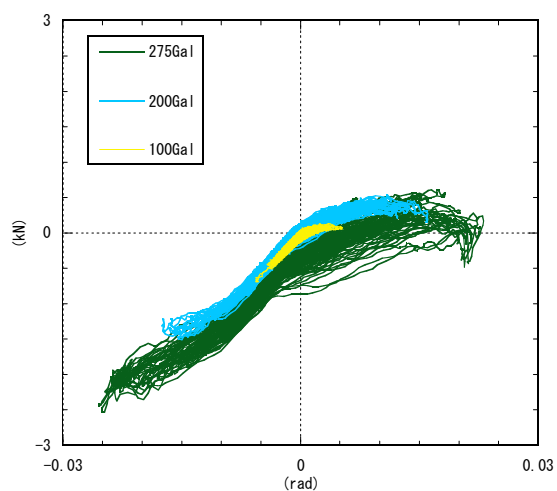


(3) 柱 3

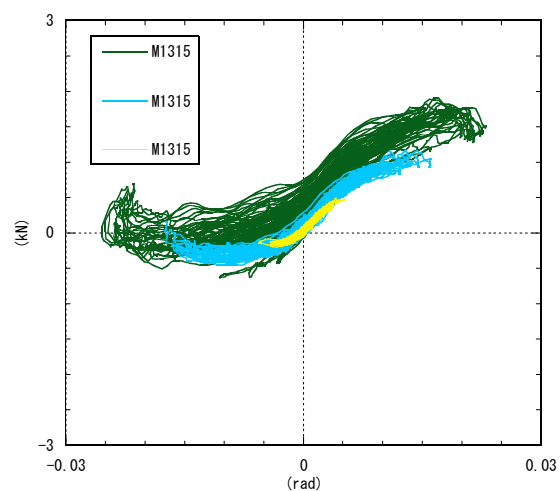


(4) 柱 4

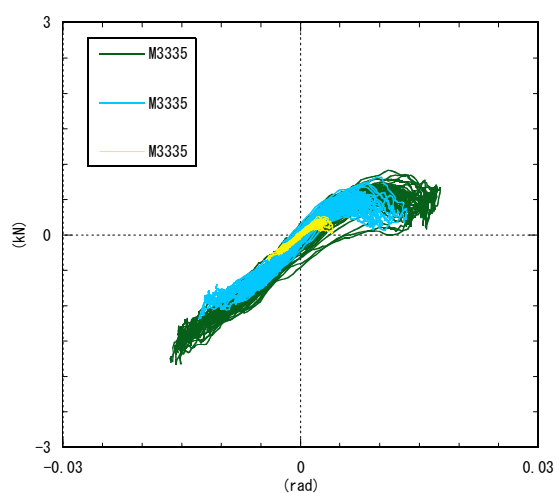
(a) 試験体 A



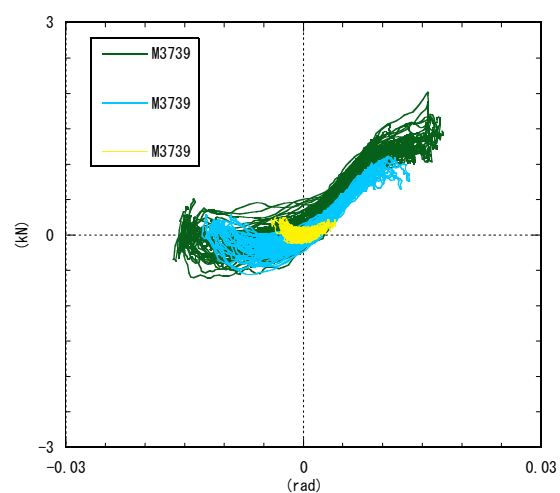
(1) 柱 1



(2) 柱 2

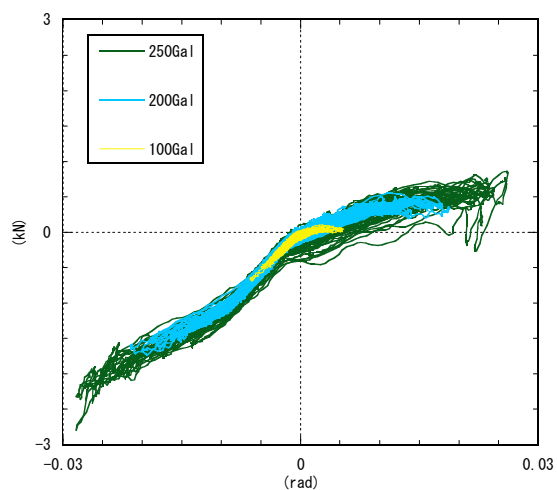


(3) 柱 3

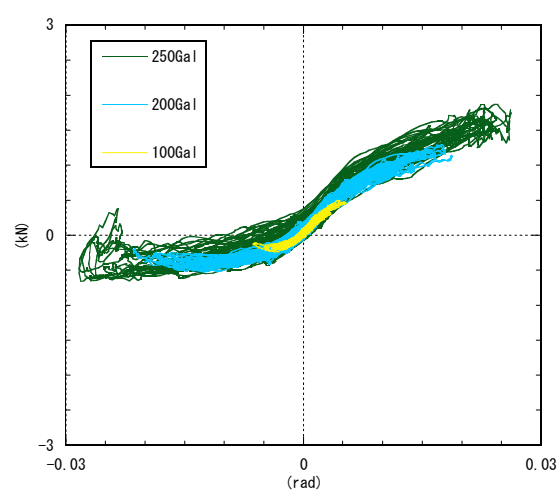


(4) 柱 4

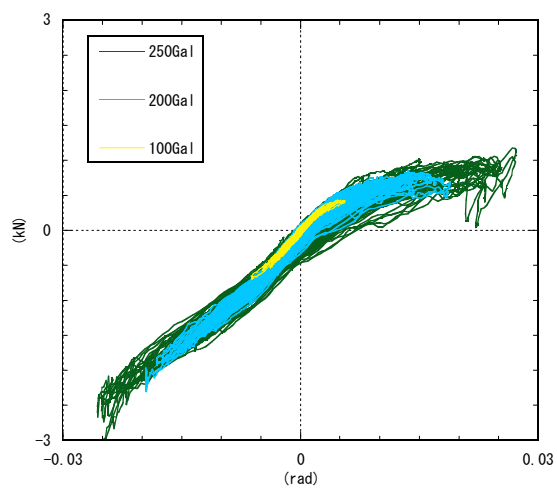
(b) 試験体 B



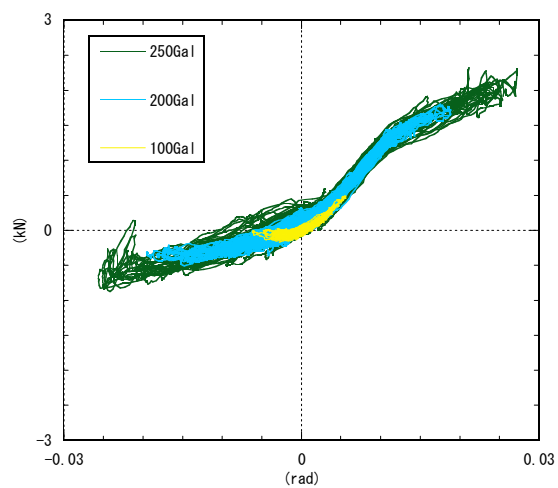
(1) 柱 1



(2) 柱 2

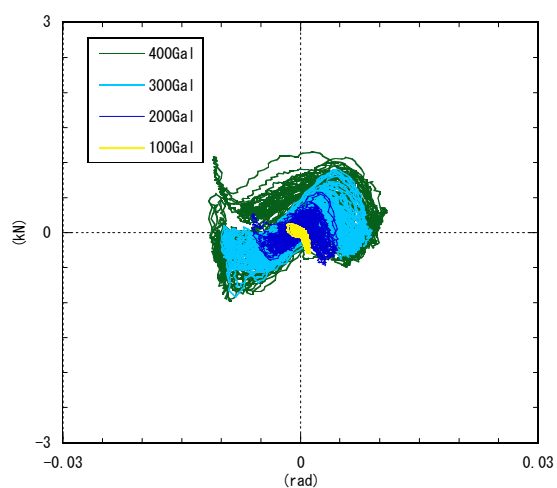


(3) 柱 3

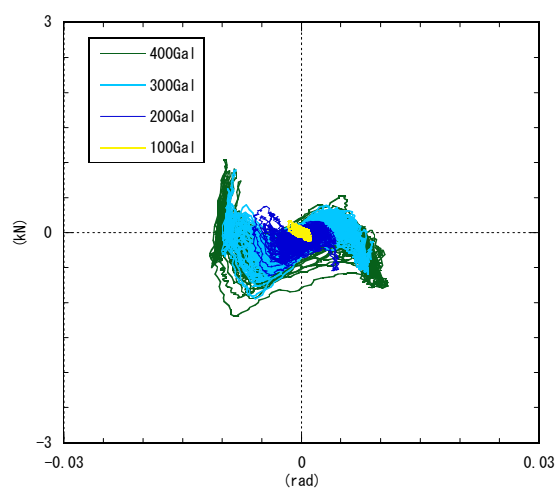


(4) 柱 4

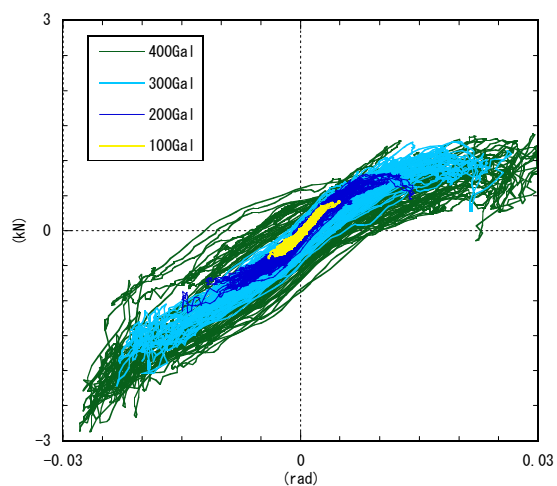
(c) 試験体 C



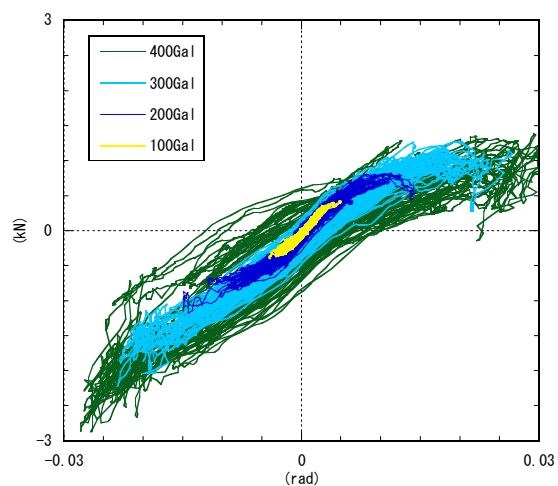
(1) 柱 1



(2) 柱 2



(3) 柱 3



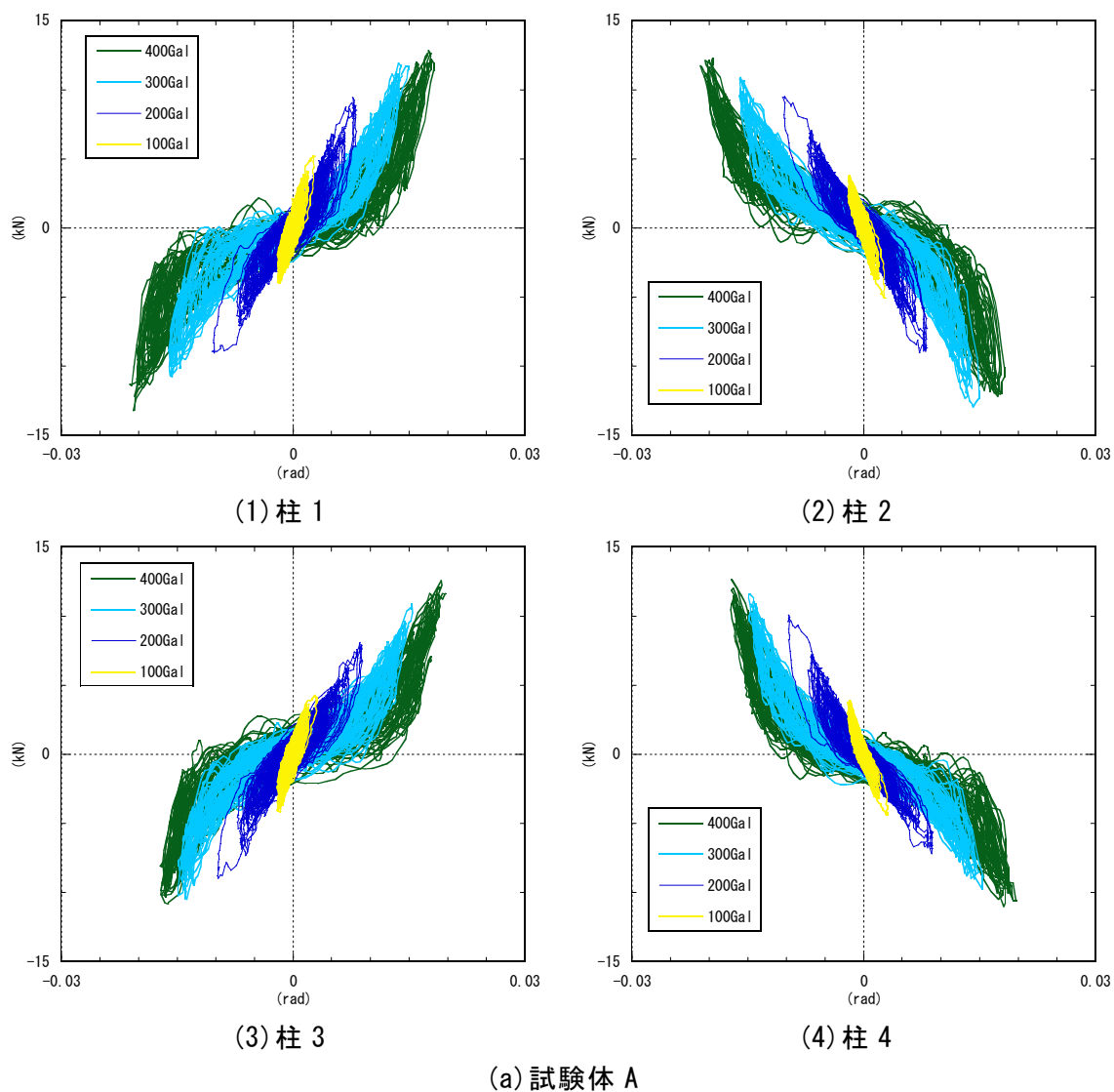
(4) 柱 4

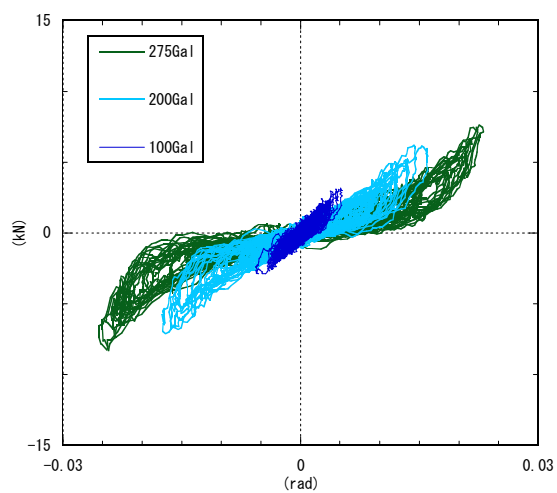
(d) 試験体 D

図 4.2.3-38 柱の柱脚部曲げモーメント-層間変形角関係

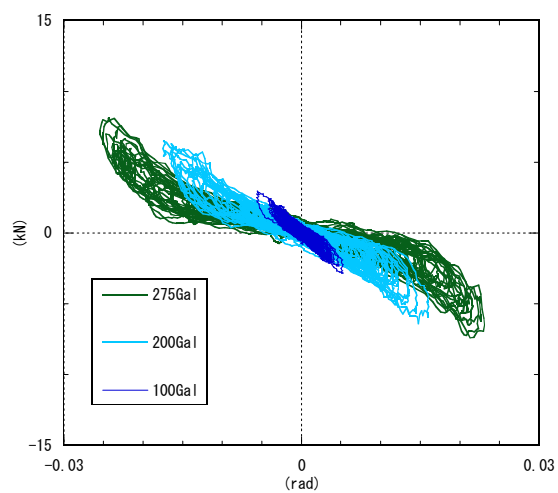
③変動軸力-変形角関係

図 4.2.3-39(a)～(d)に各試験体のロードセルにより計測した変動軸力と試験体の層間変形角との関係を示す。同図は、試験体の層間変形角との関係で示しているため、各試験体ともに、柱 1 と柱 2、あるいは柱 3 と柱 4 で軸力の正負が逆のまま示している。試験体 A、試験体 C では各柱共に同等の変動軸力であることがわかる。構面に耐力差がある試験体 B、試験体 D では、壁が多く取り付く柱ほど変動軸力が大きく、かつ構面の耐力差があるほど、その傾向は顕著であることがわかる。

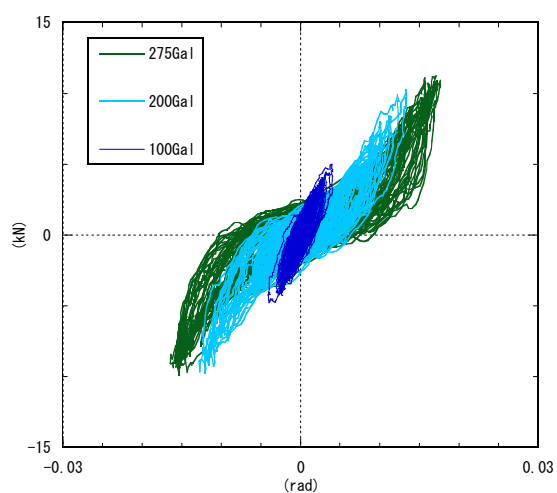




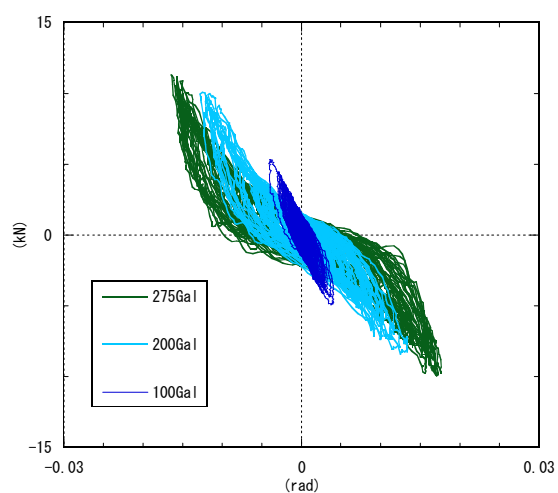
(1) 柱 1



(2) 柱 2

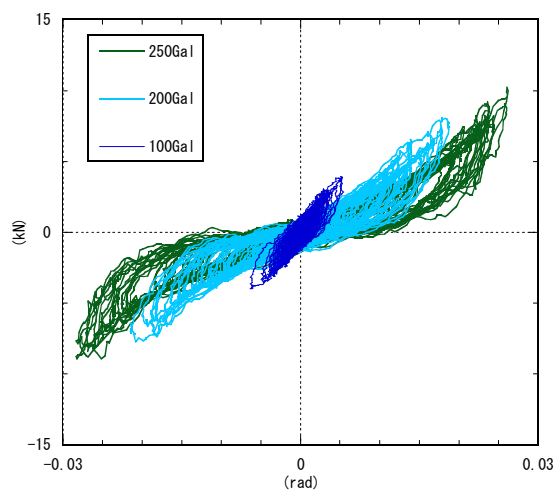


(3) 柱 3

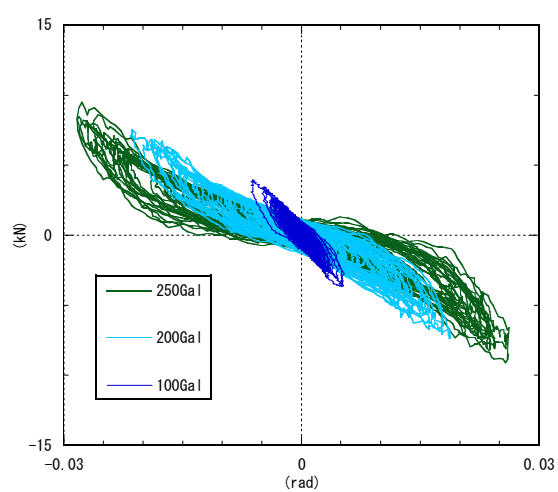


(4) 柱 4

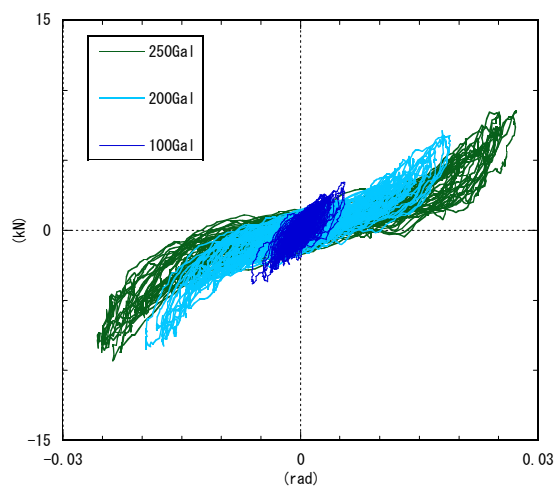
(b) 試験体 B



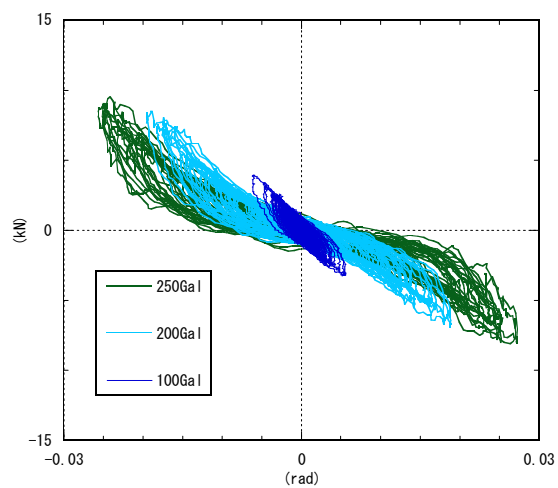
(1) 柱 1



(2) 柱 2

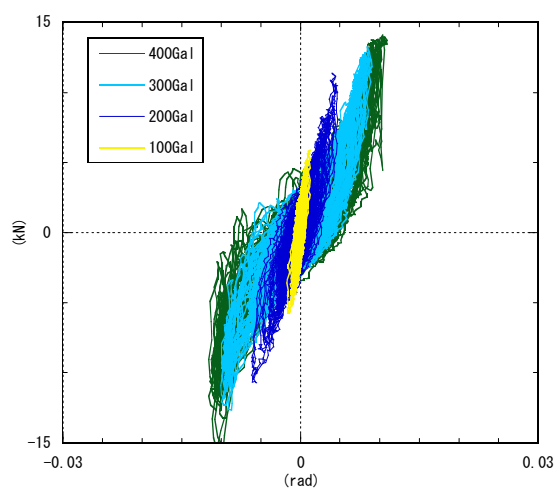


(3) 柱 3

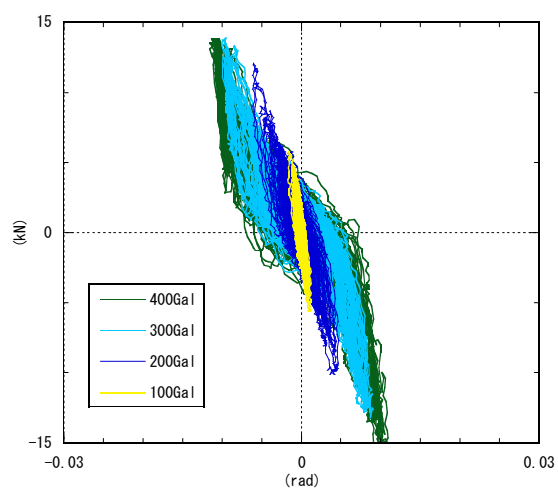


(4) 柱 4

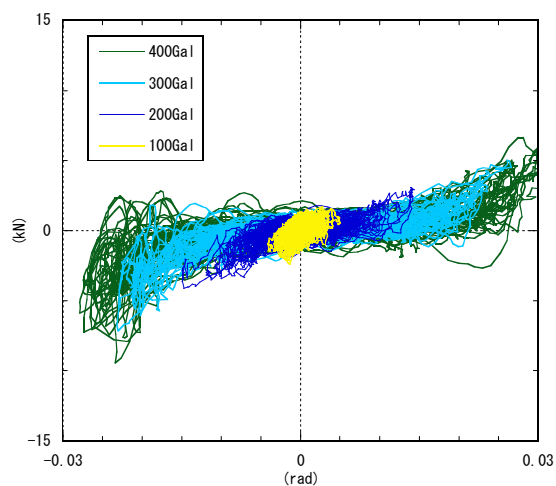
(b) 試験体 C



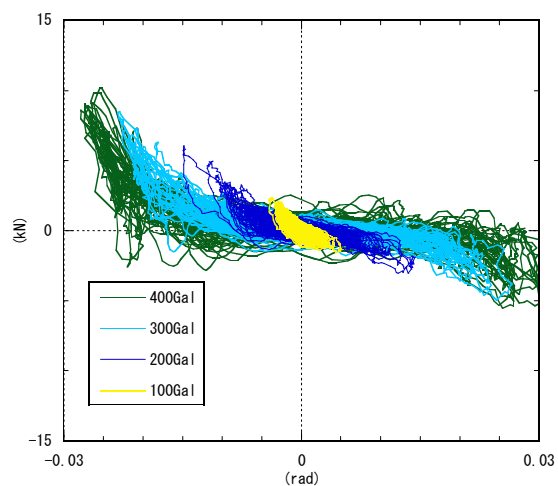
(1) 柱 1



(2) 柱 2



(3) 柱 3



(4) 柱 4

(b) 試験体 D

図 4. 2. 3-39 柱の変動軸力-層間変形角関係

4) 最大値

①最大応答加速度

各試験体について、足固めレベルと桁レベルで得られた加速度から最大応答加速度を入力毎に表 4.2.3-4～4.2.3-7 に示し、桁レベルの最大応答加速度を図 4.2.3-40～4.2.3-43 に示す。試験体 A では、入力加速度レベルが 25～200 cm/s² の範囲において、入力レベルに比例して応答加速度も大きくなっており、入力加速度 225 cm/s² 以降は概ね一定した応答加速度になっている。試験体 B、C、D についても同様の傾向である。同一の入力加速度における各試験体の応答加速度として、入力加速度 200 cm/s² で比べると、試験体 A(壁配置 2P+2P)が構面の平均で約 640 cm/s²、試験体 B(壁配置 1P+2P)が同様に、600 cm/s²、試験体 C(壁配置 1P+1P)が約 530 cm/s²、試験体 D(壁配置 3P+1P)が約 540 cm/s² であり、偏心がなく壁の多い試験体 A が平均的に最も大きく、壁が少ない試験体 C と偏心の大きい試験体 D が平均的に小さい結果となった。ただし、試験体 D は構面間の応答の差が大きく、構面ごとの応答は試験体 D の Y5 構面が最も大きい結果となっている。耐力偏心のある試験体 B では、構面間の応答加速度に差がほとんど無く、Y1 構面(1P)と Y5 構面(2P)の耐力差が応答加速度に与える影響は小さい。試験体 D では壁の少ない Y5 構面(1P)に比べて、壁の多い Y1 構面(3P)の応答加速度が大きく、特に入力加速度 125～200 cm/s² での構面間の差が大きい結果となった。

表 4.2.3-4 最大応答加速度(試験体 A) (cm/s²)

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y5	Y1	Y5
25	39	38	67	71
50	86	89	132	142
75	115	112	184	206
100	143	138	230	257
125	176	172	286	292
150	248	213	420	371
175	248	256	575	508
200	381	430	686	598
225	1118	889	786	678
250	1078	920	670	712
275	1108	1235	707	690
300	1298	1330	731	733
350	1524	1656	754	839
400	1586	1946	893	768

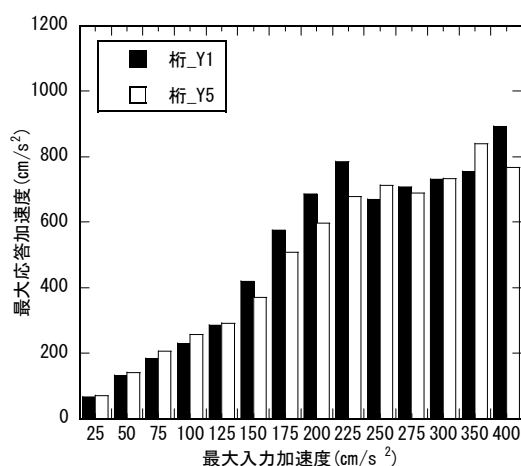


表 4.2.3-5 最大応答加速度(試験体 B) (cm/s²)

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y5	Y1	Y5
25	34	36	75	59
50	64	71	126	109
75	101	104	182	168
100	137	140	251	307
125	203	207	454	443
150	221	252	509	549
175	265	285	507	604
200	550	649	547	651
225	894	746	620	657
250	908	778	690	643
275	1115	1092	733	665

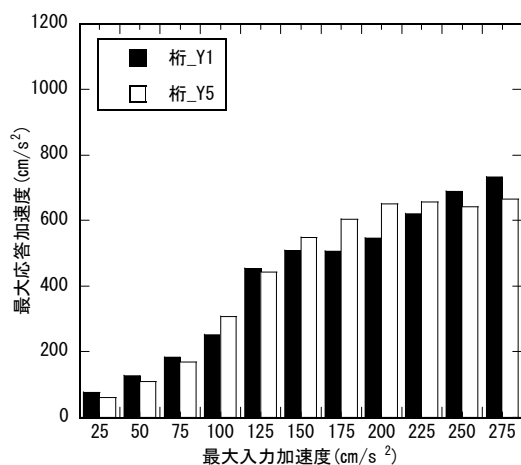
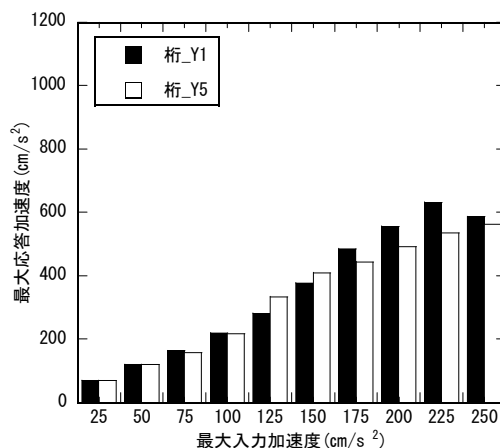


図 4.2.3-41 最大応答加速度(試験体 B)

表 4.2.3-6 最大応答加速度(試験体 C) (cm/s²)

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y5	Y1	Y5
25	34	34	69	69
50	65	67	120	120
75	105	109	163	158
100	140	139	218	217
125	182	190	281	332
150	208	218	376	409
175	270	264	485	443
200	320	403	555	493
225	836	969	632	536
250	1281	1293	587	563

表 4.2.3-7 最大応答加速度(試験体 D) (cm/s²)

入力加速度	足固めレベル		桁レベル	
	Y1	Y5	Y1	Y5
25	39	43	55	91
50	77	72	103	164
75	107	116	151	231
100	139	151	261	336
125	186	212	262	458
150	211	222	327	531
175	264	263	404	577
200	350	677	505	672
225	841	1240	594	737
250	1034	1490	582	773
275	905	1794	681	770
300	916	2074	687	790
400	1478	2386	883	1127

図 4.2.3-42 最大応答加速度(試験体 C)

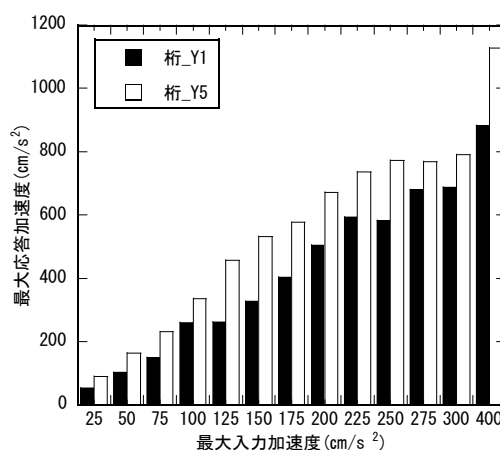


図 4.2.3-43 最大応答加速度(試験体 D)

②最大応答層間変形角

各試験体について、桁-足固め間の層間変形角を入力毎に表 4.2.3-8～4.2.3-11 と図 4.2.3-44～4.2.3-47 に示す。各試験体において、入力に比例して最大層間応答変形角が大きくなっている。試験体 A では、入力加速度 400 cm/s² で、Y1 構面が約 1/47rad、Y5 構面が約 1/50rad となり、構面間の差もほとんど無い。試験体 B は、Y5 構面に対して Y1 構面の最大層間応答変形角が大きく、入力が大きくなるにつれて、その差も大きくなっている。入力加速度 275 cm/s² で、Y1 構面が約 1/39rad、Y5 構面が約 1/56rad となり、構面間の差が最も大きい。試験体 C では、構面間に耐力差はほぼ無いため、構面の差は少なく、入力加速度 250 cm/s² で、Y1 構面が約 1/36rad、Y5 構面が約 1/37rad となった。試験体 D は、構面間の耐力差が大きいため、最大層間応答変形角の差も大きく、入力加速度 400 cm/s² で、Y1 構面が約 1/86rad、Y5 構面が約 1/31rad となった。入力加速度 200 cm/s² での各試験体の最大層間変形角は、試験体 A(壁配置 2P+2P)が、およそ Y1 構面 1/96、Y5 構面 1/103、平均 1/99rad、試験体 B(壁配置 1P+2P)が、Y1 構面 1/57、Y5 構面 1/74、平均 1/65rad、試験体 C(壁配置 1P+1P)が、Y1 構面 1/46、Y5 構面 1/51、平均 1/49rad、試験体 D(壁配置 3P+1P)が、Y1 構面 1/164、Y5 構面 1/67、平均 1/95rad であり、それぞれの平均値を重心位置の変形とすれば、もっとも耐力の少ない試験体 C が最も大きく変形しており、もっとも耐力が多き試験体 A と試験体 D では、偏心のある試験体 D のほうが僅かに大きい。

表 4. 2. 3-8 最大応答層間変形角 (試験体 A) (rad)

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
25	0.0005	0.0004
50	0.0011	0.0011
75	0.0019	0.0021
100	0.0028	0.0031
125	0.0038	0.0039
150	0.0056	0.0055
175	0.0073	0.0070
200	0.0104	0.0097
225	0.0125	0.0114
250	0.0126	0.0129
275	0.0148	0.0138
300	0.0161	0.0155
350	0.0181	0.0172
400	0.0211	0.0198

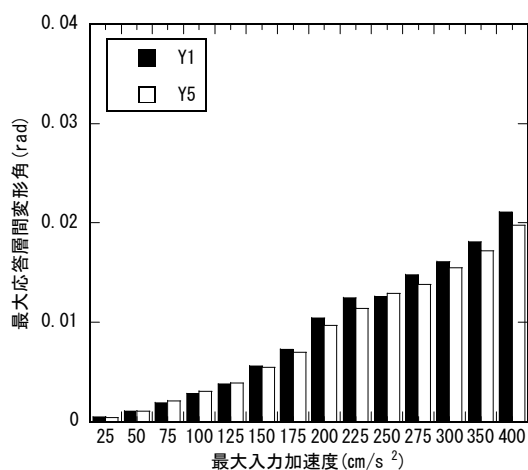


図 4. 2. 3-44 最大応答層間変形角 (試験体 A)

表 4. 2. 3-9 最大応答層間変形角 (試験体 B) (rad)

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
25	0.0010	0.0006
50	0.0022	0.0015
75	0.0039	0.0029
100	0.0056	0.0041
125	0.0082	0.0062
150	0.0113	0.0086
175	0.0133	0.0102
200	0.0174	0.0134
225	0.0203	0.0149
250	0.0232	0.0161
275	0.0254	0.0177

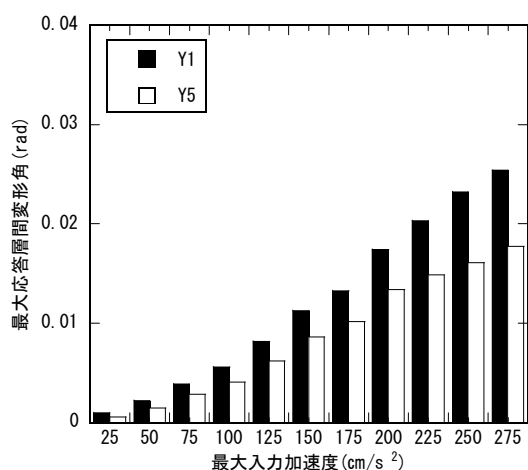


図 4. 2. 3-45 最大応答層間変形角 (試験体 B)

表 4. 2. 3-10 最大応答層間変形角 (試験体 C) (rad)

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
25	0.0009	0.0009
50	0.0022	0.0023
75	0.0039	0.0037
100	0.0062	0.0061
125	0.0088	0.0085
150	0.0109	0.0110
175	0.0168	0.0154
200	0.0215	0.0195
225	0.0251	0.0234
250	0.0280	0.0273

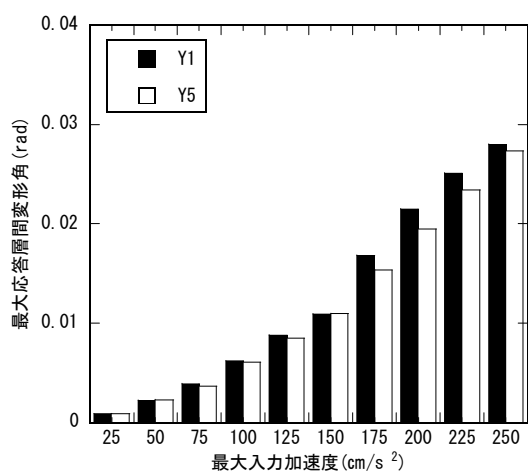


図 4. 2. 3-46 最大応答層間変形角 (試験体 C)

表 4.2.3-11 最大応答層間変形角(試験体 D) (rad)

入力加速度	桁-足固め	
	Y1	Y5
25	0.0003	0.0009
50	0.0006	0.0021
75	0.0010	0.0039
100	0.0017	0.0050
125	0.0021	0.0066
150	0.0030	0.0086
175	0.0043	0.0115
200	0.0061	0.0149
225	0.0073	0.0174
250	0.0080	0.0200
275	0.0091	0.0221
300	0.0100	0.0266
400	0.0116	0.0318

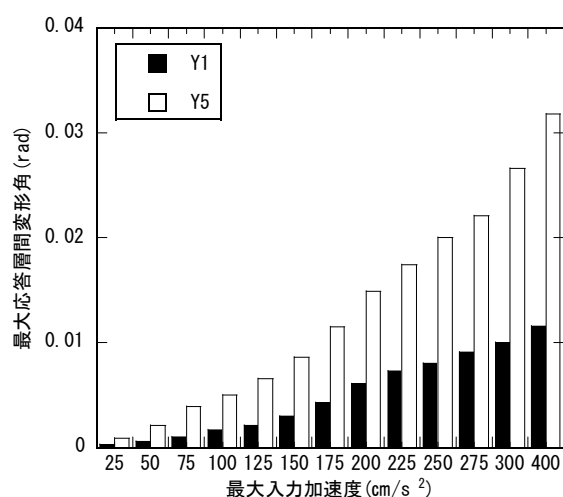


図 4.2.3-47 最大応答層間変形角(試験体 D)

③最大すべり量

各試験体について、柱脚部の 1 回の最大すべり、累積の最大すべり、加振終了後の残留すべり量を入力毎に表 4.2.3-12～4.2.3-15 に示し、それぞれ図 4.2.3-48～4.2.3-59 に示す。1 回の最大すべり量は、約 2 mm 以上をすべり挙動として判断した。各試験体とも、最大入力加速度 200cm/s² から滑り出しており、入力が大きくなるにしたがって、すべり量も大きくなっている。試験体 A では入力加速度 350cm/s² から大きく滑っており、入力加速度 400cm/s² では、1 回の最大すべり量が約 92 mm、累積の最大すべり量が約 179 mm、残留すべり量は約 111 mm であった。試験体 B では、最大入力加速度 250cm/s² までは、1 回のすべり量は Y1 構面比べて Y5 構面のほうが大きく滑っており、最大入力加速度 275cm/s² では、その差は小さくなっている。試験体 C では、構面間に耐力の差は無いが、Y1 構面に比べて Y5 構面のほうが大きくすべる傾向にある。試験体 D についても、Y5 構面のすべり量が、Y1 構面に比べて僅かに大きい結果となっており、各構面のすべり挙動については、構面間の耐力差の影響は小さい。なお試験体 D の最大入力加速度 400cm/s² 時の累積の最大すべり量および残留すべり量は、計測許容範囲を超えているため、計測最大許容値の 250 mm としている。

表 4.2.3-12 最大すべり量(試験体 A) (mm)

入力加速度	最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
	Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
25	—	—	0.15	0.50	0.01	0.04
50	—	—	0.16	0.78	0.04	0.01
75	—	—	0.18	0.95	0.01	0.01
100	—	—	0.23	1.04	0.02	0.04
125	—	—	0.42	0.92	0.04	0.10
150	—	—	0.65	1.27	0.34	0.25
175	—	—	0.93	1.50	0.68	0.29
200	2.25	2.45	3.07	2.68	2.91	0.58
225	6.86	11.72	7.26	6.80	5.00	0.86
250	11.50	16.16	24.12	31.52	6.16	17.03
275	20.96	21.70	49.13	56.16	29.98	41.89
300	33.40	36.40	60.23	64.93	53.37	59.56
350	63.56	72.52	122.76	131.27	90.83	93.69
400	80.96	91.54	179.39	178.12	111.23	95.24

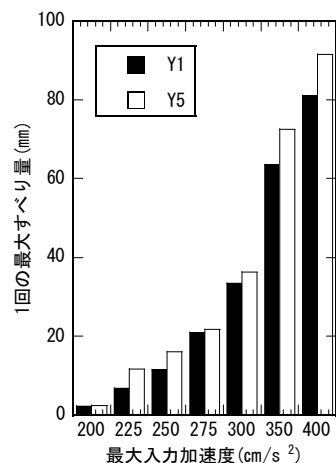


図 4.2.3-48 1回の最大すべり量

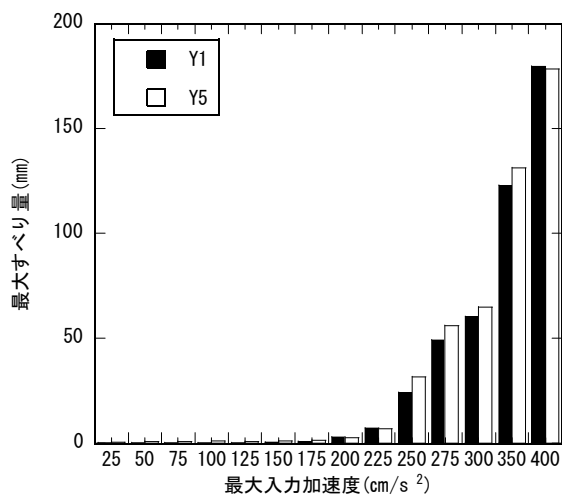


図 4.2.3-49 累積最大すべり量

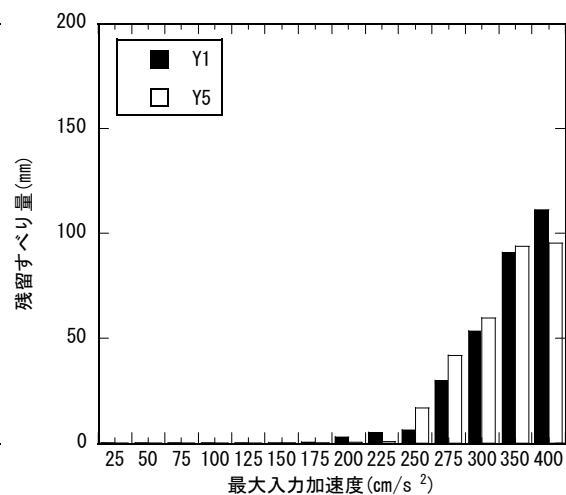


図 4.2.3-50 残留すべり量

表 13 最大すべり量(試験体 B) (mm)

入力加速度	最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
	Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
25	—	—	0.13	0.52	0.04	0.06
50	—	—	0.16	1.11	0.08	0.04
75	—	—	0.31	1.51	0.15	0.11
100	—	—	0.64	1.64	0.49	0.08
125	—	—	0.78	1.81	0.46	0.70
150	—	—	1.14	1.71	0.71	0.77
175	—	—	1.37	2.00	0.69	0.93
200	3.14	9.02	2.95	13.54	1.56	10.13
225	10.85	21.28	21.89	38.98	19.90	32.97
250	15.21	29.75	46.38	66.56	44.48	58.14
275	27.52	33.47	67.06	94.33	62.60	77.61

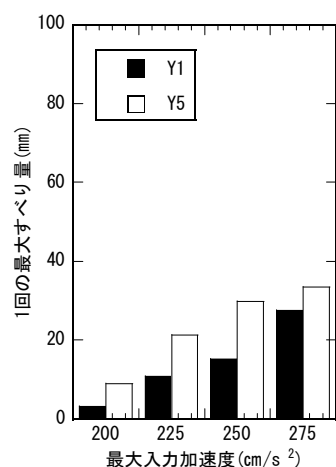


図 4.2.3-51 1回の最大すべり量

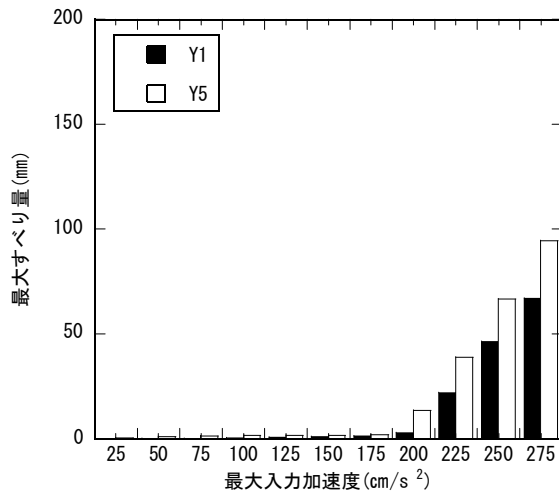


図 4.2.3-52 累積最大すべり量

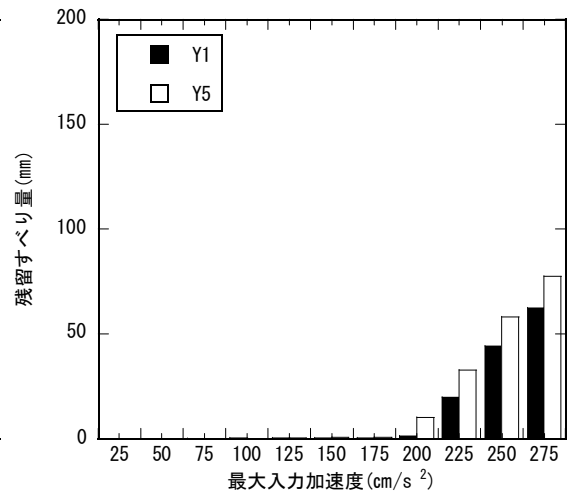


図 4.2.3-53 残留すべり量

表 14 最大すべり量(試験体 C) (mm)

入力加速度	最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
	Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
25	—	—	0.09	0.67	0.01	0.02
50	—	—	0.19	1.03	0.04	0.03
75	—	—	0.34	1.22	0.17	0.03
100	—	—	0.74	1.63	0.51	0.40
125	—	—	1.05	1.55	0.74	0.68
150	—	—	1.26	1.67	0.88	0.43
175	—	—	2.13	2.41	1.47	1.13
200	3.39	6.13	2.85	4.85	1.95	2.59
225	20.49	27.93	21.01	31.99	4.40	12.57
250	37.10	47.05	33.82	47.68	22.34	35.22

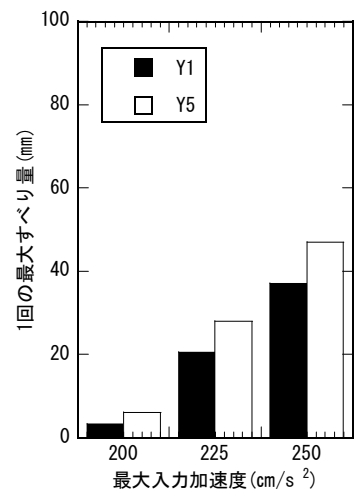


図 4.2.3-54 1回の最大すべり量

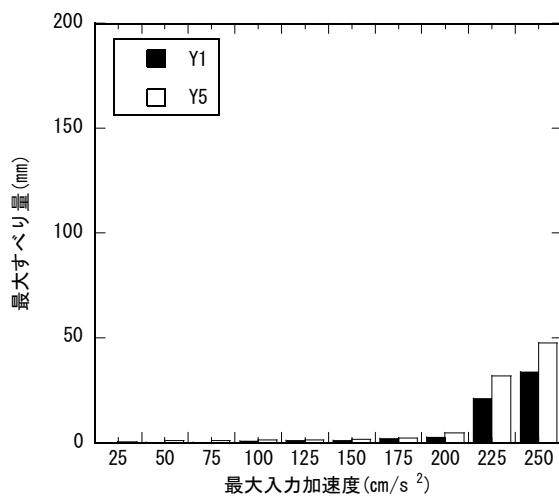


図 4.2.3-55 累積最大すべり量

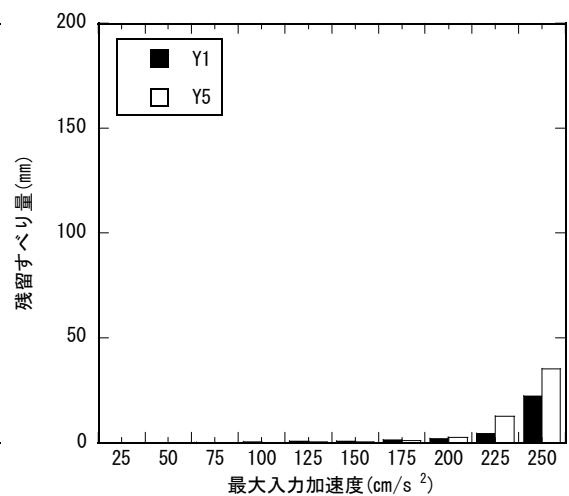


図 4.2.3-56 残留すべり量

表 4.2.3-15 最大すべり量(試験体 D) (mm)

入力加速度	最大すべり量(1回)		最大すべり量(累積)		残留すべり量	
	Y1	Y5	Y1	Y5	Y1	Y5
25	—	—	0.28	0.29	0.03	0.02
50	—	—	0.26	0.76	0.06	0.04
75	—	—	0.19	0.98	0.06	0.17
100	—	—	0.22	1.17	0.10	0.67
125	—	—	0.27	0.94	0.17	0.90
150	—	—	0.83	1.40	0.66	0.21
175	—	—	2.04	1.62	1.82	0.38
200	1.80	5.10	2.57	4.02	2.44	1.90
225	5.96	17.20	6.36	18.79	2.48	15.16
250	11.82	20.57	21.89	34.17	15.35	29.35
275	20.58	24.79	51.46	80.26	37.99	65.16
300	27.77	35.20	56.63	89.58	43.51	75.64
400	71.59	89.67	250.00	250.00	227.00	250.00

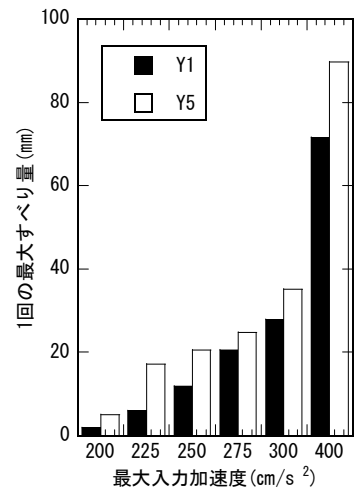


図 4.2.3-57 1回の最大すべり量

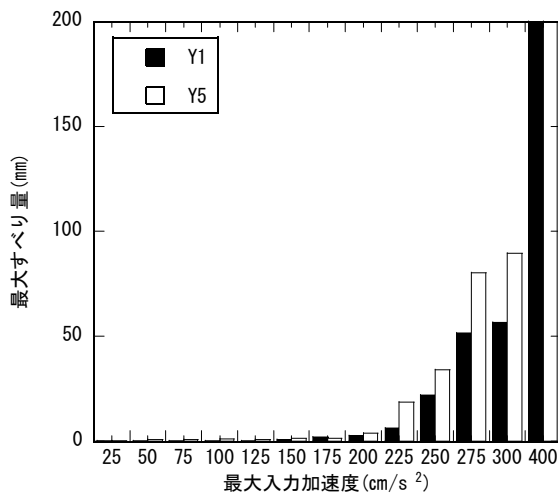


図 4.2.3-58 累積最大すべり量

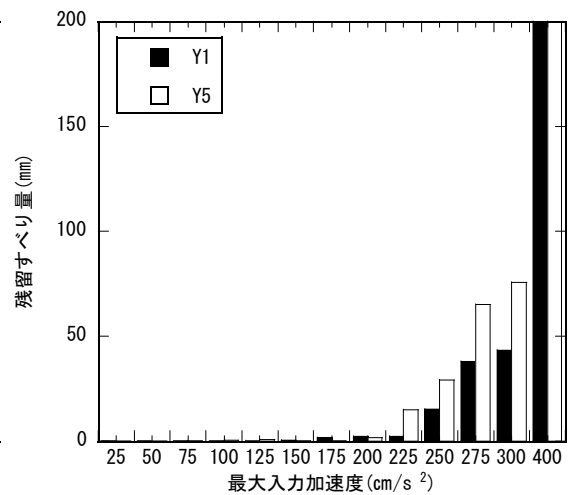
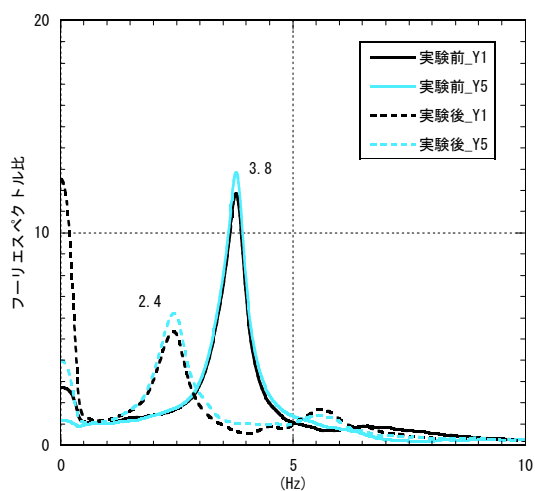


図 4.2.3-59 残留すべり量

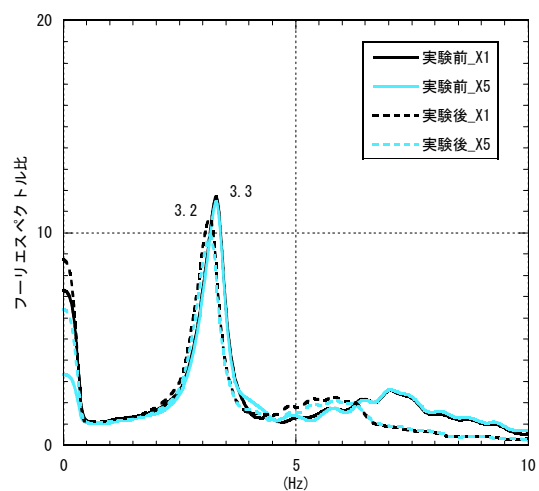
5) 卓越振動数

ホワイトノイズ加振による加速度データを用いて、FFT 解析をおこない、試験体頂部の加速度データと振動台上の加速度データのスペクトル比を求めて、図 4.2.3-60 に示す。FFT 処理は計測した全データを用いて行い、Parzen ウィンドウによるウィンドウ幅 0.5Hz で平滑化を行った。

加振前の各試験体の卓越振動数は試験体 A で 3.8Hz、試験体 B で 3.0、試験体 C で 2.8Hz、試験体 D で 3.5Hz となり、もっとも壁の少ない試験体 C がもっとも小さく、もっとも壁の多い試験体 A と試験体 D では、各構面の耐力差がほぼ無い試験体 A がもっとも大きい値である。構面間に耐力の差がある試験体 B と試験体 C では、卓越振動数に差は無いが、耐力の少ない構面のフーリエスペクトル比が大きくなっており、これらの結果は試験体の耐力に対応した結果と言える。また加振後の卓越振動数は、それぞれの試験体で平均的に 3 割程度低下している。入力方向と直角の X 構面については、加振前後において変化はない。

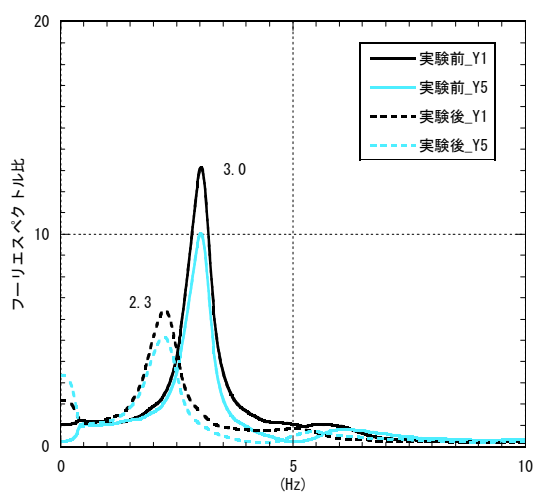


(1) 加振方向_Y1 構面、Y5 構面

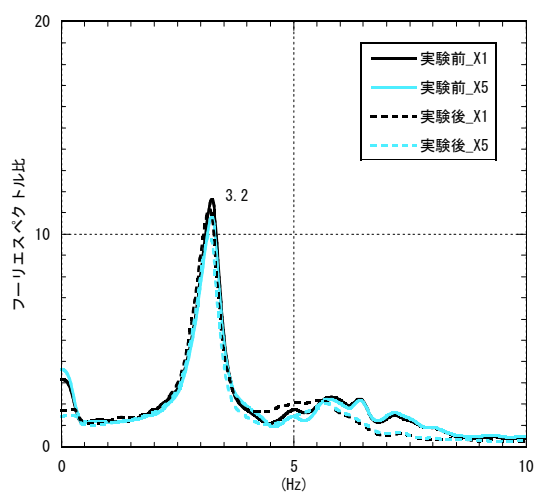


(2) 加振直行方向_X1 構面、X5 構面

(a) 試験体 A

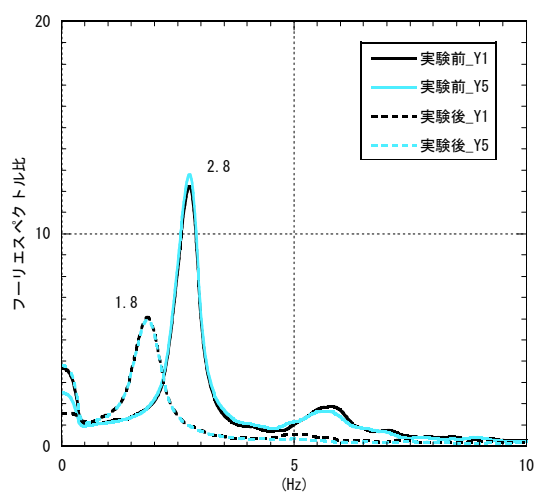


(1) 加振方向_Y1 構面、Y5 構面

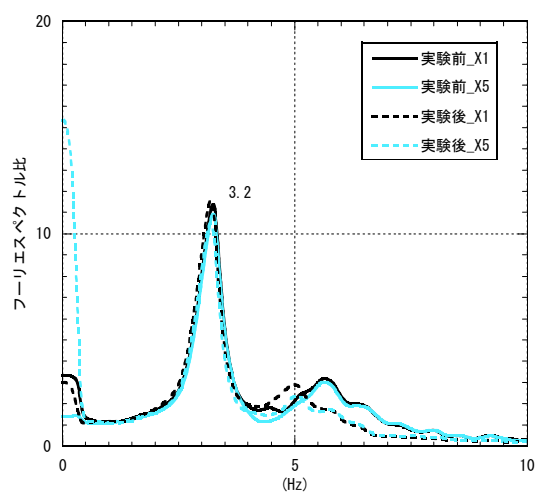


(2) 加振直行方向_X1 構面、X5 構面

(b) 試験体 B

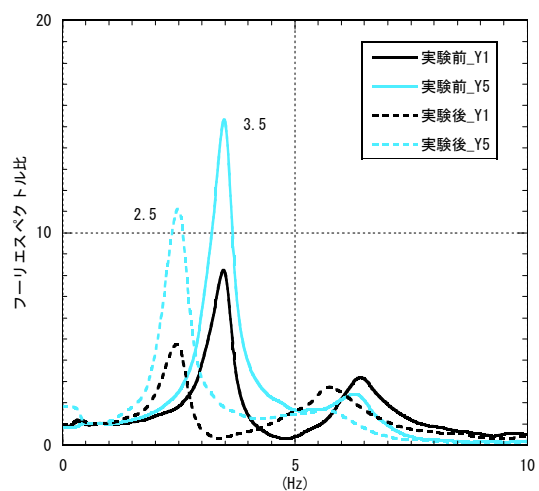


(1) 加振方向_Y1 構面、Y5 構面

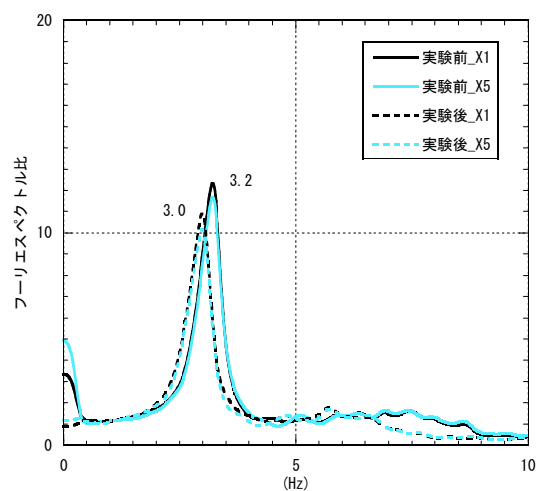


(2) 加振直行方向_X1 構面、X5 構面

(c) 試験体 C



(1) 加振方向_Y1 構面、Y5 構面



(2) 加振直行方向_X1 構面、X5 構面

(d) 試験体 D

図 4.2.3-60 フーリエスペクトル比