論文　RC 耐震壁の多方向同時入力振動台試験

松本　良一郎*1・鈴木　篤*2・小栗　慎祐*3・西川　孝夫*4

要旨： RC 耐震壁が多方向から同時に地震力を受けた場合の耐力と復元力特性を確認するため，試験体２体（辺長 1500 角×高さ 1000×壁厚 75mm のボックス型耐震壁）の三次元振動台による加振試験を実施した。本報では試験結果の概要を示す。試験データの荷重－変形関係曲線は一方向入力試験の様な回転対称形のループを描かず，従来同様に 1 サイクル分のループを取り出して処理することができない。そこで，データ処理では独自の方法を用いた。

キーワード：RC 造耐震壁，三次元振動台，多方向同時入力

1. はじめに

鉄筋コンクリート造耐震壁を対象に，多方向同時入力により耐震壁の動的挙動を評価するため，三次元振動台を用いた動的試験を実施した。加振実施済のボックス型耐震壁試験体２体の結果について，以下に概要を示す。

2. 試験概要

2.1 試験体

試験体は，壁厚 75mm，壁内法高 1000mm，壁芯々間距離 1500mm のボックス型の耐震壁で，D6@70mm ダブル配筋を施した。**図-1** に形状と諸元を，**図-2** に壁部配筋を示す。壁部には，最大粒径 10mm の豆砂利を用いた普通コンクリートと熱処理を施しσ - ε 曲線に降伏棚のある SD345 相当の D6 鉄筋を使用した。材料特性を**表-1** に示す。データの再現性を確認する為，同一試験体 2 体（DT-B-01，DT-B-02）を設定している。

表-1　材料特性

ｺﾝｸﾘｰﾄ調合	DT-B-01	DT-B-02
水 ｾﾒﾝﾄ比(%)	65.0	67.0
細骨材率(%)	52.0	54.0
単位水量(kg/m3)	178	180
ｾﾒﾝﾄ(kg/m3)	274	269
細骨材(kg/m3)	951	969
豆砂利(kg/m3)	840	822
ﾎﾟｿﾞﾘｽ№70(kg/m3)	0.685	0.673

ｺﾝｸﾘｰﾄ物性	DT-B-01	DT-B-02
圧縮強度 σB(MPa)	38.6	34.4
σB時歪　εcu(μ)	-2033	-2207
ﾔﾝｸﾞ率 Ec(GPa)	29.3	26.6
ﾎﾟｱｿﾝ比　νc	0.20	0.19
割裂強度 (MPa)	2.63	2.88
上部 ｽﾗﾌﾞ σB(MPa)	46.8	40.5
基礎 ｽﾗﾌﾞ σB(MPa)	39.7	43.6

SD345相当D6物性	DT-B-01	DT-B-02
降伏点 fy(MPa)	381	378
引張強度 fu(MPa)	499	501
伸び(%)	29.1	29.8
ﾔﾝｸﾞ率 Es(GPa)	171	185

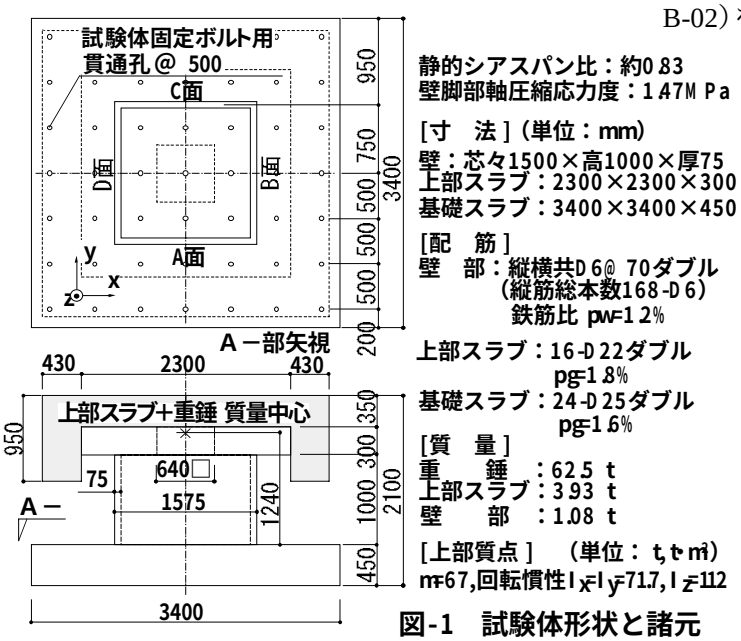

図-1　試験体形状と諸元

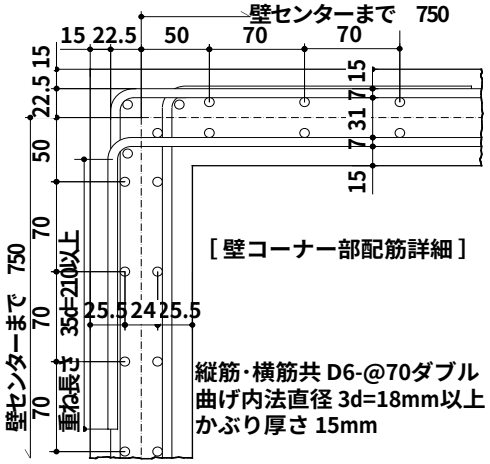

図-2　壁部配筋

*1 清水建設(株)　電力エネルギー本部原子力技術部　(正会員)
*2 鹿島建設(株)　原子力部原子力設計室
*3 (財)原子力発電技術機構　耐震技術センター
*4 東京都立大学大学院　建築学専攻教授　工博　(正会員)

2.2 加振方法と計測方法

入力波として終局状態まで加振可能な周波数特性を持つ**図-3** の模擬地震波を作成した。弾性から終局状態までの応答性状を把握するため**図-4** の加振ｽﾃｯﾌﾟを設定し，独立行政法人土木研究所の三次元大型振動台を用いて加振を行った。

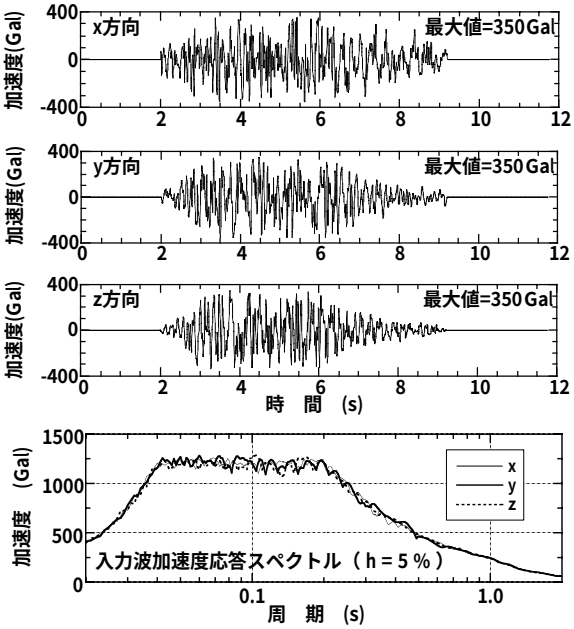

図-3 入力波形と加速度応答スペクトル

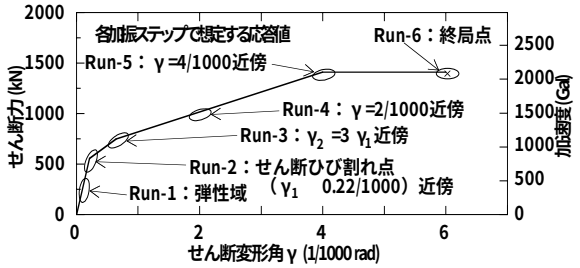

図-4 加振ステップの設定

計測では上下のスラブがほぼ剛体運動を行うと仮定し，**図-5** の様に計測点を配置した。加速度については上下 7 点（x方向：1 点，y方向：2 点，z方向：4 点）ずつでサーボ型加速度計による計測を行った。変位については，基礎スラブの四隅に計測ポスト（センサー取付時固有振動数実測値 120Hz）を立ててレーザー変位計を取り付け，28 点(上部スラブ水平及び鉛直変位：各 4 点，同水平用バックアップ：4 点，壁中間部鉛直変位：16 点）で相対変位を計測した。

データは 400Hz（DT-B-01 と DT-B-02 の Run-1,2）及び 1000Hz（その他）で収録し，図-6 のローパスフィルタによる処理を行った。

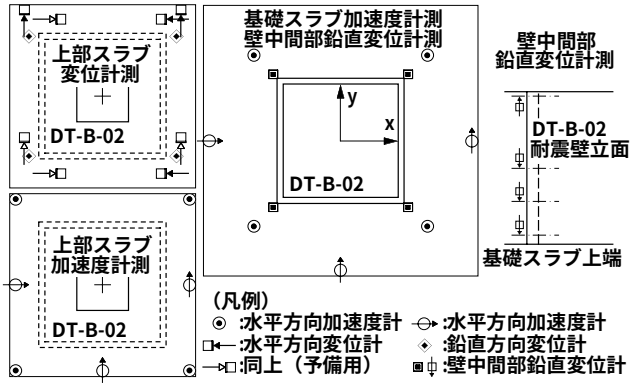

図-5 計測点配置

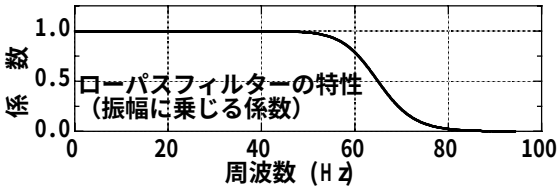

図-6 LPF の特性

3. 試験結果

3.1 ひび割れ状況

各加振後の目視によるひび割れ状況を DT-B-02 の例について**図-7** に示す。最初の加振では壁脚部に若干の曲げひび割れが観察された。せん断ひび割れ点を狙った Run-2 以降は徐々にひび割れ本数が増加し，最終的には壁脚部全周でコンクリートが崩落した。

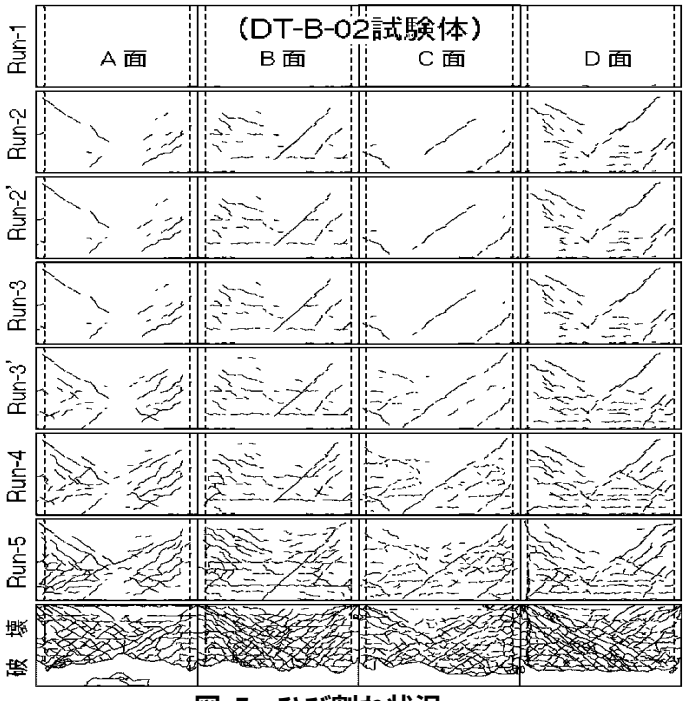

図-7 ひび割れ状況

3.2 時刻歴波形と履歴曲線

DT-B-02 試験体について，上部スラブ水平加速度の時刻歴応答波形の例を**図-8** に，水平方向変位と加速度に関する履歴曲線を**図-9** に，それぞれ示す。また，**図-10** にはそれ以外の諸量（鉛直方向加速度，同変位，x, z 軸回り回転角）との間で描いた履歴曲線の例を示す。

図-9 右半分の水平方向変位-加速度関係曲線

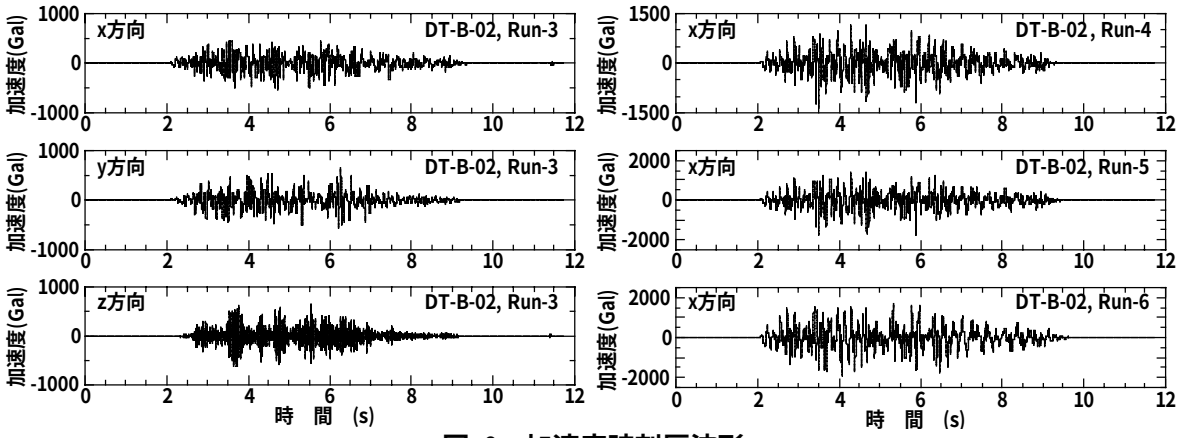

図-8 加速度時刻歴波形

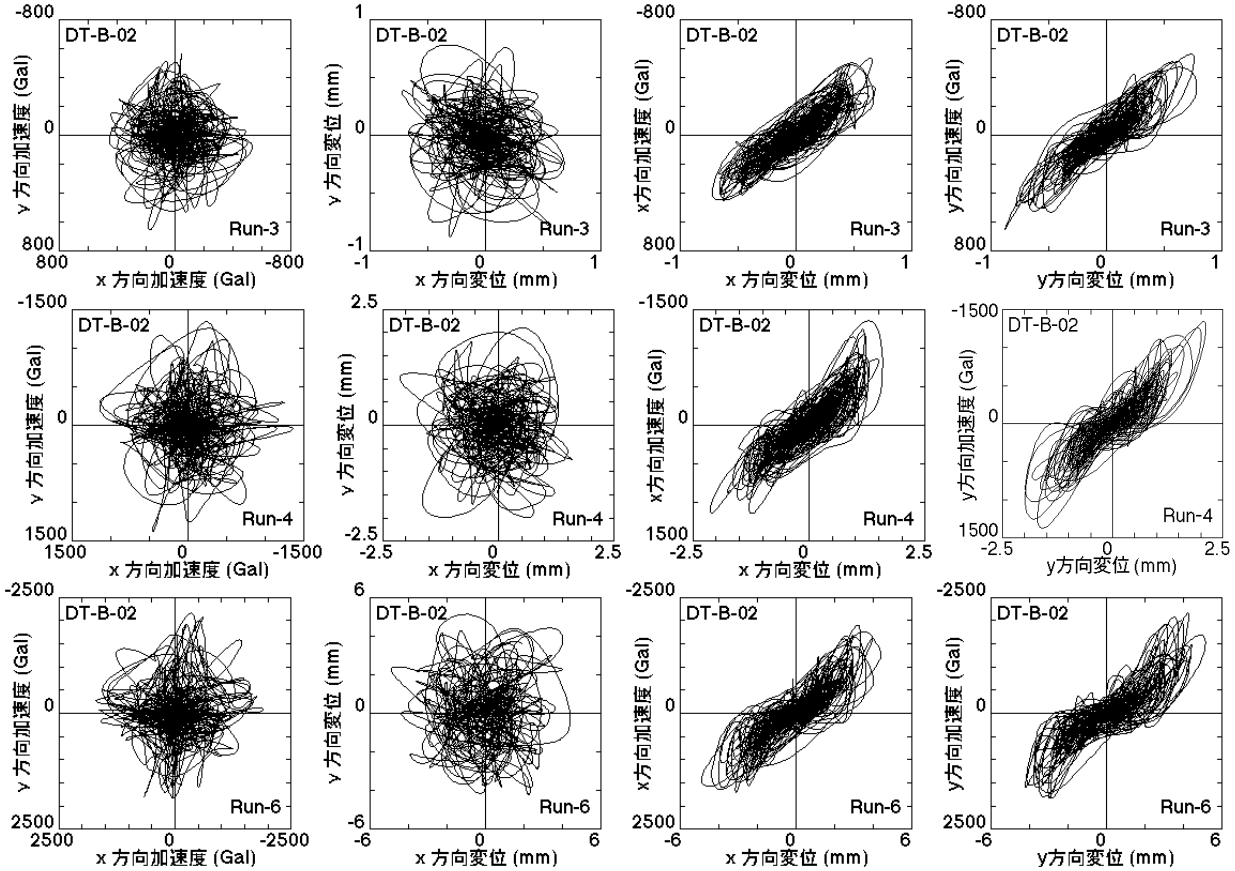

図-9 水平方向応答量間で描いた履歴曲線

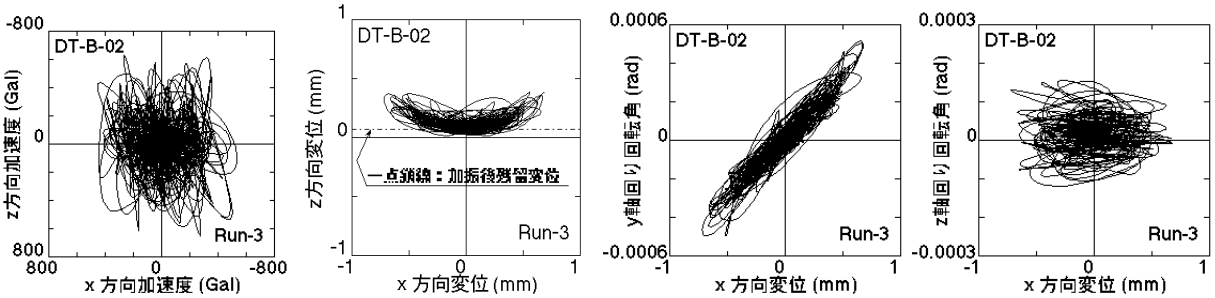

図-10 その他の応答量による履歴曲線

を見ると，加振が進むにつれ逆 S 字形のスリップ性状が段々強くなっている。

図-10 の二つめのグラフに示すように，鉛直方向の変位は正側に出て，水平変位が大きい時に大きくなり，下に凸の形状の履歴曲線となる。同図には，加振終了直後の z 方向残留変位を一点鎖線の水平線で図示した。

3.3 試験体応答値の変化

各加振の前の特性把握加振（試験体特性を把握するため小さな加速度を入力）から求めた試験体の一次固有振動数を**表-2** に，加振ステップ毎の最大応答値を**表-3** にそれぞれ示す。また，試験体がそれまでに経験した最大の x, y 方向せん断変形角（絶対値）に対して一次固有周期をプロットすると**図-11** のようになる。

図-11 を見ると，初期の加振では固有周期の低下が著しく，その後はせん断変形角 γ の増加に対して概ね線形に緩やかな勾配で固有周期が低下する傾向が認められる。

非線形応答値の目標値を達成するように各 Run の入力を設定することは非常に困難であり，目標応答レベルを達成できず Run を追加している場合もあるので，**表-2,3** の加振番号の一部は**図-4** と異なる。また、**表-3** は各 Run で記録されたピーク値を拾ったものなので，同一試験体の同一 Run でも x方向と y方向で値が異なるが，破壊に至る迄に水平方向で最大 2.5～3G，鉛直方向では最大 2G 程度の応答を経験している。

3.4 変形成分比率

上部スラブの変位計測値には，試験体壁部の曲げ・せん断変形の他に，壁脚部や頂部の曲げひび割れが開くことによる変位量など，種々の成分が含まれる。D6 使用の縮小試験体に関する既往試験例では，実大の耐震壁に較べ脚部に起因する成分の比率が高くなる場合もあることが報告[1)]されており，評価が必要である。

壁隅角部で高さ方向に 5 点（壁中間部 4 点と上部スラブ下端 1 点）ずつ鉛直変位計測を行っており，加振前に基礎スラブから z=60, 280, 500, 970, 1000mm の位置にあった仮想の水平断面が，壁部の曲げ変形でどの様に傾いたか算定できる。

表-2　一次固有振動数

DT-B-01	x方向	y方向	z方向
Run-0前	22.5	22.5	46.8
Run-1前	15.2	14.4	36.4
Run-2前	16.2	15.1	34.6
Run-3前	13.1	14.2	33.4
Run-3'前	11.5	13.1	33.0
Run-4前	12.0	12.5	30.6
Run-5前	12.5	11.8	33.8
Run-6前	8.8	7.2	29.9
DT-B-02	x方向	y方向	z方向
Run-1前	20.6	20.4	42.8
Run-2前	20.3	22.3	44.5
Run-2'前	15.4	13.8	39.2
Run-3前	15.2	13.6	39.6
Run-3'前	14.8	13.4	39.5
Run-4前	14.5	13.0	39.5
Run-5前	14.3	12.2	38.1
Run-6前	13.0	11.5	37.9
Run-7前	7.3	6.4	32.4

（単位：Hz）

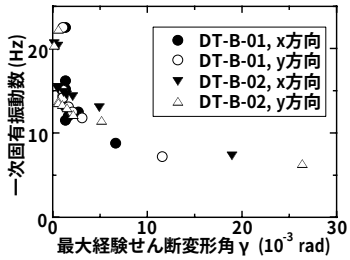

図-11　固有周期の変化

表-3　最大応答値一覧

DT-B-01	Run-0	Run-1	Run-2	Run-3	Run-3'	Run-4	Run-5	Run-6
α xbase [Gal]	-1512	-165	384	460	-735	-1162	-1617	-1678
α ybase [Gal]	-499	-151	-518	761	-906	-1171	-1554	-1726
α zbase [Gal]	1537	-105	321	515	721	996	-985	635
β xbase [rad/s²]	-2.32	-0.55	1.82	2.29	-2.72	2.50	2.80	-1.89
β ybase [rad/s²]	-10.76	-0.67	-2.18	2.46	-4.29	-5.84	7.14	-7.65
β zbase [rad/s²]	2.10	0.08	-0.25	-0.35	0.55	0.59	1.03	0.91
α xtop [Gal]	-1094	287	-549	-720	-1018	-1465	-1941	1752
α ytop [Gal]	-564	-237	-629	1072	1700	1797	2307	-2448
α ztop [Gal]	-2498	250	-669	969	1350	1726	1905	1490
β xtop [rad/s²]	-7.37	-1.82	8.86	10.41	14.30	14.53	16.77	-17.63
β ytop [rad/s²]	-19.54	2.15	5.25	-6.55	-9.82	12.19	-16.04	13.98
β ztop [rad/s²]	5.56	0.44	1.48	-1.93	-3.01	3.27	5.08	4.02
Ubx [mm]	1.520	0.351	0.767	1.209	1.863	2.704	4.288	8.806
Uby [mm]	-0.443	-0.259	0.858	-1.383	-2.499	-2.765	-4.246	15.215
Ubz [mm]	1.048	0.240	0.420	0.724	4.121	1.248	1.894	3.715
-θ x [0.001 rad]	-0.435	0.122	0.749	0.929	3.502	1.540	1.964	4.131
θ y [0.001 rad]	-1.544	0.225	0.488	0.677	-4.070	1.759	2.644	-2.140
θ z [0.001 rad]	-0.071	-0.056	-0.171	0.327	-0.554	0.804	-1.156	4.262
γ x [0.001 rad]	1.345	-0.218	0.472	0.712	-1.097	1.620	2.699	6.635
γ y [0.001 rad]	1.065	-0.180	-0.501	-0.845	-1.651	-2.067	-3.104	11.559
Ubx [mm]	0.671	0.084	0.188	0.272	0.499	0.682	-0.644	-0.652
Uby [mm]	-0.743	0.059	0.289	0.367	0.555	-0.802	0.712	-0.542
Qx [kN]	733	-192	368	482	682	981	1300	-1173
Qy [kN]	378	159	422	-718	-1139	-1204	-1545	1639
Nz [kN]	2213	825	1052	1306	1561	1813	1933	1655
Tz [kN m]	-622	-49	-166	216	338	-366	-570	-451

DT-B-02	Run-1	Run-2	Run-2'	Run-3	Run-3'	Run-4	Run-5	Run-6	Run-7
α xbase [Gal]	143	933	256	484	1063	1005	1499	-1950	-1551
α ybase [Gal]	-122	-836	-171	341	-740	973	-1198	-2096	-1886
α zbase [Gal]	85	839	181	375	777	712	1050	1385	941
β xbase [rad/s²]	-0.39	-2.29	-0.46	1.07	2.18	2.66	3.46	4.05	-2.42
β ybase [rad/s²]	-0.50	3.25	-0.76	1.44	-4.22	3.69	6.47	8.04	1.87
β zbase [rad/s²]	-0.10	0.53	0.18	-0.22	0.52	0.57	0.77	-1.17	-0.79
α xtop [Gal]	-456	-853	-358	-535	-1187	-1356	-1780	-1902	-2101
α ytop [Gal]	376	-712	338	650	-1077	1376	1709	-2164	-2966
α ztop [Gal]	-182	1152	285	650	-1786	-1395	2104	2190	1435
β xtop [rad/s²]	-2.99	-7.97	-1.70	4.22	8.62	-11.75	12.71	18.78	16.80
β ytop [rad/s²]	3.45	9.66	3.68	-5.64	-12.13	-12.15	-15.19	17.03	-14.76
β ztop [rad/s²]	-0.30	1.79	0.55	1.50	-2.80	-2.63	4.07	-4.65	5.54
Ubx [mm]	0.249	-0.953	-0.470	-0.721	-1.761	-2.132	-2.991	-4.901	18.941
Uby [mm]	-0.216	-1.004	-0.451	-0.878	1.437	2.113	3.028	5.135	-26.349
Ubz [mm]	0.018	0.620	0.200	0.385	0.814	0.925	1.297	-	-
-θ x [0.001 rad]	-0.109	-0.673	0.179	0.471	0.843	-1.036	-1.272	-	-
θ y [0.001 rad]	-0.138	-0.909	-0.280	0.516	-1.087	1.126	1.805	-	-
θ z [0.001 rad]	0.030	0.189	0.081	0.156	0.386	-0.518	0.609	1.548	10.786
γ x [0.001 rad]	0.145	-0.530	-0.312	-0.436	-1.138	-1.454	-2.101	-4.901	18.941
γ y [0.001 rad]	-0.138	-0.573	-0.342	-0.588	0.993	1.491	2.143	5.135	-26.349
Ubx [mm]	-0.028	-0.430	-0.177	-0.297	-0.536	-0.554	-0.763	-	-
Uby [mm]	-0.022	0.294	-0.104	-0.200	-0.367	-0.481	-0.631	-	-
Qx [kN]	306	571	240	358	795	908	1192	1274	1408
Qy [kN]	-252	477	-227	-435	721	-922	-1145	1450	1987
Nz [kN]	757	1429	848	1092	1836	1588	2067	2125	1619
Tz [kN m]	34	-200	-62	-168	314	295	-456	521	-621

（注）α, β：並進及び回転加速度　U, θ：並進及び回転方向変形　γ：せん断変形角　Ub: 曲げによる水平変形成分　base, top: 基礎及び上部スラブの別
Q,N,T：加速度計測値から算出した、重錘及び上部スラブが壁頂部に及ぼす、せん断力,軸力,トルク　最終Runの値は破壊直前までの計測値の最大値

そこで，**図-12** に示すように x, y の二方向で高さ z＝60～1000mm 位置の傾きが水平断面の傾きに一致するような撓み曲線を定め，その撓み量を水平変位計測値から差し引いた残りをせん断変形による水平変位と見做す。

収録データ数と同数の刻々変化する成分比率データが得られると，それらをどの様な値で代表させるかが問題となる。既往研究では変位ピーク点や０点で先験的に代表させるといった扱いが多かったが，ここでは線形回帰により平均的な値を求めた。

横軸に全体変形量（壁頂部水平変位計測値），縦軸を例えば曲げ変形成分として，評価結果を散布図にすると**図-13** が得られる。散布点に関

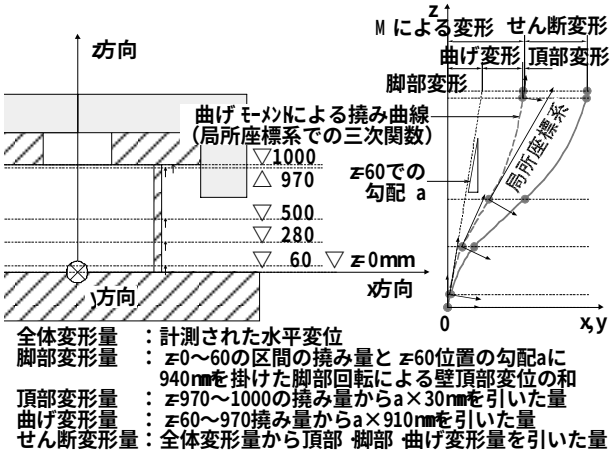

図-12　変形成分分離方法

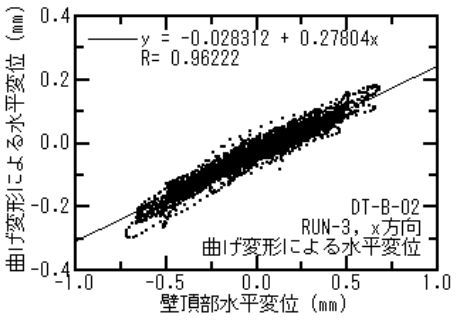

図-13　散布図例

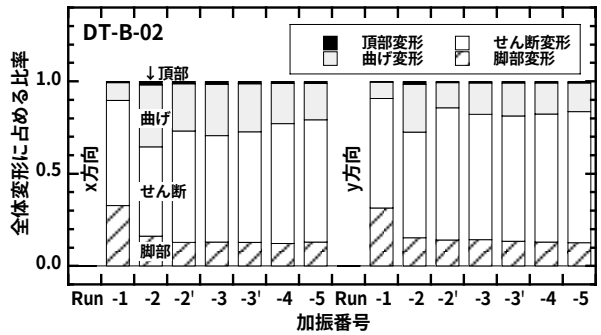

図-14　変形成分比率の評価結果

して線形回帰直線を求め，その勾配を全体変形に対する曲げ変形成分の比率を平均的に評価した代表値と見なす。この様にして求めた各 Run での変形成分比率の評価結果を図-14 に示す。

損傷の進行に伴う曲げ変形比率の上昇等が当初予想されたが，脚部の曲げひび割れのみ観測された Run-1 と加振途中でせん断ひび割れが生じた Run-2 を除き，以降の比率は余り変化がなかった。次項の概略検討でもこの点を利用する。

3.5　最大応答値と既往評価式の対比

原子炉建屋の設計等では一方向載荷を受けるＩ形壁試験体他の静的繰り返し載荷試験に基づく JEAG 式 [2] が用いられる。同式ではせん断のスケルトンカーブが，材料物性と軸力から求めるひび割れ点，γ=4/1000 の終局点，両者の中間にあって上凸の形状を表す第二折点の三つの折点から決まる三本折れ線で近似される。

JEAG 式スケルトンカーブと，各加振で応答加速度の最大値が更新された時の応答値（基礎～上部スラブ間の層間変形角と慣性力）を重ね描くと**図-15** が得られる。但し，JEAG 式では上下方向応答加速度による付加軸力を自重の±１倍程度とした他，せん断変形と曲げ変形の比率を 8:2 として変形角を 4/3 倍することで曲げの影響を見込んだ。図示の様に概略の傾向は簡便な既往式程度でも或る程度評価できるが，値の差が大きい場合もあり，今後更に検討を要する。

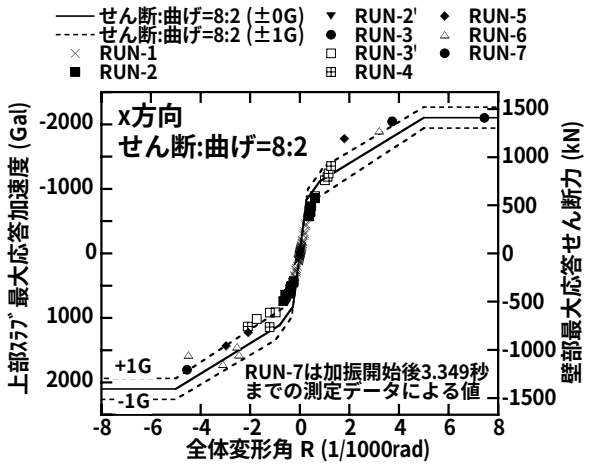

図-15　応答加速度最大値更新点と JEAG スケルトンカーブの対比例

3.6 等価粘性減衰定数

多方向入力の場合の減衰性状の評価は今後の課題であるが，試みに本試験の結果から等価粘性減衰係数 heq を評価した。従来の静的試験では，変位と荷重の履歴のループを一つずつ取り出して heq が求められる。しかし，本試験ではxとyでループが一周する時刻が一致しない上，ほぼ回転対称形のループが殆どなく，同じ方法は適用できない。そこで，**図-16** の方法を用いた。即ち，荷重-変形関係の散布図で線形回帰分析（**図-17** 参照）を行って，各加振毎の線形システムを定め，弾性歪エネルギーΔEi と，試験データの場合の其処からのエネルギー的な逸脱の量ΔWi を時々刻々求める。ある時間におけるΔWi の和をΔEi の和で除し，更にπで割れば，その時間での平均的な heq が求まる。

図-18 の入力波振幅包絡形を考慮して区間1(3.5～5.5 秒)と区間 2(7～8.5 秒)を設定し，1秒間の移動平均により heq を求めた例を**図-19** に示す。入力動が大きい区間１での結果は塑性履歴減衰を含む為，繰り返しループが多く最大変形量が更新されない区間２での値より 0.02 程度高くなっている。

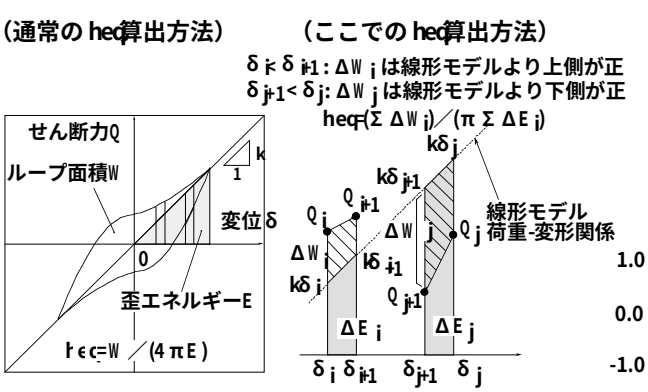

図-16　等価粘性減衰定数の算出方法

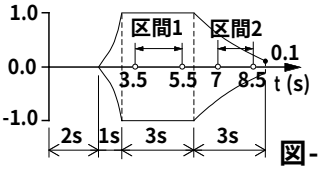

図-18　入力波振幅包絡線

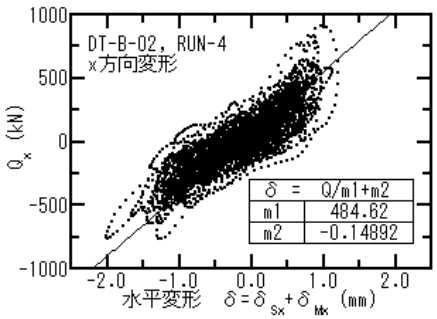

図-17　δ-Q 関係散布図

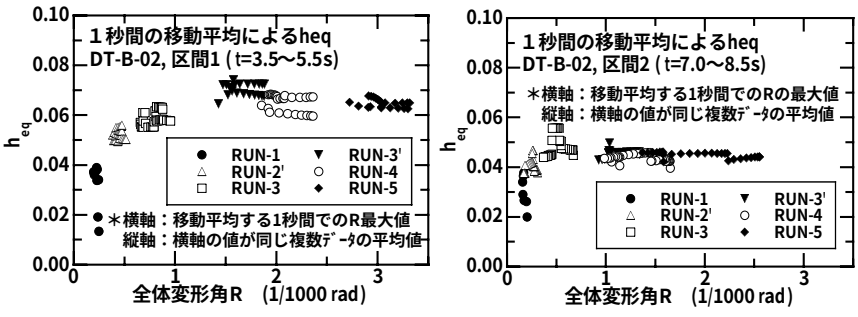

図-19　heq算定例

4. まとめ

ボックス型 RC 耐震壁が多方向から同時に地震力を受ける際の動的挙動を調べるための，三次元振動台を用いた加振試験を実施した。試験データの分析より，せん断ひび割れ発生以降破壊まで変形成分の比率が余り変化しなかったこと，応答加速度最大値更新点の概略の傾向程度は既往の一方向加力に対する復元力特性スケルトン式で評価できること，独自のデータ処理法により求めた等価粘性減衰係数が，塑性履歴減衰を含む場合で 6～7%，余り含まない場合で 4～5%程度となること等を見出した。多方向同時入力に対する動的挙動については今後更に検討が必要であると考えられる。

本試験は(財)原子力発電技術機構が経済産業省の委託による耐震安全解析コード改良試験事業の一環として，「原子炉建屋の多入力試験分科会」の審議の下に実施している。

参考文献

1) 稲田泰夫：原子炉建屋立体耐震壁の復元力特性に関する研究，(その 2) M～φ関係および荷重変形関係スケルトンカーブの検討，日本建築学会構造系論文報告集，第 378 号，PP.16-26，昭和 62 年 8 月

2) 電気技術基準調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601-1991 追補版，(社)日本電気協会，1991