

## 第 5 章. 実大加振実験

### 5.1 はじめに

1995 年の兵庫県南部地震では，新耐震基準に基づき適切に設計・施工された鉄骨造建物が倒壊に至った事例は極めて少なく，現行の耐震規定で要求する安全性は十分発揮したと判断されるが，構造上の要ともいえる柱梁接合部や柱脚に損傷が確認された事例が報告されている．これらの被害は，当時の接合部仕様上の問題点による他，耐震規定の想定を上回る大きさの地震動が建物に入力された結果によると判断される．

このような構造上の主要部位に被害を受けた建物を継続使用するにあたっては，被害状況を把握し，残存する構造性能を評価し，必要に応じて補修を施す必要がある．詳細な被害状況把握は，基本的に仕上げ材等を部分的に撤去する工事を行い，目視調査等を行う必要があるが，巨大地震が発生した際には，膨大な建物が調査対象となるほか，個々の建物の調査対象部位も相当数になるため，簡便なスクリーニングにより，詳細調査を実施すべき建物を絞り込む必要性が指摘されるが，現在のところ，有効な手法が確立されるには至っていない．

本研究では，兵庫県南部地震当時の仕様による実大鉄骨造建物の加振実験を実施し，兵庫県南部地震で見られた損傷状況に至るまでの建物の地震応答性状の他，損傷を受けた建物の地震応答性状に関する実験データを得ることで，損傷を受けた建物の残存耐震性能を評価するための解析手法を構築するほか，構造健全度モニタリング手法の検討を実施する．

### 5.2 実験計画

#### 5.2.1 震動台への試験体設置

試験体製作は，E ディフェンス敷地内の南側屋外製作ヤードにて図 5.1 に示すように高さ 1.5m の仮設架台上で実施した．試験体製作完了後に，E ディフェンスが所有する 900tf キャリア車で，試験体を屋外製作ヤードから試験棟内に移動した．

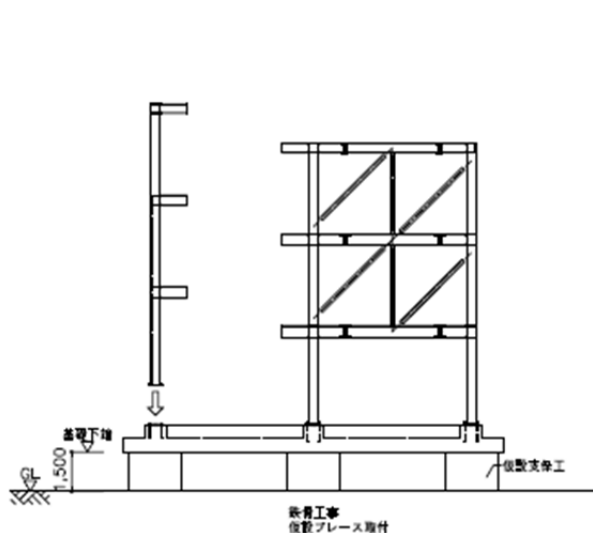


図 5.1 屋外製作ヤードでの建て方

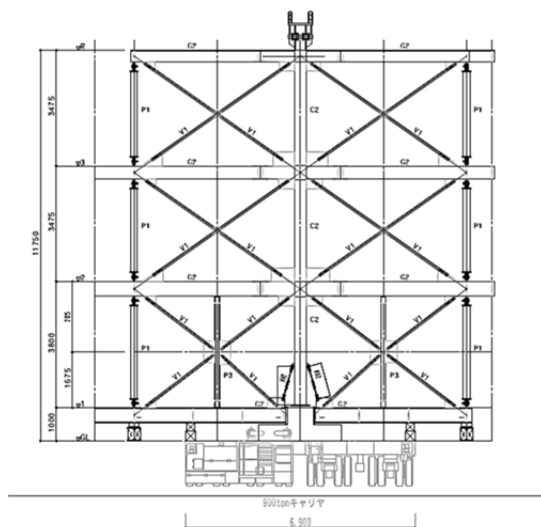


図 5.2 キャリア車による運搬

試験棟内では、400tf クレーン 2 基により、図 5.3 に示すように B 通りの両妻面 2 ヶ所の柱頂部に設けた楊重治具により楊重後、図 5.4 に示すように振動台中央に試験体を設置した。試験体の加振構面である B 通りは、試験棟の桁行方向に一致させた。試験体と振動台は、B 通りの RC 基礎梁部で 48xM44 の PC 鋼棒により、A 通りおよび C 通りの鋼製基礎部で、各 12xM44 の PC 鋼棒により緊結しており、各 PC 鋼棒には 400kN の軸力をボルトテンションにより導入した。B 通り基礎部の PC 鋼棒の導入張力による摩擦力(摩擦係数は 0.1 と仮定)により、基礎を含む試験体の総重量 1920kN に相当する水平力を負担するよう十分な設計している。A 通りおよび B 通りの基礎部は、倒壊防止ブレースが作用した際の水平力として、RC 基礎梁部分を除く試験体重量の 64%の摩擦力を確保した。

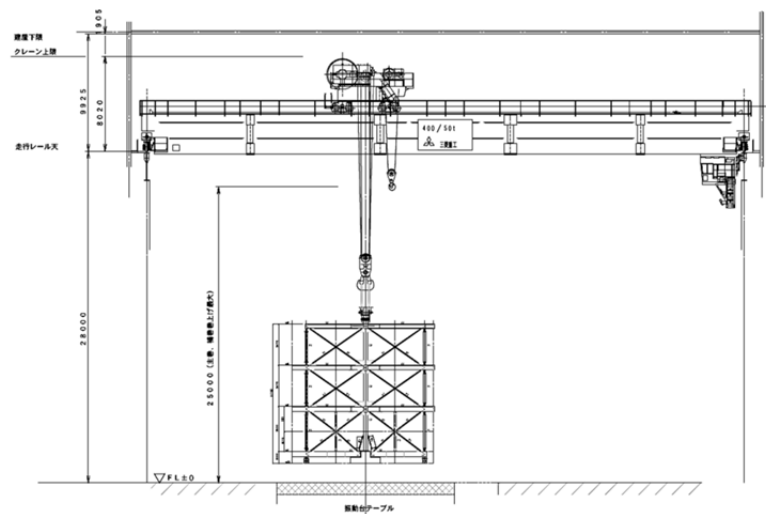


図 5.3 試験棟内での楊重

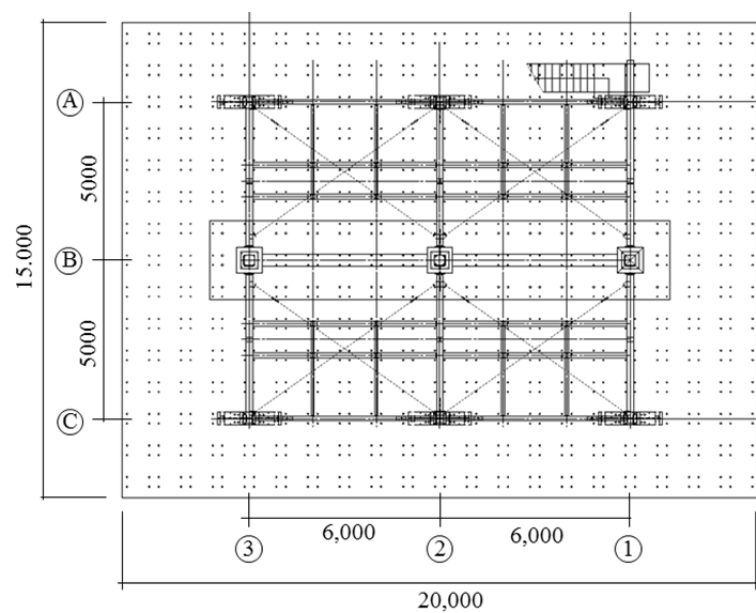


図 5.4 振動台への設置

## 5.2.2 計測計画

### 1) 加速度

各階床位置での応答加速度を計測するため、1階からR階の各床上について、図5.5に示すように試験体平面の中央および試験体の4隅の計5点に(計25点)、上下水平3成分の加速度計(TA-25E-10-1)を設置した。1階については、詩編体平面中央については、RC基礎梁上に加速度計を設置し、他の4点については、振動台上に設置した。加振は、振動台のEW方向の1方向に行うもので、加速度計は、W方向(①通り側)に加速度が生じた場合を正として計測するように設置している。

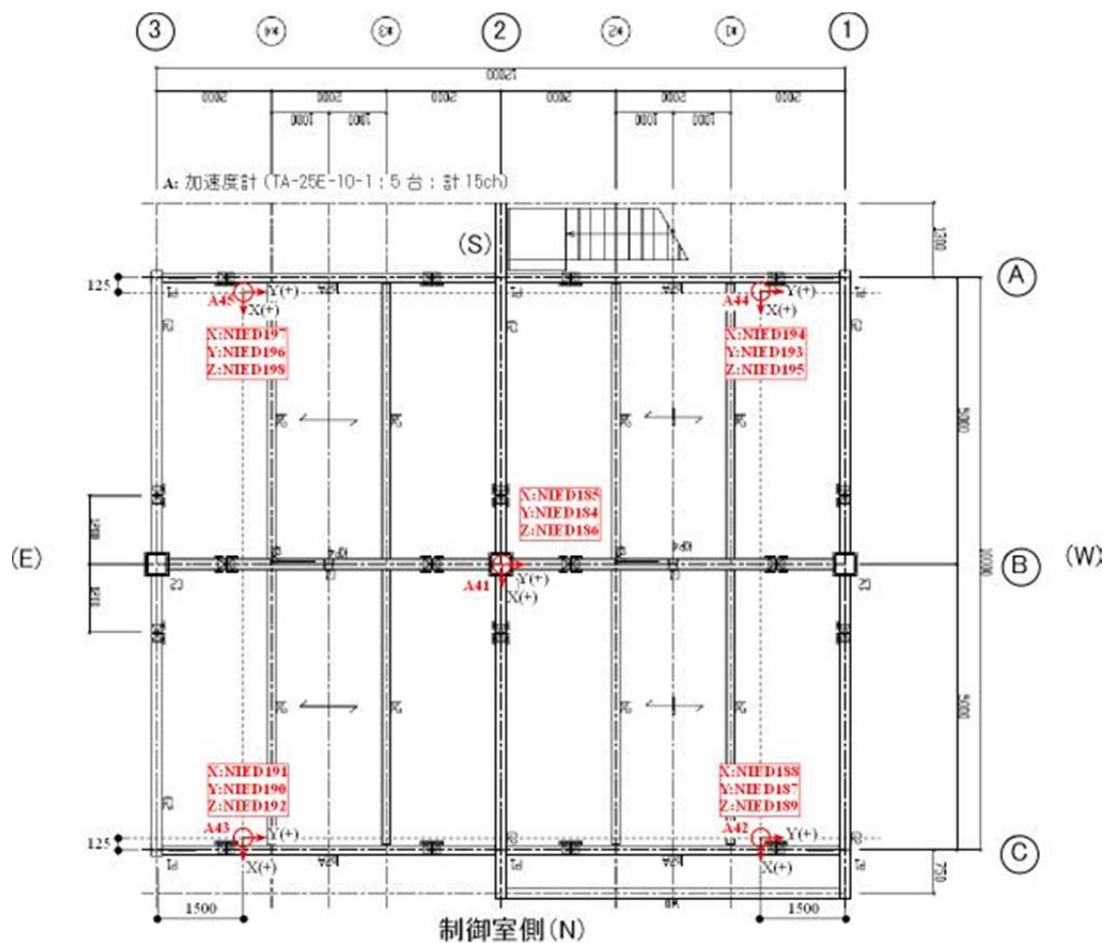


図 5.5 加速度計配置図

### 2) 変位計

i) 層間変位 各階の層間変位を倒壊防止台上部と上階の小梁の相対変位として、倒壊防止台上に設置したレーザー式変位計(LK500)2台(計6台)により計測した。変位計の設置は、試験体がW方向(①通り側)に傾く場合に、計測値に正の値が生じるように設置した。

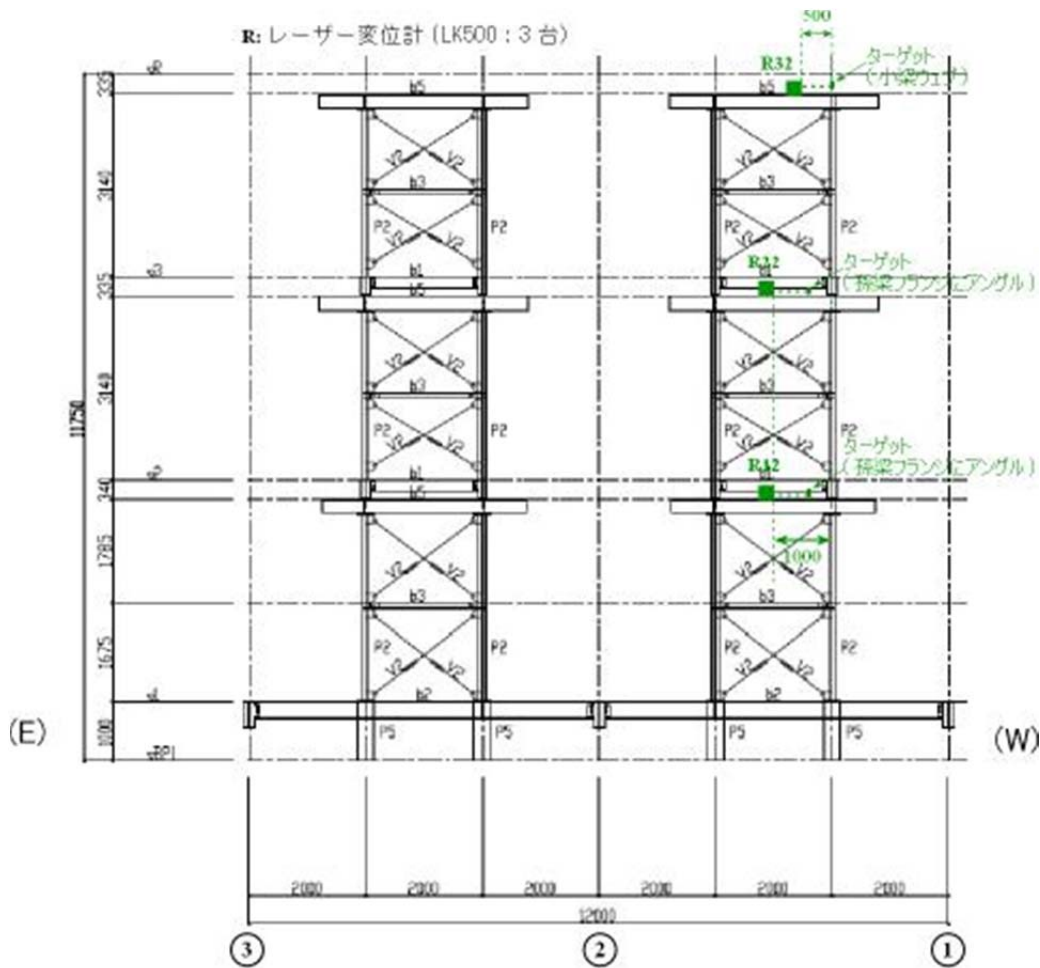


図 5.6 層間変位計測図

ii) 梁端回転角 B 通りの各梁端部(各階 4 カ所)の回転角として, 図 5.7(a)に示す接合部と梁端から 1425 mm の位置の梁断面の上下 2 ヲ所で計測した相対変位の差を上下に設置した変位計間距離で除すこととして, 計測した.

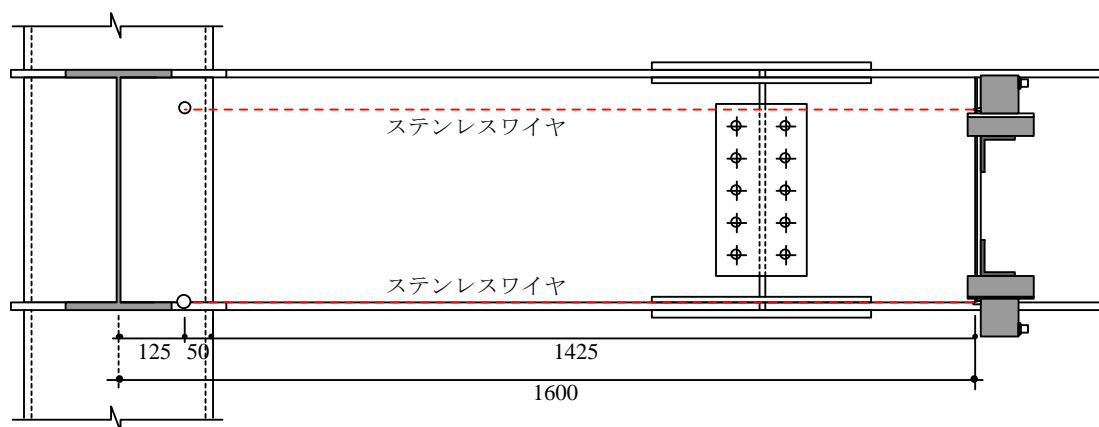


図 5.7(a) 梁端回転角の計測(1)

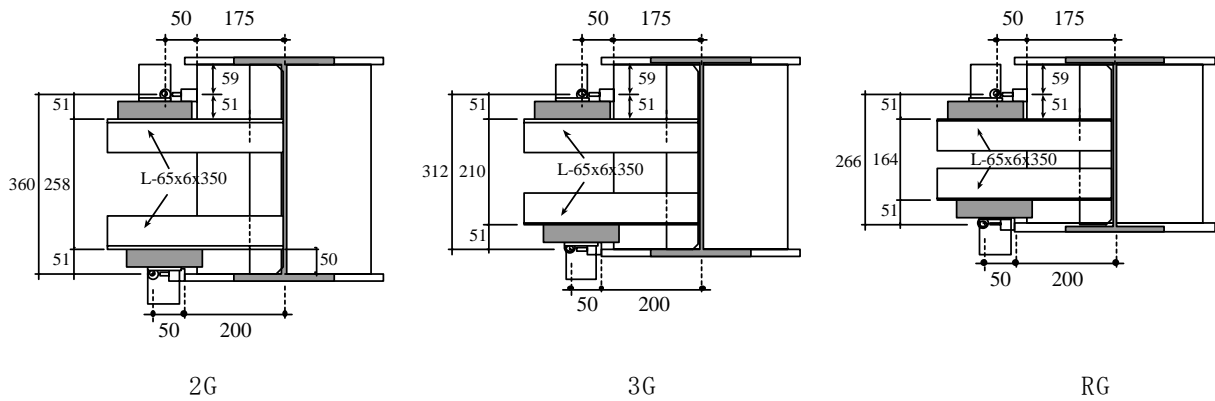


図 5.7(b) 梁端回転角の計測(2)

iii) 柱脚回転角，柱脚鉛直変位および水平変位 B 通りの 3 カ所の柱脚の回転角，鉛直変位および水平変位を図 5.8 に示す各 3 台の変位計 (CDP100×2, CDP50×1) により計測する．柱脚の回転変位は，鉛直方向の変位計 2 台により，基礎梁と柱脚部の相対変位の差を変位計間距離で除すことで，柱脚鉛直変位は，鉛直方向 2 台の変位計の平均値により，柱図心位置での柱脚の浮上り変形を求めている．柱脚の水平変位は，柱脚ベースプレートと，直交方向の H 形梁のがセットプレーとの相対変位により求めた．

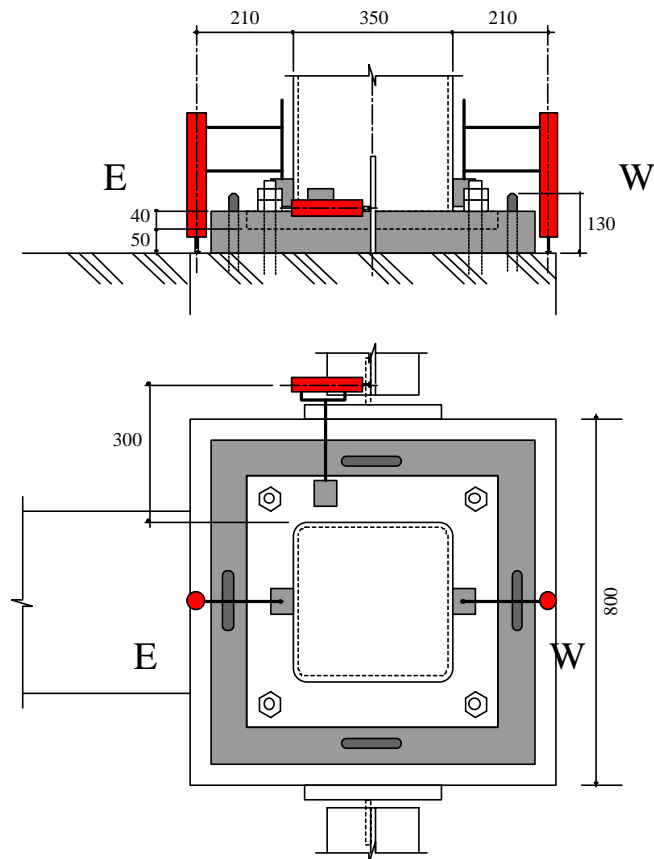


図 5.8 柱脚変位の計測

### 3) 歪ゲージ

柱および梁部材の曲げモーメントおよび軸力分布を計測するため図 5.9 に示すように歪の応答値が弾性範囲に留まると判断される位置の歪を弾性歪ゲージ (FLA5-11, 計 80 点) により計測した。また, 2 通り 2 階および 3 階の接合部パネルのウェブ面に 3 軸塑性ゲージ (YFRAt-11, 計 2 点) を添付し, 接合部パネルのせん断歪を計測した。各柱脚のアンカーボルトの軸部の歪を塑性歪ゲージ (YEFLA5-11) により計測した。

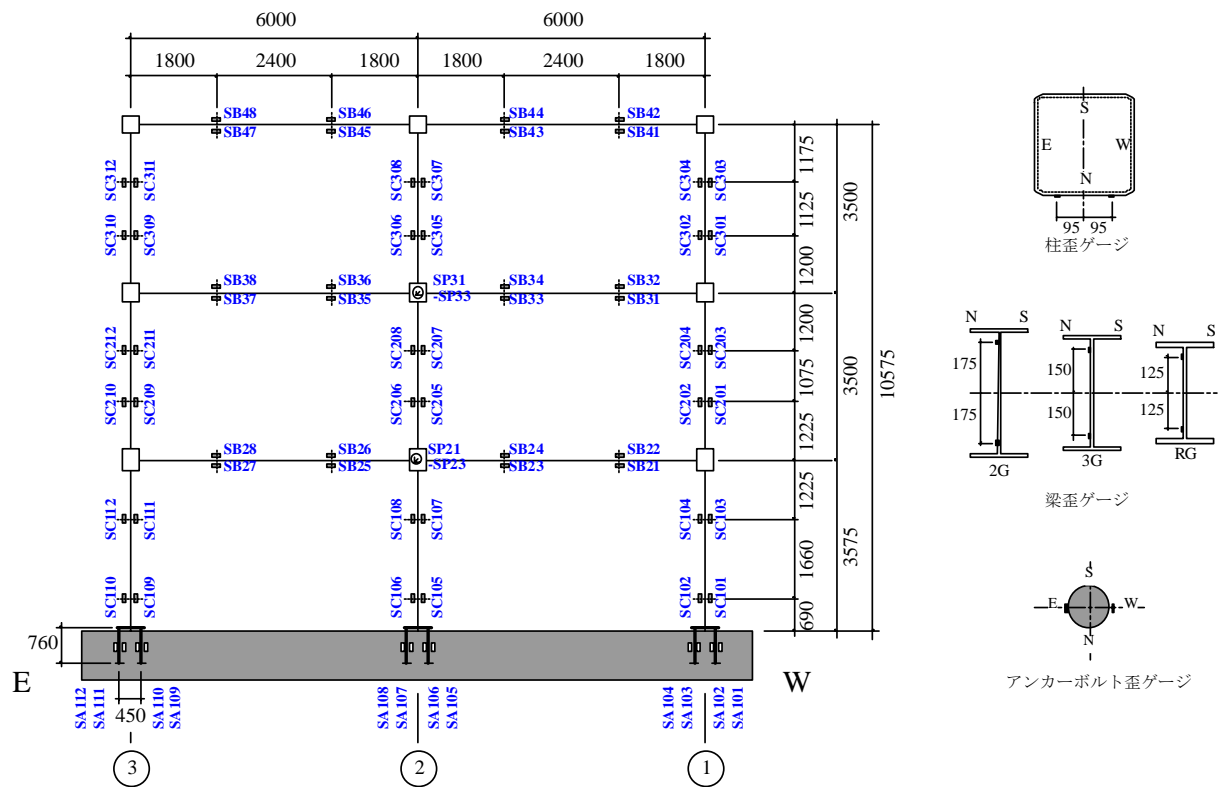


図 5.9 歪ゲージ添付位置

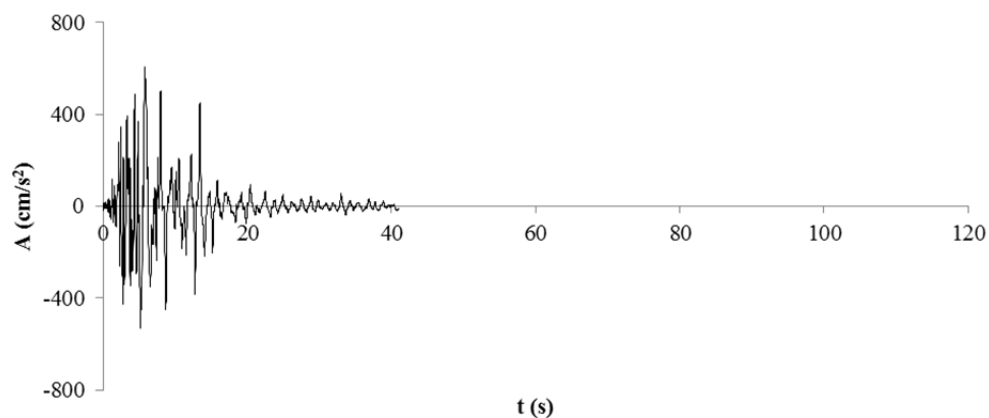
## 5.2.3 加振計画

### i) 加振波

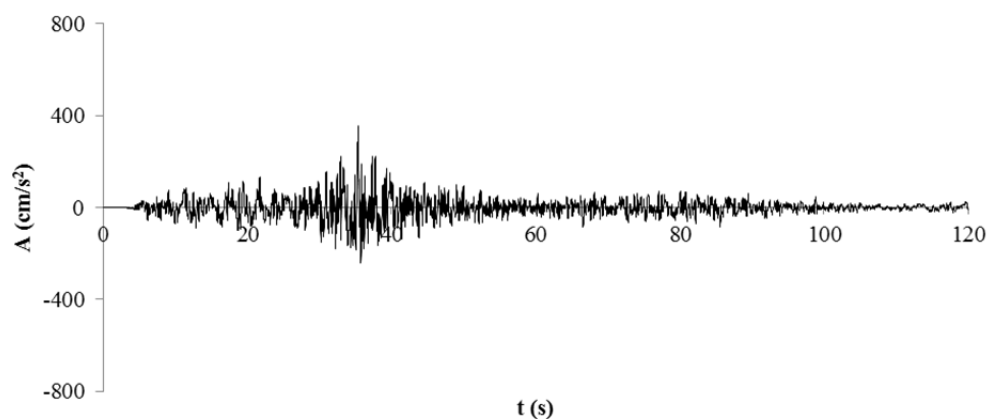
加振に用いる地震動は, 1995 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された加速度波形の NS 成分(以下, 鷹取波と呼ぶ)と, 2012 年に中央防災会議で作成された想定南海トラフ巨大地震の工学基盤における加速度波形の公開データを基に「神戸の減災研究会」が作成した神戸市役所所在地における表層地盤における加速度波形(以下, 想定南海トラフ波と呼ぶ)の 2 種類を用いることとした。今回想定南海トラフ波は, 中央防災会議で作成した 4 ケースのシナリオの内, 紀伊半島沖を震源とし, 強震動生成域を最も陸側に広げたケースのもので, 神戸市役所所在地に最も近い地点での工学基盤で公開されている加速度波形を, 神戸 JIBANKUN のデータを基に作成された(財)阪神・淡路大震災記念協会(現在の(公財)ひょうご震災記念 21 世紀研究機構)の地盤モデル 1)に入力し, 逐次積分による非線形解析手法である DYNES3D3)により応答解析を実施することで, 表層地盤の加速度波形を作成したものである。

鷹取波および想定南海トラフ波それぞれの加速度波形を図 5.10 に示す。鷹取波および想定南海トラフ波の最大加速度は、それぞれ 606gal および 359gal で、最大速度は、それぞれ、121kine および 49kine である。またそれぞれの地震動の計測震度は、JR 鷹取波および想定南海トラフ波のそれぞれで、6.3 および 5.4 である。減衰定数を 2%とした場合の疑似速度応答スペクトルを図 5.11 に、減衰乗数を 10%とした場合のエネルギースペクトルを図 5.12 に示す。ここで、エネルギースペクトルは、地震動により系に入力される総エネルギーの速度換算値  $V_E$  として示している。両図中に示す一点破線は、数値解析より求めた試験体の 1 次固有周期を表す。鷹取波および想定南海トラフ波の試験体 1 次固有周期における疑似速度応答スペクトル  ${}_pS_v$  の値は、それぞれ 154kine および 70kine となり、総地震入力エネルギーの速度換算値については、それぞれ 186kine および 132kine となる。試験体の 1 次固有周期での  $V_E$  を  ${}_pS_v$  で除した値は、鷹取波の場合で、1.21 となるのに対し、想定南海トラフ波の場合では、1.89 となっており、 $V_E$  の値が、 ${}_pS_v$  を大きく上回っている。これは、エネルギースペクトルとすることで、スペクトル特性が平滑化されたことの影響もあるが、地震動の継続時間の相違の影響も含まれている。

加振は、振動台の EW 方向 (B 通り構面方向) の 1 方向に行っており、W 方向を加速度の正 (加振波の N 方向に対応) として入力している。



(a) 鷹取波



(b) 想定南海トラフ波

図 5.10 入力地震動加速度波形

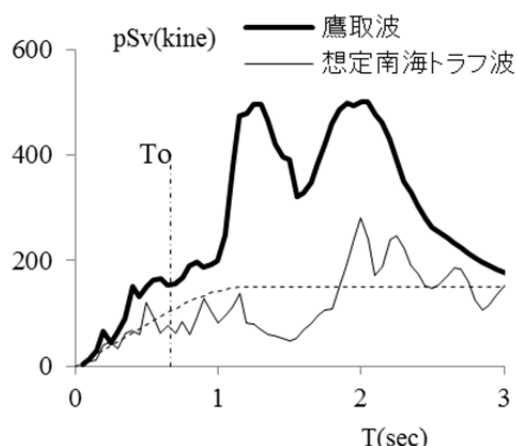


図 5.11 疑似速度応答スペクトル

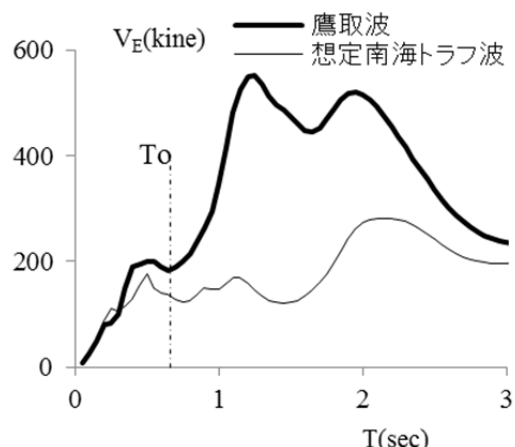


図 5.12 エネルギースペクトル

### ii) 加振ケース

加振実験は、10月8日、10月10日および10月15日の3日間で行うとし、表5.1に示す加振計画に基づき加振波および加振波の入力レベルを変化させて実施することとした。ここで、入力レベルは、図5.10で示した加速度波形に対する増幅率を表しており、入力レベルが100%の場合は、入力レベルを調整することなく加速度波形の原波を入力することを意味する。

加振初日の10月8日の想定南海トラフ波による加振では、損傷を受けていない建物の地震応答性状を把握することを目的としたものである。鷹取波の加振では、入力レベルを徐々に増加させることで、損傷の進展と応答性状の関係を把握するとともに、最終的に兵庫県南部地震の際に確認された柱梁接合部の破断を再現することを目的とした。加振番号6の鷹取波の入力については、柱梁接合部で4カ所程度の破断を生じさせることを目標とし、加振番号5の鷹取波80%を入力した後の損傷観察に基づき、加振の実施の有無およびレベルを設定することとした。実際の加振実験では、損傷状況が目標レベルに到達していなかったため、No.6の加振番号では、鷹取波100%の加振を実施した。

加振日3日目の10月15日では、鷹取波の加振により兵庫県南部地震の損傷状況を再現した骨組が、想定南海トラフ波を入力された場合の応答性状を把握することを目的としており、10月8日の応答と比較することで、再現された接合部の損傷が建物の地震応答に及ぼす影響を把握することを目的としている。最終加振のNo.9では、損傷を受けた建物に想定波を上回る入力した場合の応答を把握することを目的としおり、入力レベルは、加振番号8の実験の応答性状および損傷状況により判断することとした。実際の加振実験では、150%の地震動を入力した。

### iii) 加振制御

振動台をアクチュエータにより振動させる際、試験体の応答の影響を受けるため、振動台の加速度波形の再現性を高めるためには、この影響を考慮して振動台への入力信号を調整する必要がある。この手法として、入力加速度波形のレベルを低減した試行加振を実施



し,得られた伝達関数で振動台への入力信号を調整する入力波補償制御という手法がある.加振番号 No.1 と No.2 の想定南海トラフ波の加振については,振動台の加速度波形の再現性が重要であるため,入力波補償制御法により加振を実施した.加振番号 No.3 以降の加振については,入力波補償制御法による試行加振の際に損傷が進行する可能性が考えられたため,入力予定波に基づく入力信号を直接,振動台に送る基本制御法を採用することとした.

表 5.1 加振スケジュール

加振番号	加振実験名称	加振日	加振波	入力レベル
No.1	想定南海 50%-1	10月8日	想定南海トラフ波	50%
No.2	想定南海 100%-1			100%
No.3	鷹取 40%	10月10日	鷹取波	40%
No.4	鷹取 60%			60%
No.5	鷹取 80%			80%
No.6	鷹取 100%*			損傷状況で判断 (100%*)
No.7	想定南海 50%-2	10月15日	想定南海トラフ波	50%
No.8	想定南海 100%-2			100%
No.9	想定南海 150%*			損傷状況で判断 (150%*)

※:実験当日に確定

#### 5.2.4 損傷観察計画

柱梁接合部,柱脚およびスラブの損傷状況を記録するため,加振番号 No.1 を除き,各加振実験毎に振動台を着座させ,30分程度の損傷観察を実施することを原則とした.

損傷観察は,12名の損傷観察要員により実施しており,3名一組の観察チームを4組編成し,接合部の損傷状況の写真および野帳記録作業を2チームで実施し,スラブのひび割れおよび支圧破壊状況のスケッチ記録作業を2チームで実施することとした.想定南海50%-1の加振ケースにおいては,損傷が軽微であると判断されたため,損傷観察を実施しないこととし,他の加振ケースについては,損傷観察を実施することを基本とした.

### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 入力地震動

振動台の加速度波形の再現性を調べるため、振動台の加速度波形を積分することで、最大速度 PGV を調べた。表 5.2 に再現された最大加速度 PGA および PGV の一覧を示す。同氷柱の再現増幅率は、各加振ケースにおいて、振動台上で再現された加振波の PGA および PGV を元波の PGA および PGV で除したもので、実験で実際に再現された PGA および PGV の再現率を表し、計画増幅率は、加振計画において予定していた加振波の増幅率を表す。表 5.2 において、PGV により加振波の再現性を評価すると、想定南海トラフ波加振においては、再現増幅率が計画増幅率を上回る傾向にあり、鷹取波加振の場合は、良好な再現性が確認できる。

また、各加振ケースの振動台上の再現加速度の疑似速度応答スペクトルの形状の相似性により、振動台加速度波形の再現性を調べた。図 5.11 に得られた疑似速度応答スペクトルの代表例として想定南海波と鷹取波の入力レベル 100%の加振ケースの結果を示す。想定南海波 100%については、振動台の再現波は、初日と 3 日目の両方の結果を示しており、両再現波ともに想定南海トラフ波の元波に対する再現性が極めて高い。一方、鷹取波については、振動台の再現波が元波を下回る傾向にあり、を固有周期が 0.6~2.0 秒の範囲で pSv の再現波と元波の比を求めたところ、概ね 10%程度の割合で再現波の値が元波の値を下回っていた。入力レベルの相違による影響は見られず、振動台上の再現波のスペクトルは、入力レベルに応じて比例的に増大する相似形状を示していた。

表 5.2(a) 想定南海トラフ波加振の PGA および PGV

加振名称	再現波PGA	再現波PGV	再現増幅率		計画増幅率
			PGA	PGV	
	gal	kine	%	%	%
南海50%-1	201	28	56	58	50
南海100%-1	407	53	113	107	100
南海50%-2	203	26	56	52	50
南海100%-2	410	50	114	103	100
南海150%	650	76	181	155	150
元波	359	49	-	-	-

表 5.2(b) 鷹取波加振の PGA および PGV

加振名称	再現波PGA	再現波PGV	再現増幅率		計画増幅率
			PGA	PGV	
	gal	kine	%	%	%
鷹取40%	244	47	40	39	40
鷹取60%	373	73	61	61	60
鷹取80%	534	94	88	78	80
鷹取100%	706	119	117	98	100
元波	606	121	-	-	-

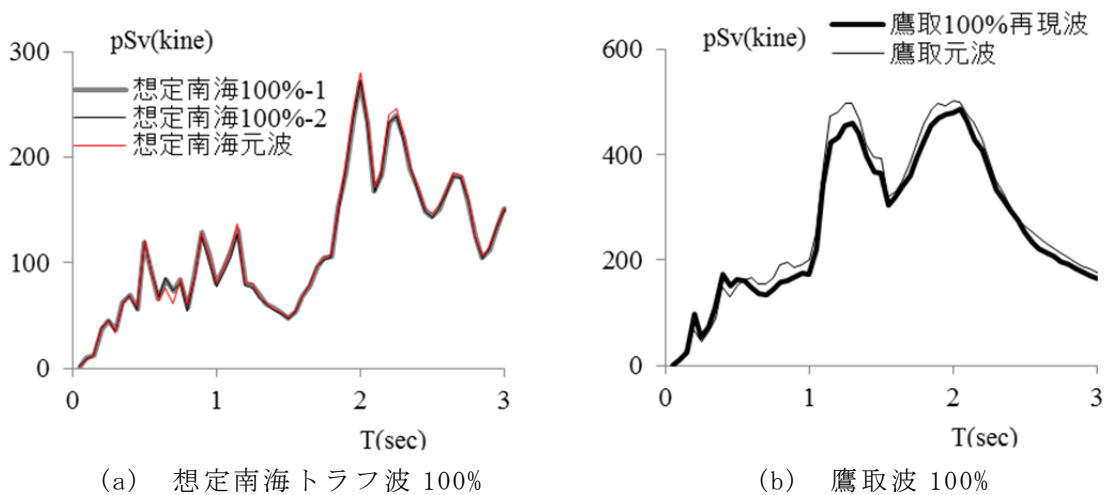


図 5.11 再現波の疑似速度応答スペクトル

### 5.3.2 全体挙動

図 5.12～図 5.14 に各加振ケースの層せん断力-層間変形角関係を示す。図 5.12 および図 5.13 は、それぞれ 1 回目の想定南海トラフ波加振実験および鷹取波加振実験の結果で、図 5.14 は、鷹取波加振により接合部が損傷を受けた状態で、2 回目の想定南海トラフ波加振実験の結果である。図 5.13 および図 5.14 中には、層せん断力として、柱に貼付した歪ゲージより評価した柱の曲げモーメントより評価した各階の柱せん断力の合計により求めた  $Q1, Q2$  および  $Q3$  の他に、各階の地震重量に各階の加速度を乗じることで求めた層慣性力 ( $Qa1, Qa2$  よび  $Qa3$ ) の 2 種類を縦軸としたグラフを重ねて示している。いずれの図においても層せん断力と層慣性力によるグラフは非常によく一致していることが確認でき、地震重量の積算結果ならびに、柱の曲げモーメント分布が精度よく評価されていると判断できる。なお、柱の曲げモーメント分布より評価した層せん断力においても、通常の解析では、減衰力として復元力とは独立に扱われる内部摩擦減衰による力が含まれていることを断っておく。

#### i) 想定南海トラフ波加振 1 回目の挙動

図 5.12 より、想定南海 50%-1 の加振ケースでは、いずれの層も弾性範囲の応答を示しており、想定南海 100%-1 の加振ケースで軽微な塑性化が 1 階で確認できる。加振レベル 50% および 100% での振動台の PGV は、それぞれ 28kine および 53kine で、1 階の最大層間変形角は、それぞれ 0.005 および 0.013rad となり、1 階の最大層せん断力を総地震重量で除したベースシア係数は、0.28 および 0.49 となっている。

#### ii) 鷹取波加振時の挙動

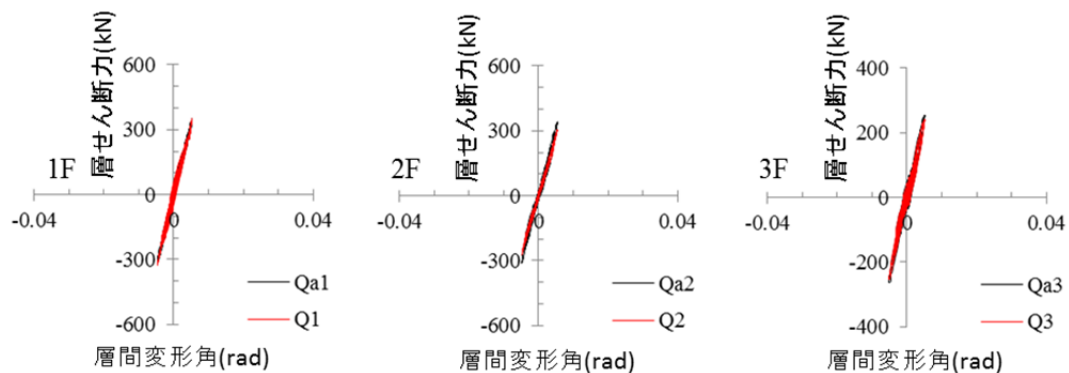
図 5.13 の鷹取波加振実験においては、鷹取 40% の加振から 1 階および 2 階で負側の最大応答が生じた際の半サイクルの応答で明瞭な塑性変形が認められる他、軽微なスリップ型の挙動の兆候が確認できる。この加振ケースでの振動台の PGV は 47kine で、1 階の最大層間変形角は、0.015rad、ベースシア係数は、0.45 となっている。

鷹取 60% の加振ケースでは、1 階および 2 階で最大応答が生じた 1 サイクルの応答で塑

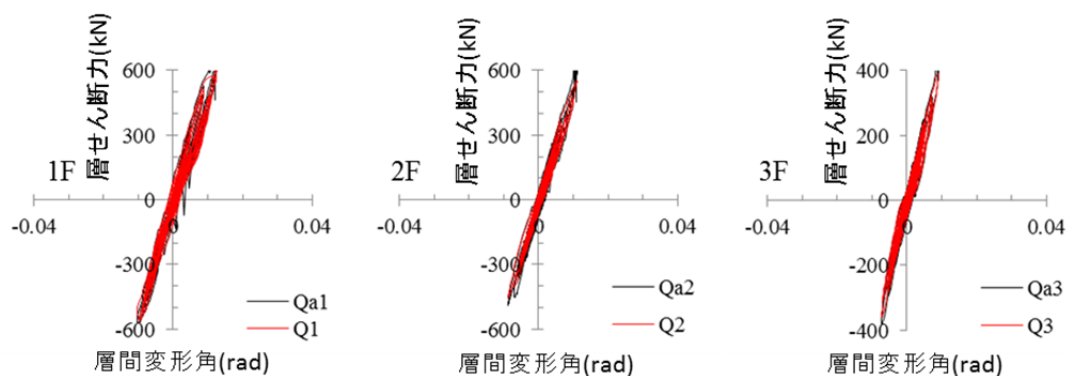
性変形が確認できる．この加振ケースでの振動台の PGV は 73kine で，1 階の最大層間変形角およびベースシア係数は，それぞれ 0.028rad および 0.68 に達している．後述する損傷状況によるとこの加振ケースでは，アンカーボルトの残留伸びは最大で 10 mm に達しているが，履歴特性には鷹取 40%加振の場合と同様に軽微なスリップ型の挙動しか認められない．

鷹取 80%の加振ケースでは，複数サイクルの塑性変形を伴う応答が生じており，これ以前の加振ケースとは，応答性状に相違がみられる．この加振ケースでの振動台の PGV は 94kine に達しているが，層間変形角およびベースシア係数の最大応答値は，それぞれ 0.031rad および 0.68 で鷹取 60%の加振ケースからの応答値の増加は少ない．この原因の一つとして，複数サイクルで塑性変形を伴う応答が生じたことが考えられる．

鷹取 100%の加振ケースでは，鷹取 80%の加振に比べ最大層間変形角応答が著しく増加しているほか，最大応答が生じた 1 サイクル以降の層せん断力 - 層間変形角関係において，弾性剛性および耐力の低下がみられる．これは，2 階床と 3 階床の柱梁接合部で梁下フランジが 3 カ所完全に破断したことによるものである．振動台の PGV は，119kine で，最大層間変形角応答値は，1 階，2 階および 3 階のそれぞれで，0.076，0.050 および 0.021rad に達している．また最大ベースシア係数は，0.75 となっている．

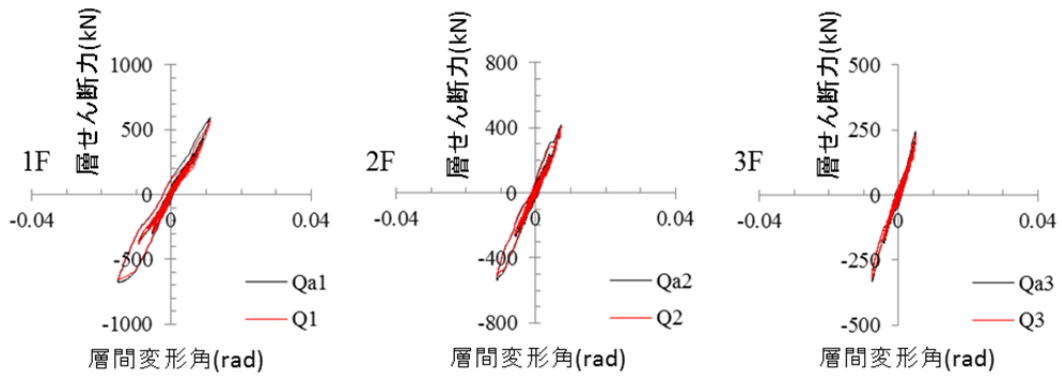


(a) 想定南海 50%-1

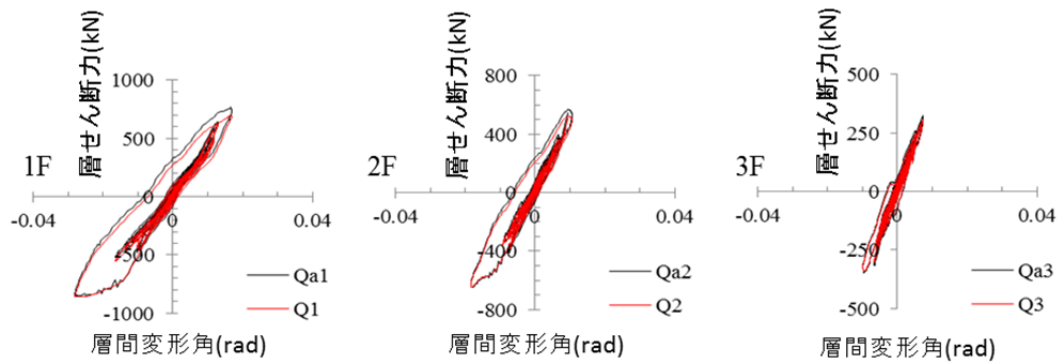


(b) 想定南海 100%-1

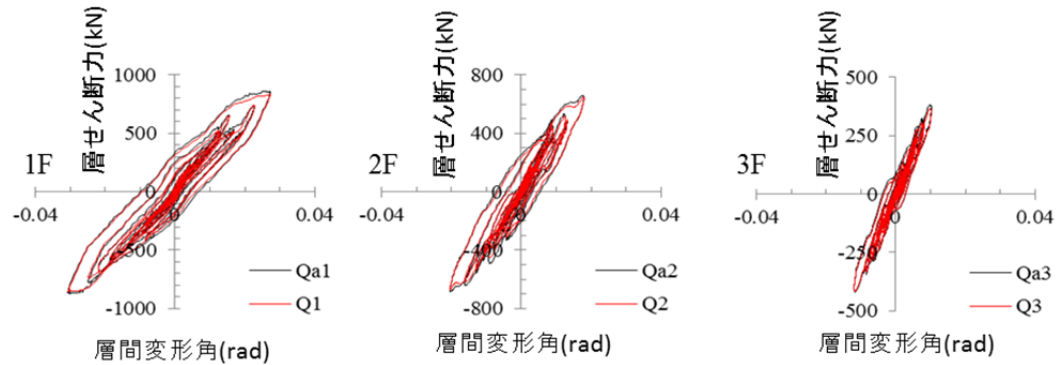
図 5.12 層せん断力-層間変形角関係(想定南海トラフ波加振-1)



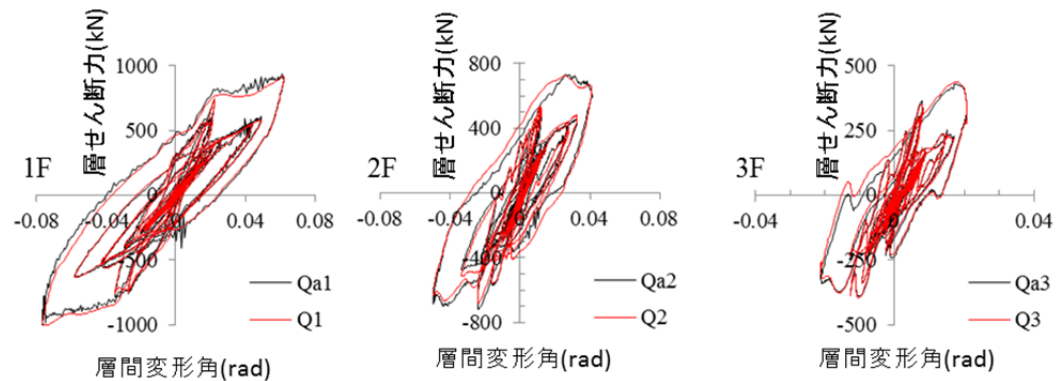
(a) 鷹取 40%



(b) 鷹取 60%

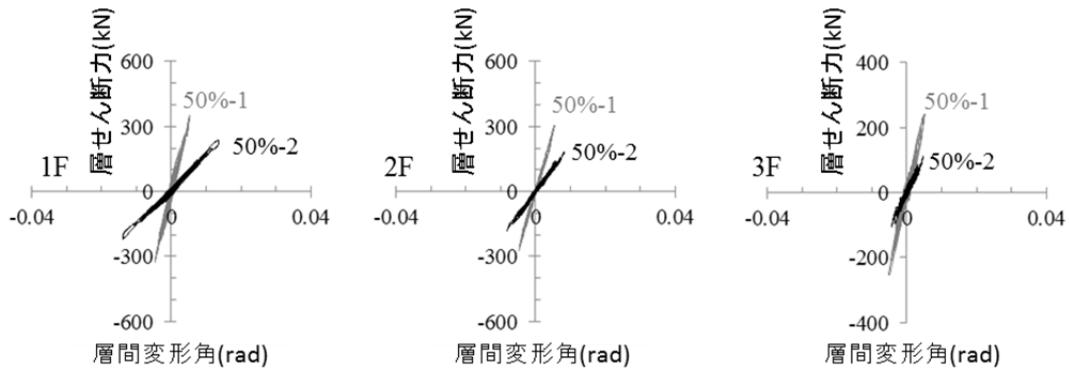


(c) 鷹取 80%

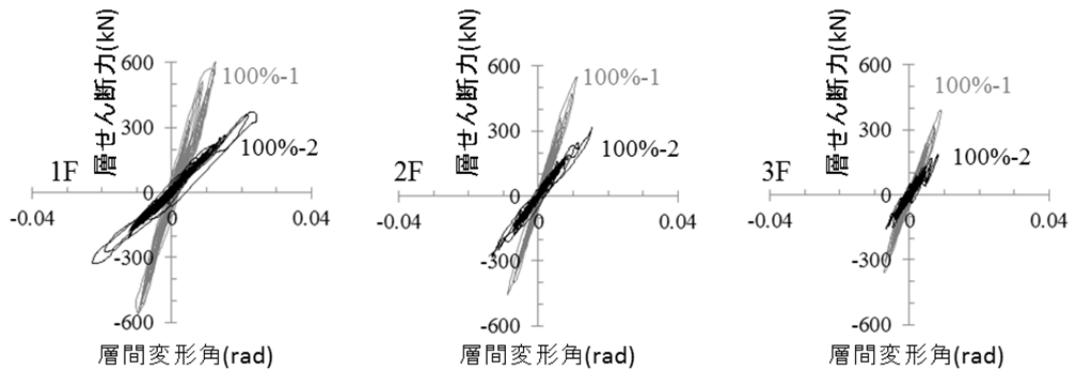


(d) 鷹取 100%

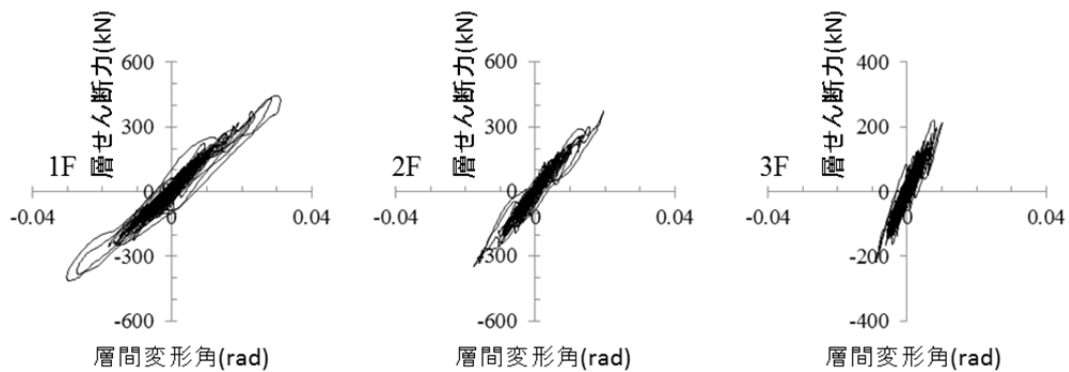
図 5.13 層せん断力-層間変形角関係(鷹取波加振)



(a) 想定南海 50%-2



(b) 想定南海 100%-2



(c) 想定南海 150%

図 5.14 層せん断力-層間変形角関係(想定南海トラフ波加振-2)

iii) 鷹取波加振後の想定南海トラフ波加振時の挙動

鷹取波加振で2階および3階床の柱梁接合部で梁下フランジが3カ所破断した状態で、再度、想定南海トラフ波加振を実施した際の層せん断力-層間変形角関係を図 5.14 に示している。同図中には、対応する入力レベルの1回目の想定南海トラフ波加振時のグラフを50%-1, 100%-2として示しており、鷹取波加振後の2回目の想定南海トラフ波加振時のグラフを50%-2, 100%-2として示している。

入力レベルを150%とした場合の結果については、鷹取波加振以前に対応する入力レベルでの加振を実施していないので、鷹取波加振により、柱梁接合部に破断が生じた状態での加振結果のみを示している。

5.3.3 項で詳細に損傷状況の推移を後述するが、鷹取波加振で柱梁接合部に破断が生じた試験体に想定南海トラフ波で入力レベル 150%まで加振したが、一部の柱梁接合部で亀裂の進展が見られた以外、新たな柱梁接合部の破断といった、大きな損傷の進展は見られていない。

図 5.14 によると柱梁接合部で破断が生じた状態である 2 回目の想定南海トラフ波加振の結果においても、1 回目の加振時と同様に、50%の入力レベルでは弾性挙動を示し、100%の入力レベルで若干の塑性化が生じるという挙動を示しているが、柱梁接合部が破断した 2 回目の加振では、1 階、2 階および 3 階の弾性剛性が、1 回目加振に比べて、それぞれ 25%、40% および 50%に低下している。剛性低下に伴う固有周期の変化により、2 回目加振時の最大層せん断力応答は、同一加振レベルの 1 回目加振時の 60%~67%に減少しているが、最大層間変形角応答は、入力レベルが 50%および 100%のそれぞれで、260%および 190%に増加している。入力レベル 50%および 100%の 1 階の最大層間変形角応答値は、0.014 および 0.024rad で、ベースシア係数は、それぞれ 0.19 および 0.29 である。

入力レベル 150%加振時の挙動においても弾性挙動が支配的であるが、若干の塑性化が生じていると判断できる。この加振レベルにおける振動台の PGV は 76kine に達しており、1 階の最大層間変形角およびベースシア係数は、それぞれ 0.031 および 0.35 となっている。

### 5.3.3 損傷状況

5.2.4 節の損傷観察計画に基づき実施した損傷観察の実施状況を表 5.4 に示す。なお、加振番号 No. 8 の実験後の損傷観察は、時間的な制約により省略し、加振番号 No. 8 の加振後に、振動台を着座させることなく、加振番号 No. 9 の加振実験を実施しており、加振番号 No. 9 の実験後に、振動台を着座させて、損傷観察を実施した。以降で、各損傷部位別に加振履歴に従って、損傷状況およびその変化を述べる。

表 5.4 損傷観察を実施状況

加振番号	加振名称	加振日	損傷観察
No. 1	想定南海 50%-1	10 月 8 日	—
No. 2	想定南海 100%-1		柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 3	鷹取 40%		柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 4	鷹取 60%	10 月 10 日	柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 5	鷹取 80%		柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 6	鷹取 100%		柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 7	想定南海 50%-2	10 月 15 日	柱梁接合部, 柱脚, スラブ
No. 8	想定南海 100%-2		—
No. 9	想定南海 150%		柱梁接合部, 柱脚, スラブ

### i) スラブの損傷状況

図 5.15～図 5.17 にそれぞれ、2 階、3 階および R 階の床スラブの損傷状況を示す。鷹取 40%および鷹取波加振後の想定南海トラフ波による加振時には、優位な損傷の進展が認められなかったため、損傷図を省略している。図中の細実線は、以前の加振で生じたひび割れや支圧損傷を、太実線は、その加振時に新たに生じたひび割れや支圧損傷を表している。

いずれの階においても、太実線が占める割合は、南海 100%-1 の加振ケースが最も多い。南海 100%-1 の加振ケースについて、各階のひび割れ状況を比較すると、下階程にひび割れが多く発生している傾向にあるが、2 階と 3 階では、それほど優位な差は無く、R 階では、他の階に比べひび割れが少ないと言える。なお、加振ケース南海 100%-1 における 1 階、2 階および 3 階の最大層間変形角は、それぞれ、 $1/78\text{rad}$ 、 $1/90\text{rad}$  および  $1/110\text{rad}$  となっている。南海 100%-1 で生じたひび割れが以降の加振ケースでも支配的であったこと、南海 100-1 の加振ケースにおいて、R 階のスラブのひび割れが他の階よりも軽微であったことから、スラブのひび割れは、生じる層間変形角の大きさに応じて進展するものではなく、 $1/100\text{rad}$  強の層間変形角応答が生じた以降は、それ程、大きな進展は見られないものと判断され、スラブのひび割れ状況から層間変形角の最大応答値が  $1/100\text{rad}$  に達したかどうかの判断が可能と考えられる。

柱近傍のスラブの損傷状況については、柱と床スラブの間で生じる支圧応力の伝達に起因する支圧損傷が確認される。この支圧損傷については、入力レベルとの相関がみられており、鷹取 80%の加振ケースで 2 階床において明瞭な損傷が確認され、鷹取 100%の加振ケースでは、2 階床で損傷状況がさらに進展し、3 階床でも明瞭な支圧損傷が確認された。加振ケースが鷹取 100%の際の①通りにおける柱近傍の損傷状況を示す。



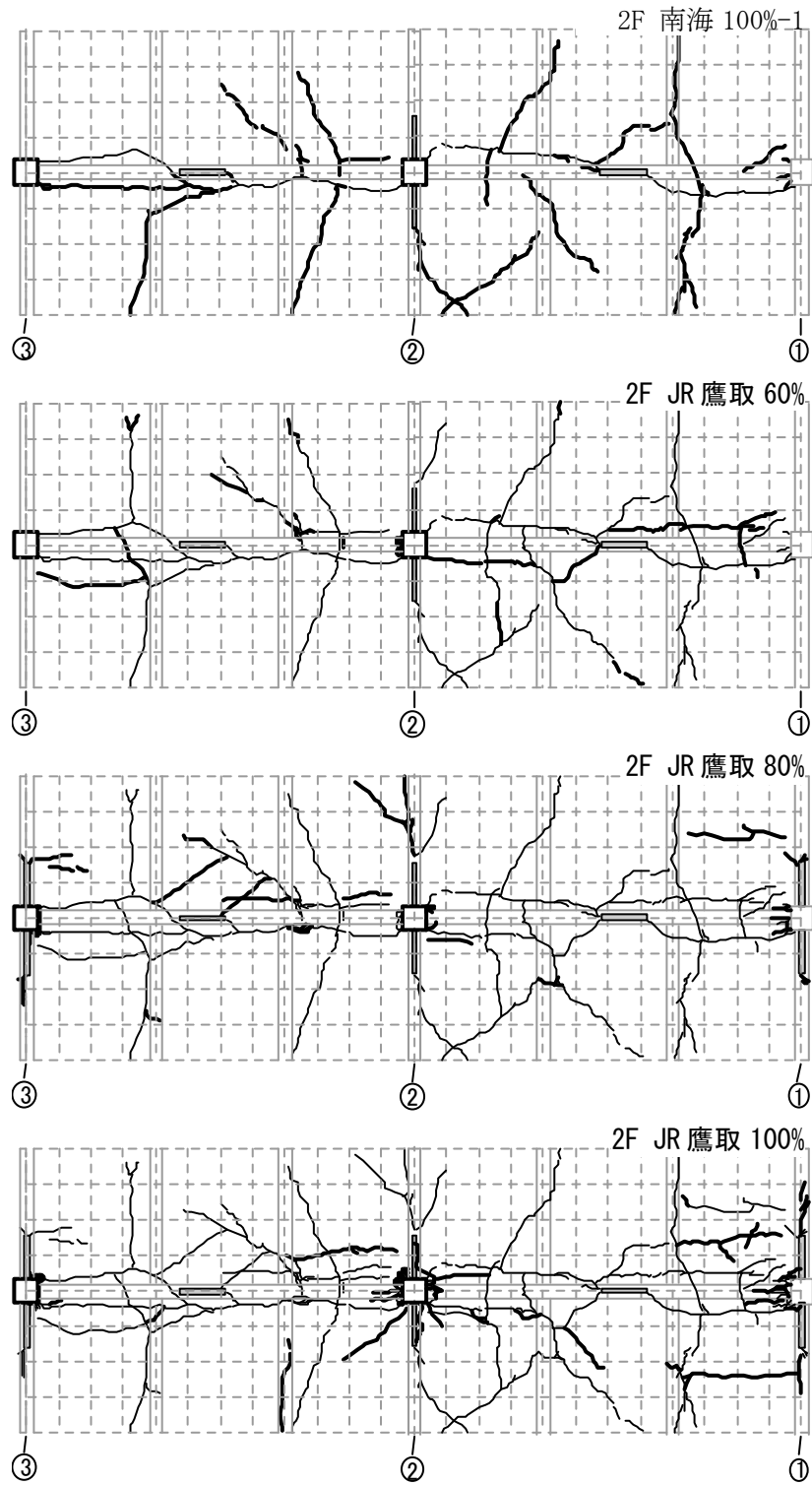


図 5.15 2階床スラブの損傷状況

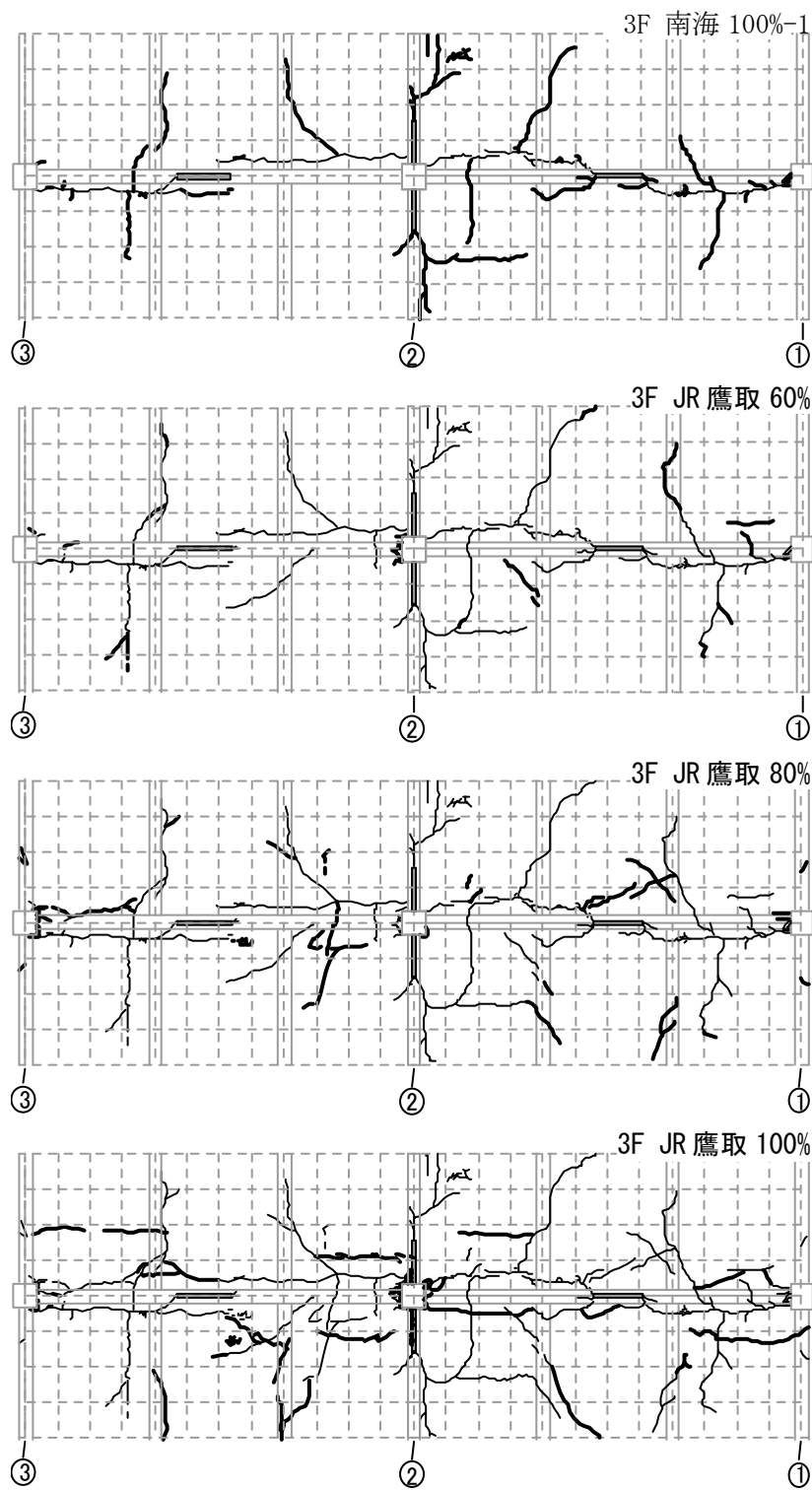


図 5.16 3階床スラブの損傷状況

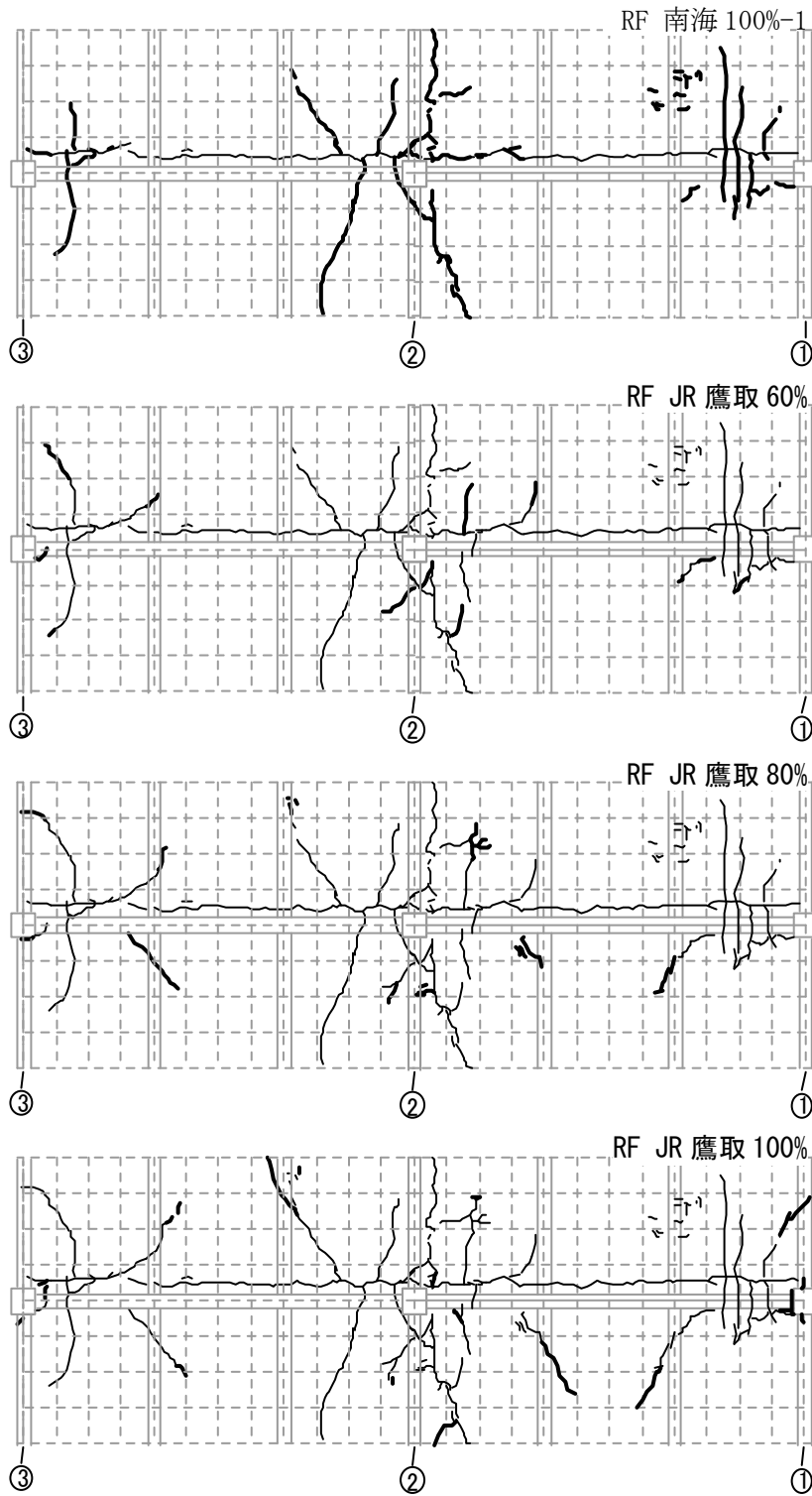


図 5.17 R 階床スラブの損傷状況

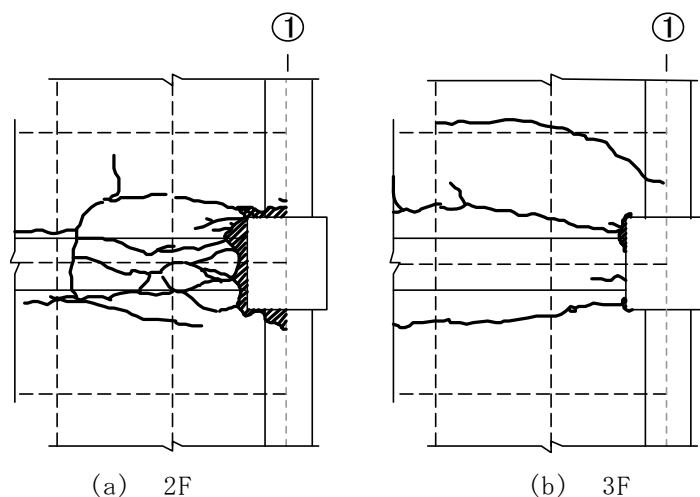


図 5.18 柱近傍のスラブの支圧損傷 (鷹取 100%)

## ii) 柱脚

柱脚については、南海 100%-1 加振ケースから、アンカーボルトの残留伸びが確認されており、加振レベルを増加させるにしたがい、アンカーボルトの残留伸びが増加する様子が確認された。ベースプレートや無収縮モルタルについては、鷹取 100%の加振まで特に顕著な損傷は確認されていない。なお、今回の実験では、新しい加振を実施する際もアンカーボルトの残留伸びが生じたままの状態、ナットを締めせずに行っている。またナットは、ダブルナットとしているが、ナットの緩みの有無を確認するためアンカーボルトの余長を各加振毎に計測しており、ナットの緩みが生じていないことを確認している。

表 5.5 に損傷観察時に計測したアンカーボルトの残留伸びの一覧を示す。表中には、1 階の層間変形角の正側および負側の最大応答値の他に、①通り、②通りおよび③通りの柱脚回転角の正側および負側の最大応答値も示している。柱脚の回転角の正方向は、層間変形角の正方向と一致させている。表中の CB3, CB2, CB1 は、それぞれ①通り、②通りおよび③通りの柱脚を表している。アンカーボルトの伸びは、各柱脚における 4 本全てについて計測したが、表中には、加振直交方向の 2 本の平均値として示しており、各柱脚について、①通り側と③通り側のアンカーボルトの計測値を区別して示している (図 5.19 参照)。鷹取波加振後のアンカーボルトの残留伸びには、変化が無かったため省略をしている。

南海 100%-1 の加振時には、層間変形角応答は、正側で大きい値を取っており、アンカーボルトの残留伸びは、①通り側では 0.8~1.9 mm となり、③通り側で 2.3~3.2 mm となり、③通り側のアンカーボルトで大きい残留のびが生じている。鷹取波の加振では、層間変形角応答は、負側で大きい値を取っており、アンカーボルトの残留伸びは、①通り側の方が③通り側よりも大きい値を取っている。

図 5.20 に各柱脚について、柱脚回転角の正側の最大応答値と③通り側アンカーボルトの残留伸び、柱脚回転角の負側の最大応答値と①通り側のアンカーボルトの残留伸びの関係を示す。図中に示す実線は、試みとして鋼管幅 (350mm) に柱脚回転角を乗じることで評価したアンカーボルトの残留回転角である。

図 5.21 には、代表的な柱脚の損傷状況写真を示している。

表 5.5 アンカーボルトの残留伸び

加振ケース	正側応答				負側応答				アンカーボルトの伸び					
	層間変形角		柱脚回転角		層間変形角		柱脚回転角		③軸側ボルト			①軸側側ボルト		
	$\theta_{max}$	$\theta_{cb3}$	$\theta_{cb3}$	$\theta_{cb3}$	$\theta_{min}$	$\theta_{cb3}$	$\theta_{cb3}$	$\theta_{cb3}$	CB3	CB2	CB1	CB3	CB2	CB1
	rad								mm					
南海100-1	0.013	0.012	0.010	0.009	-0.010	-0.006	-0.007	-0.008	3.2	2.8	2.3	0.8	1.3	1.9
鷹取40	0.011	0.011	0.010	0.008	-0.015	-0.011	-0.012	-0.014	3.1	2.5	2.1	2.6	3.6	3.8
鷹取60	0.017	0.017	0.016	0.014	-0.028	-0.023	-0.026	-0.027	5.8	4.8	3.8	7.5	8.9	10.1
鷹取80	0.027	0.026	0.026	0.023	-0.031	-0.026	-0.030	-0.030	9.8	8.8	7.9	8.8	11.0	11.5
鷹取100	0.062	0.058	0.064	0.055	-0.076	-0.063	-0.078	-0.067	24.0	24.5	20.3	23.5	26.8	26.0

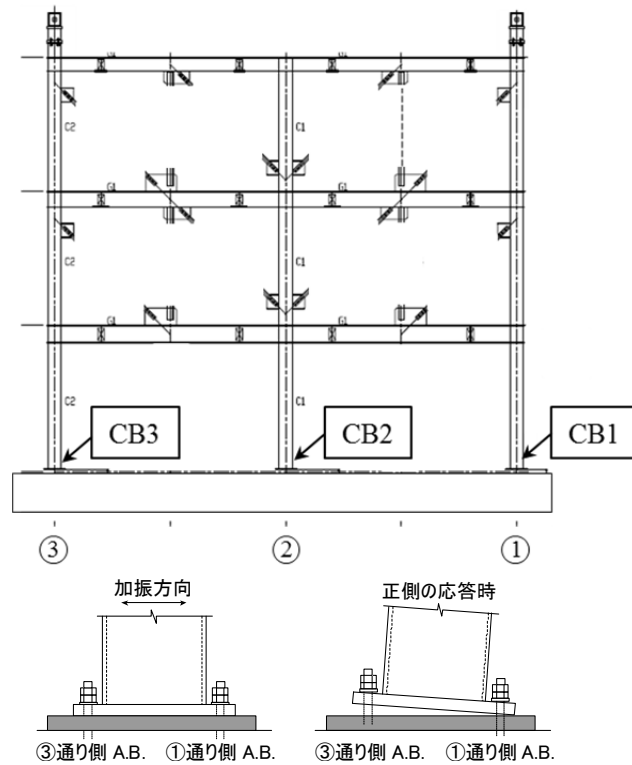
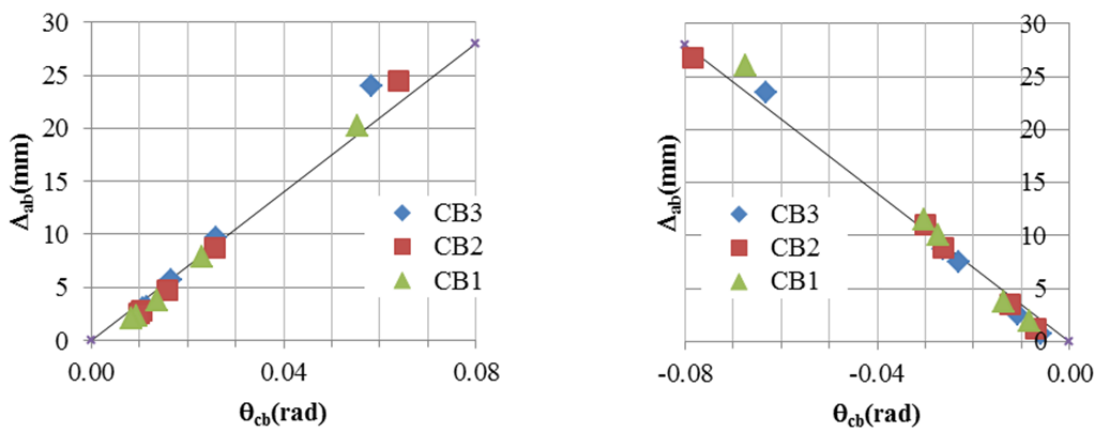


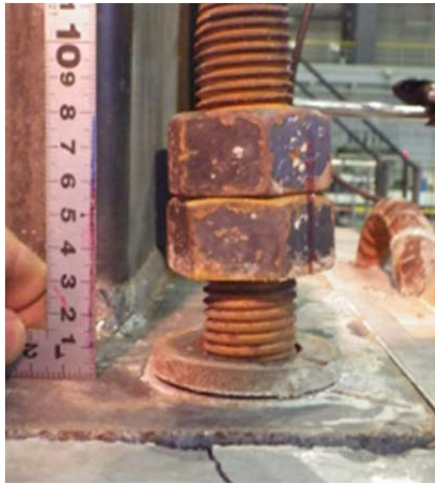
図 5.19 柱脚およびアンカーボルト名称



(a) ③通り側 A.B.

(b) ①通り側 A.B.

図 5.20 柱脚回転角最大値とアンカーボルトの残留伸びの関係



(a)



(b)

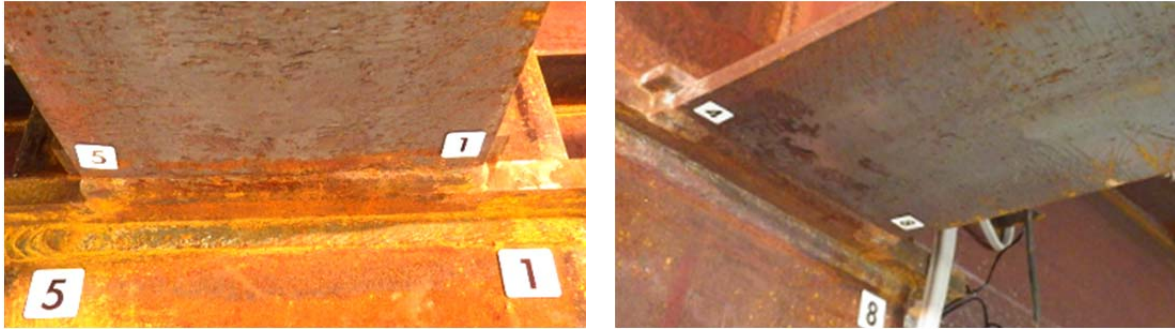


(c)

図 5.21 鷹取 100%加振時の柱脚の損傷状況

### iii) 柱梁接合部

柱梁接合部については、南海 100%-1 の加振時点では、損傷は確認されておらず、鷹取 40%加振時に 2 階および 3 階の側柱に取付く梁の端部の下フランジにおいて、ミルスケールの剥離が確認された。鷹取 60%加振時には、2 階および 3 階の中柱に取付く梁端部の下フランジでもミルスケールの剥離が確認された(図 5.22 参照)。



(a) 2 階①側柱梁接合部

(b) 2 階③側柱梁接合部

図 5.22 2 階側柱接合部の梁下フランジのミルスケールの剥離(鷹取 60%)

鷹取 80%の加振で損傷が見られたカ所および損傷モードを図 5.23 に整理して示す。2 階の①および③側柱に取付く梁の下フランジ側スカラップ底で開口幅 1.5 および 2.1mm の亀裂が確認されており、下フランジの外側からもスカラップ底位置で、若干、母材がくびれている様子も確認された(図 5.24 参照)。また、同梁フランジにおいて、軽微な局部座屈が確認されている(図 5.25 参照)。

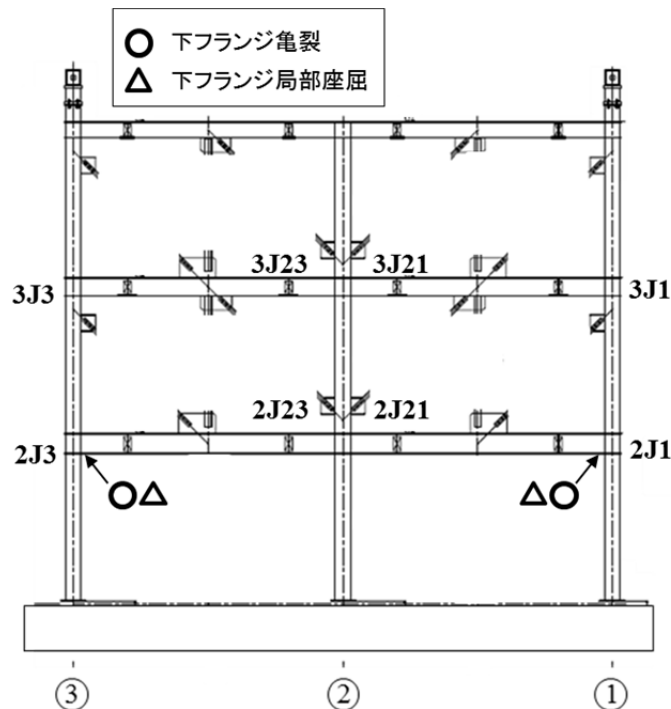


図 5.23 柱梁接合部および梁端部の損傷状況(鷹取 80%)

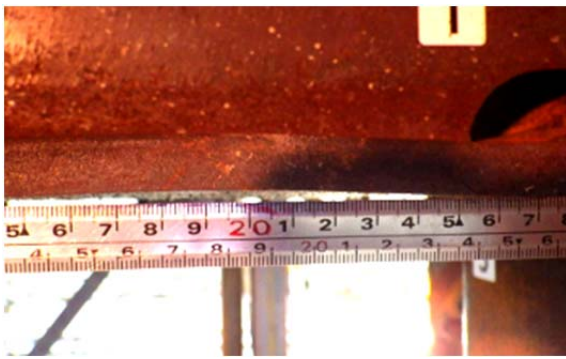


(a) 下フランジスカラップ底の亀裂



(b) 下フランジスカラップ底での母材くびれ

図 5.24 2階①側柱梁接合部の梁下フランジの損傷状況(鷹取 80%)



(a) 2階①側柱梁接合部



(b) 2階③側柱梁接合部

図 5.25 梁下フランジの局部座屈(鷹取 80%)



鷹取 100%加振時の損傷カ所と損傷モードを図 5.26 に整理して示す。2 階の①および③側柱と 3 階の③側柱に取付く梁の下フランジでスカラップ底を起点とする延性破断が確認された他、3 階の①側柱に取付く梁の下フランジにはスカラップ底を起点とするフランジ幅方向の長さ 70 mm 弱の亀裂も確認された。また 2 階および 3 階の中柱梁接合部の両側でスカラップ底に軽微な亀裂を確認した(図 5.27)。

下フランジが破断した接合部では、梁ウェブの隅肉溶接の亀裂も確認されており、2 階の梁では、概ね鉄骨梁の図心まで、3 階の梁では、溶接端から 45 mm 程度まで亀裂が進展していた(図 5.28)。

また、2 階および 3 階の①および③側柱に取付く梁の端部では、梁の下フランジに顕著な局部座屈も確認された(図 5.29)。実験中の柱梁接合部近傍を撮影したビデオ映像によると、2 階の①側柱に取付く梁では、正曲げ時に梁下フランジの破断が生じた後に、正曲げに転じた際に、破断面が接触した後に、局部座屈が進展したが、③側柱に取付く梁の場合、負曲げ時に梁下フランジの局部座屈が先行したが、正曲げに転じた際に、局部座屈が伸張しながら、スカラップ底の亀裂が進展し、破断に至る様子が確認された。合成梁の場合は、上フランジの局部座屈がスラブにより拘束されるため、負曲げ時に局部座屈が卓越した場合でも、最終的な破壊モードが破断によって決定される場合があることが指摘できる。

南海 50%-2 の加振では、特に損傷進展は確認されておらず、南海 150%の加振において、3 階の③側柱に取付く梁の下フランジの亀裂が 90 mm に進展していた。加振中の接合部のビデオ映像によると、南海 100%-2 においても、わずかに亀裂が進展している様子が確認された。

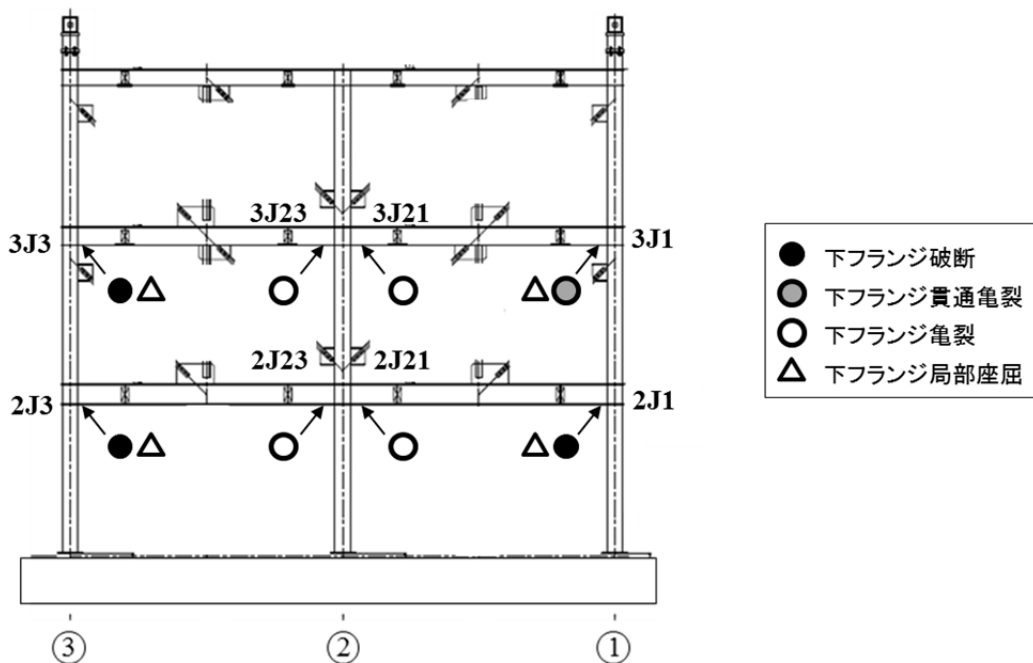


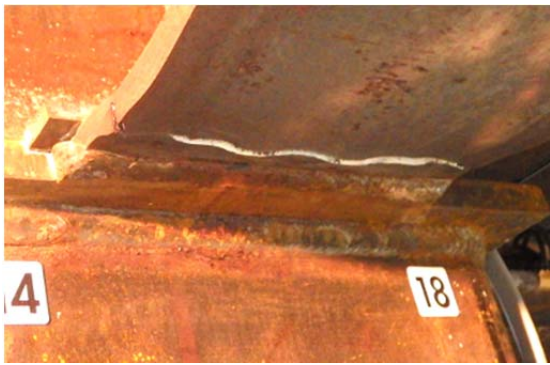
図 5.25 柱梁接合部および梁端部の損傷状況(鷹取 100%)



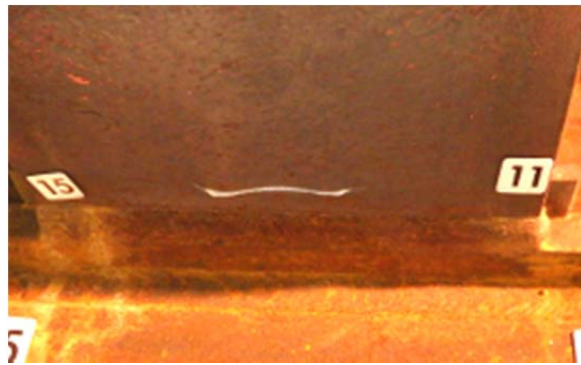
(a) 2階①側柱梁接合部



(b) 2階③側柱梁接合部



(c) 3階③側柱梁接合部



(d) 3階①側柱梁接合部



(e) 2階中柱梁接合部



(f) 3階中柱梁接合部

図 5.27 柱梁接合部における梁下フランジの破断(鷹取 100%)

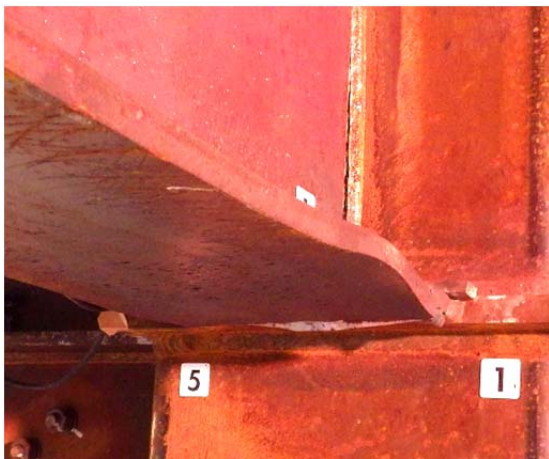


(a) 2階①側柱梁接合部



(b) 2階③側柱梁接合部

図 5.28 梁ウェブ隅肉溶接の亀裂(鷹取 100%)



(a) 2階①側柱梁接合部



(b) 3階①側柱梁接合部

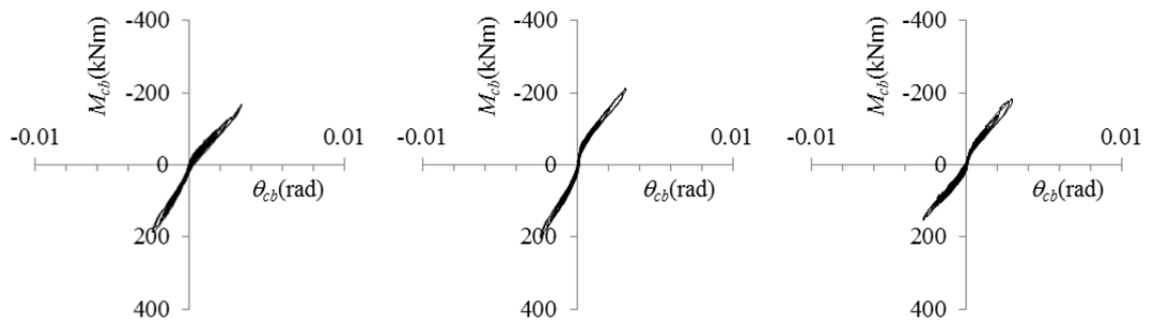
図 5.29 梁下フランジの局部座屈(鷹取 100%)

### 5.3.4 各部挙動

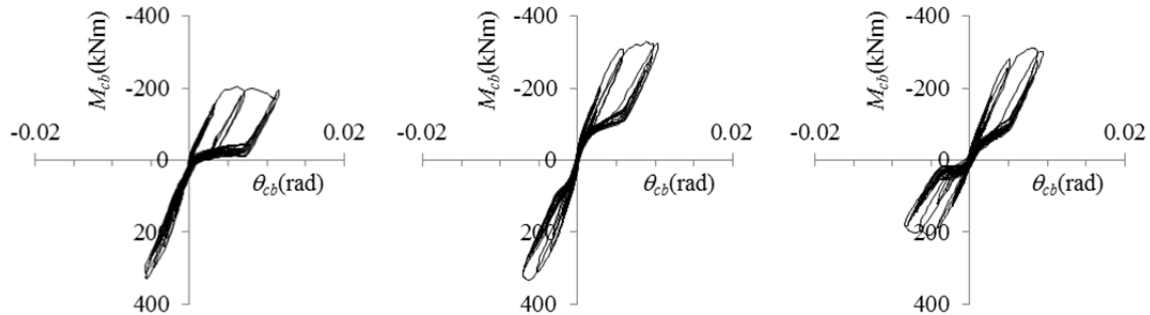
#### i) 柱脚挙動

図 5.30 に南海 50%-1 および南海 100%-1 の加振ケースの柱脚モーメント( $M_{cb}$ )と柱脚回転角( $\theta_{cb}$ )の関係を示す。図 5.31 に柱脚モーメントと柱脚回転角の正方向の定義を示す。柱脚回転角については、層間変形角の正方向と整合するように①通り側に柱が回転する向きを正としたが、柱脚モーメントについては、部材の曲げモーメントの正規約との整合性を優先した関係で、柱脚回転角の正方向と整合しない定義となっている点を断っておく。

南海 50%-1 の加振ケースでは、柱脚は弾性挙動を示しており、アンカーボルトは降伏していない。復元力特性が S 字形の挙動を示しているのは、柱に生じている圧縮軸力の影響により、引張側のベースプレートがモルタルから離間するまでに回転剛性の高い領域が存在



(a) ③柱脚(南海 50%-1)      (b) ②柱脚(南海 50%-1)      (c) ①柱脚(南海 50%-1)



(d) ③柱脚(南海 50%-1)      (e) ②柱脚(南海 50%-1)      (f) ①柱脚(南海 50%-1)

図 5.30 柱脚モーメント-柱脚回転角関係(想定南海トラフ波加振 - 1 回目)

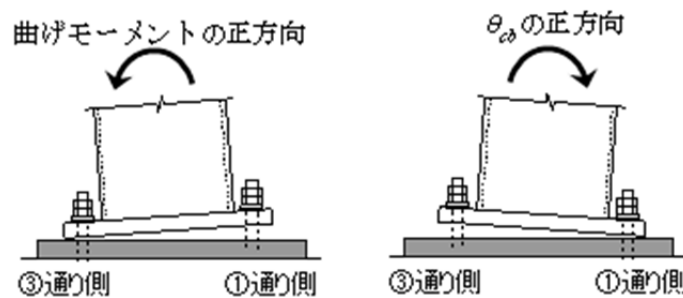


図 5.31 柱脚モーメントおよび柱脚回転角の正方向

在することによる。

南海 100%-1 の加振時には、柱脚回転角が正となる側で(即ち、層間変形角が正となる側)で負側よりも大きな回転が生じ、柱脚が塑性化し、スリップ型の復元力特性を示している。この加振ケースの 1 階の層せん断力 - 層間変形角関係において、正側に若干塑性変形が生じていたが、この柱脚の塑性化に起因するものと考えられる。この加振時に生じた各柱脚の最大回転角は、 $0.009\sim 0.012\text{rad}$  で概ね等しく、1 階の層間変形角の最大応答値である  $0.013\text{rad}$  とほぼ一致している。正の柱脚回転角が生じる際は、③通りの柱脚の耐力が他の柱脚を下回っており、負の柱脚回転角が生じる際には、①通りの柱脚の耐力が他の柱脚を下回っている。これは、骨組に生じる転倒モーメントの影響により、正の層間変形角が生じる際には、③通りの柱軸力が減少し、負の層間変形角が生じる際には、①通りの柱軸力が減少する影響である。

図 5.32 に鷹取波による各加振の柱脚モーメント - 柱脚回転角関係を示す。今回の実験では、各加振毎でのアンカーボルトの追締めを行わず、アンカーボルトの残留伸びが蓄積する形としているため、加振レベルが増大するにつれて、柱脚挙動においてスリップ領域が増加していることが分かる。いずれの加振ケースにおいても、最大応答が生じるサイクルでしか柱脚の塑性化が見られず、南海 100%-1 の加振ケースとは、挙動が異なっていることを指摘しておく。

鷹取 100%の加振ケースのグラフには、鷹取 40%から鷹取 80%の加振ケースの挙動を灰色の線で併せて示している。図より、過去に経験した最大応答を超えるまでスリップ挙動を示していることが確認できる。

図 5.33 に南海 150%の加振ケースの柱脚モーメント - 柱脚回転角関係を示す。南海 150%加振では、鷹取 100%加振時の柱脚の最大回転角を上回る応答が生じていないため、加振中に渡ってスリップ挙動のみを示しており、柱脚はピン接合に近い状態であると見なすことが出来る。

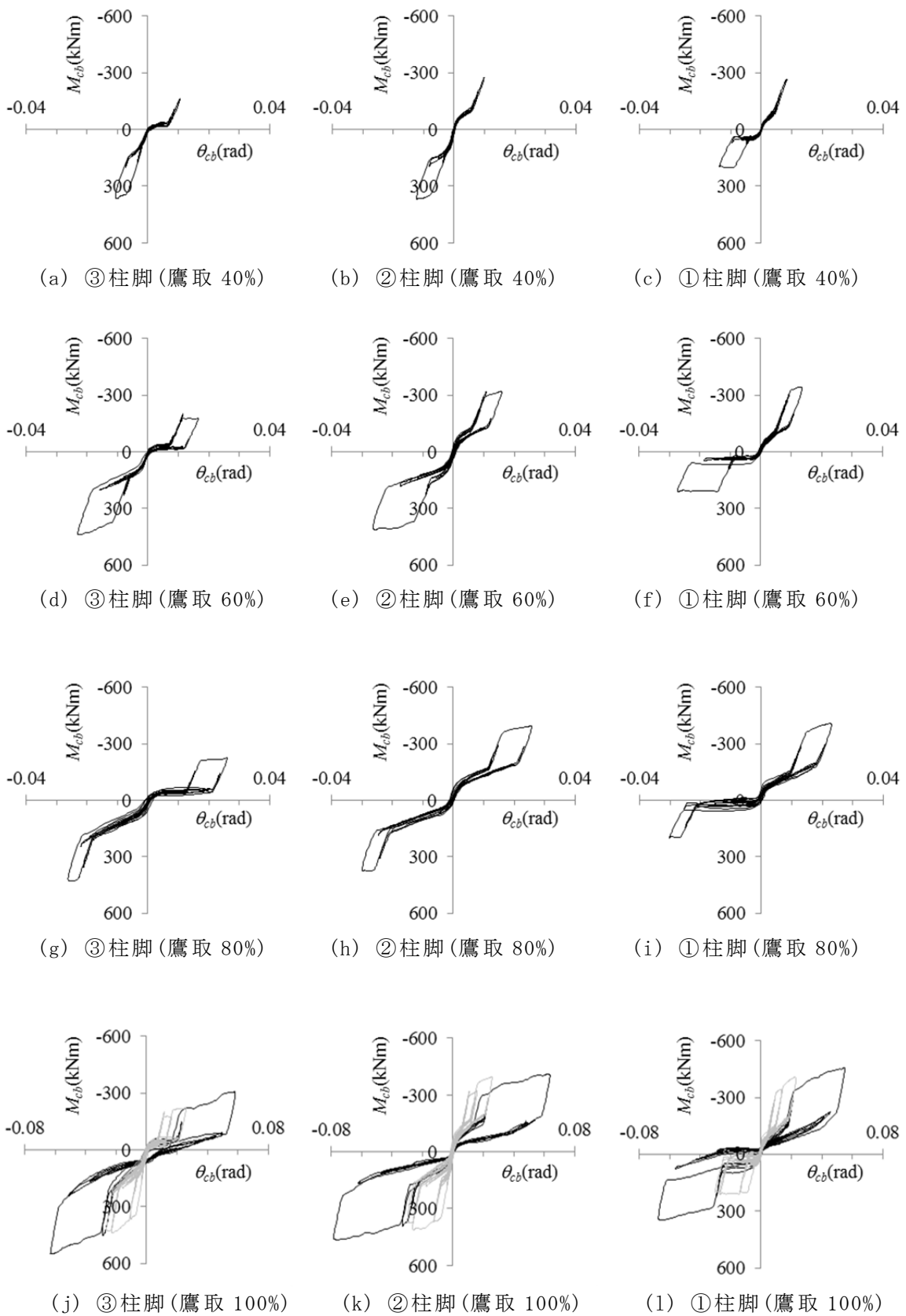


図 5.32 柱脚モーメント-柱脚回転角関係(鷹取波加振)

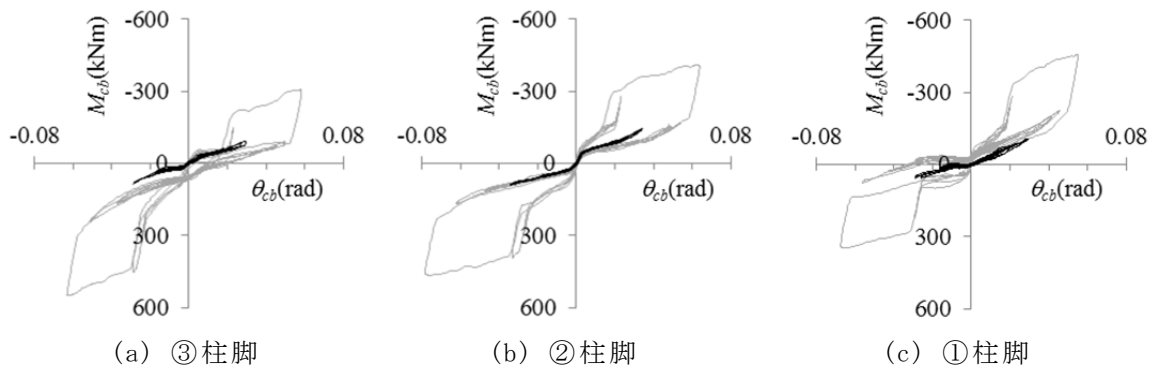


図 5.33 柱脚モーメント-柱脚回転角関係(南海 150%)

ii) 梁の曲げ挙動

図 5.34 に南海 50%-1 および南海 100%-1 の 2 階床梁の梁端曲げモーメント ( $M_b$ ) - 梁端回転角 ( $\theta_b$ ) 関係を併せて示す。曲げモーメントおよび梁端回転角は、梁の下フランジが引張となり、床スラブが圧縮を受ける場合を正としている。南海 50%-1 の場合の応答は、梁についても弾性範囲内である。南海 100%-2 の場合は、わずかな塑性化が生じているが概ね弾性挙動である。

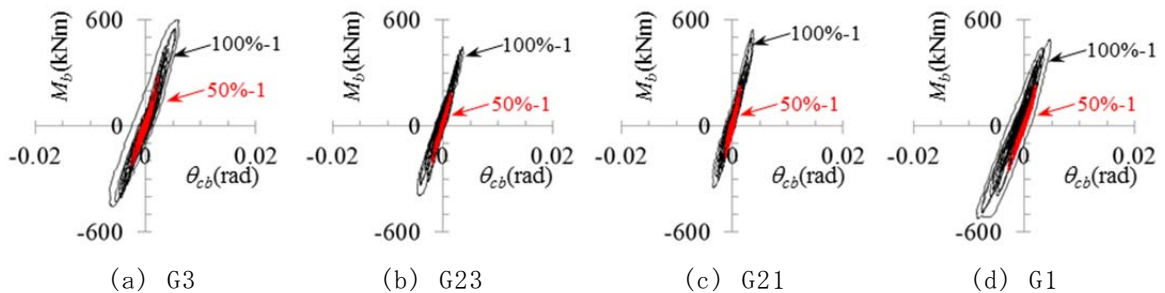


図 5.34 梁端モーメント - 梁端回転角関係(想定南海トラフ波 - 1)

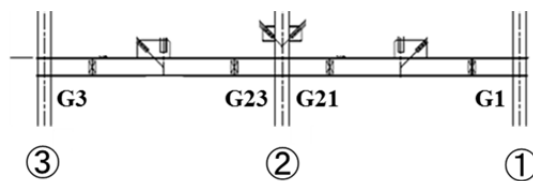
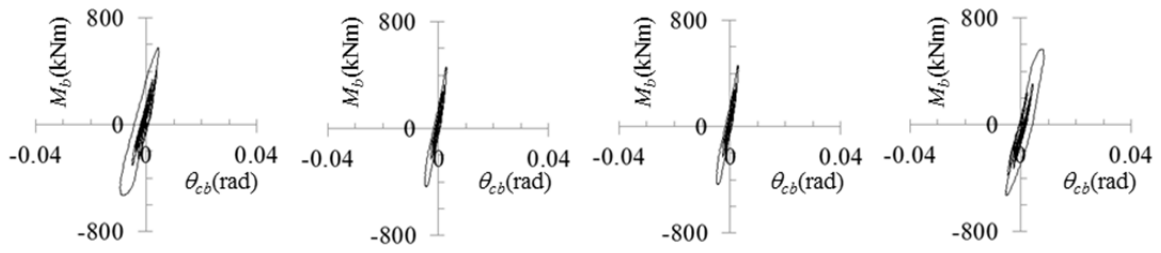


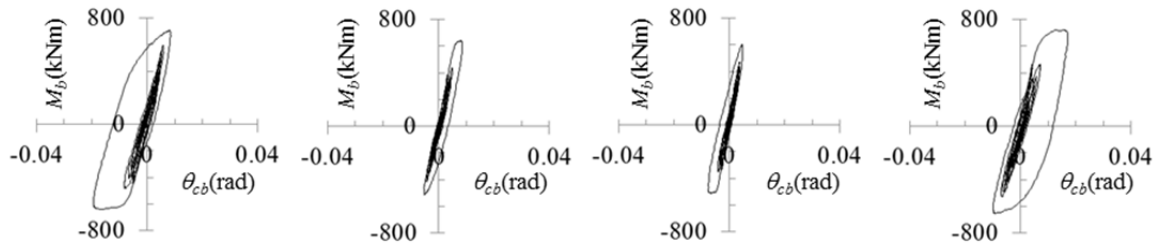
図 5.35 梁名称

図 5.36 に鷹取波による各加振の 2 階床梁の梁端曲げモーメント - 梁端回転角関係を示す。柱脚挙動と同様に入力レベルが 60% までは、最大応答が生じる 1 サイクルで塑性化が生じている。鷹取 80% の場合は、側柱に取付く G3 と G1 で複数サイクルの塑性変形が見られるが、中柱に取付く G23 および G21 の場合は、殆ど塑性変形が認められず、鷹取 60% の場合と同程度の振幅の変形しか生じていない。鷹取 100% では、側柱に取付く G3 と G1 で、正側

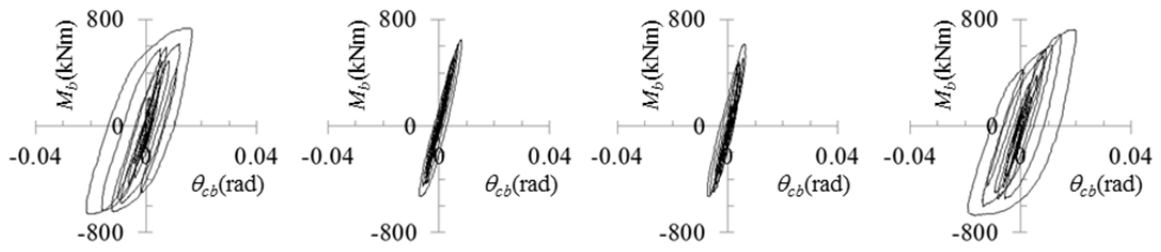
の応答では、延性亀裂の進展により、負側の応答では、局部座屈の進展により、曲げモー



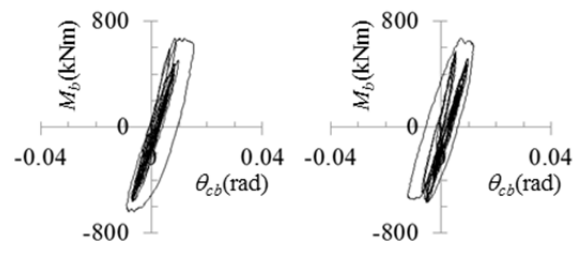
(a) G3(鷹取 40%) (b) G23(鷹取 40%) (c) G21(鷹取 40%) (d) G1(鷹取 40%)



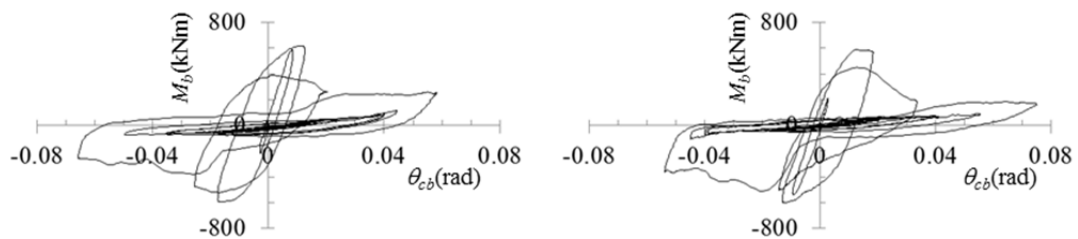
(e) G3(鷹取 60%) (f) G23(鷹取 60%) (g) G21(鷹取 60%) (h) G1(鷹取 60%)



(i) G3(鷹取 80%) (j) G23(鷹取 80%) (k) G21(鷹取 80%) (l) G1(鷹取 80%)



(m) G23(鷹取 100%) (n) G21(鷹取 100%)



(o) G3(鷹取 100%) (p) G1(鷹取 100%)

図 5.36 梁端モーメント - 梁端回転角関係



メントが減少し、梁端回転角の最大応答値は、0.075radに達している。最大応答が生じた以降の挙動では、梁端回転角の振幅が0.04rad程度の応答が生じても曲げモーメントの値が極めて小さい状態で、ピン接合と見なせる状態で挙動している。

図5.37に南海150%の加振ケースの側柱に取付く2階床梁(G3, G1)の梁端曲げモーメント - 梁端回転角関係を示す。図中には、鷹取100%の結果を灰色の線で合わせて示している。図より、南海150%の加振時には、梁下フランジに破断が生じたG3およびG1では、ピン接合に近い挙動を示していたことが分かる。

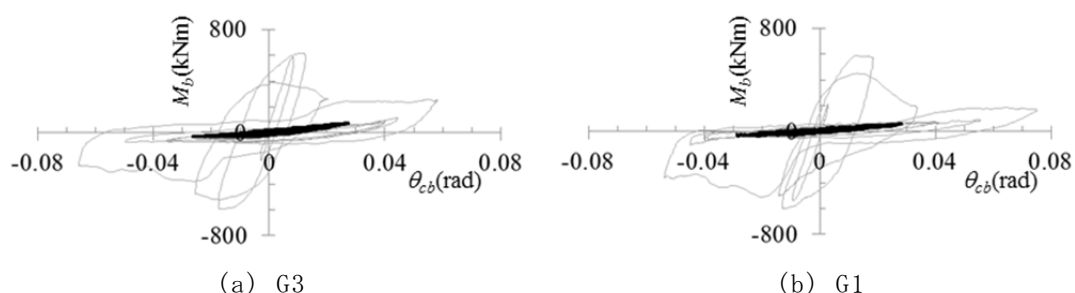


図 5.37 梁端モーメント - 梁端回転角関係(南海 150%)

#### iv) 接合部パネルの挙動

②通り中柱の2階および3階の接合部パネルに貼付した3軸塑性ゲージより接合部パネルのせん断歪を得た。図5.38および図5.39にそれぞれ、鷹取波による各加振の2階および3階接合部のパネルモーメントとパネルせん断歪の関係を示す。合成梁の場合のパネルモーメントを評価する際のパネル体積は、スラブ領域を考慮せず、鉄骨梁のフランジ中心間距離で評価している。図中に示すバイリニアの線は、通常のスラブの影響を考慮していない剛性および耐力計算値と、2%の歪硬化を仮定した計算結果である。剛性については、計算値と良い対応を示している。

基本的に3階接合部よりも、2階接合部の方が、大きいせん断歪応答が生じており、3階接合部パネルについては、鷹取80%の加振ケースまで塑性化は殆ど生じていない。一方、2階接合部パネルについては、鷹取60%の加振ケースから顕著な塑性化が生じている。なお、鷹取100%の加振ケースの2階接合部パネルの歪ゲージは、加振中に歪ゲージの剥離が生じていたと判断され、加振の途中までのデータしか含まれていない。鷹取100%の加振ケースでは、過去の加振ケースと比較して、3階接合部パネルのせん断歪応答が急激に増加している。2階床梁の柱梁接合部の破断が影響している可能性が指摘できる。

2階および3階の中柱に取付く梁の応答が、側柱に取付く梁よりも小さく、梁が破断に至らなかったのは、中柱の接合部挙動が、接合部パネルのせん断挙動が支配的で、梁端に生じる曲げモーメントが制限されたことによると判断できる。

バイリニアの計算結果による降伏耐力以後の挙動は、鷹取波100%加振ケースの2階接合部については、実験結果と良い対応を示しているが、それ以外のケースでは、過小評価する傾向が見られる。これには、スラブによる合成効果の影響があると考えられ、柱近傍のス

ラブの支圧破壊が進行すると，合成効果が消失し，スラブの影響を考慮しないモデルで挙動を評価可能と考えられる．

図 5.40 に想定南海トラフ波加振ケースの 2 階接合部のパネルモーメント-パネルせん断歪関係を示す．南海 100%-2 のせん断歪応答は，南海 100%-1 に比べ若干増加している．

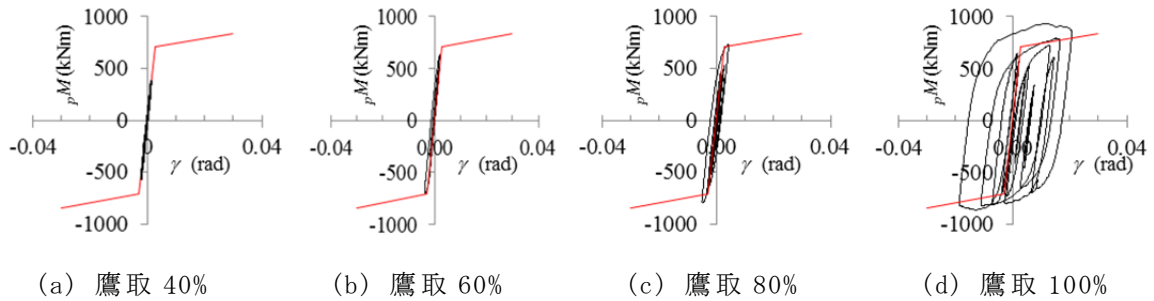


図 5.38 パネルモーメント-パネルせん断歪関係(3階接合部)

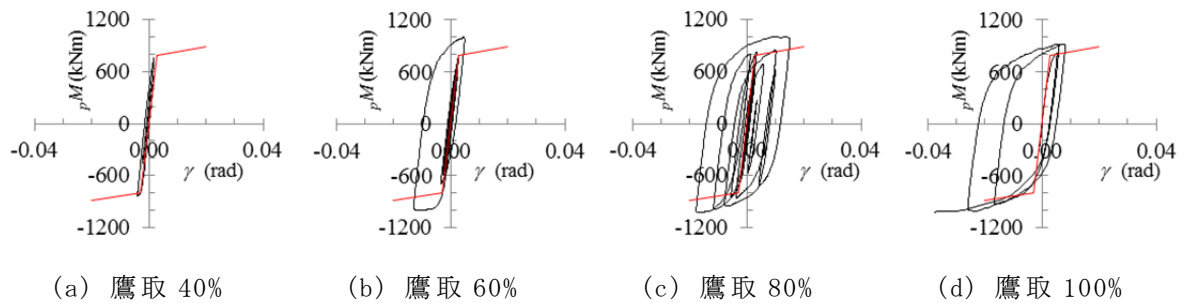


図 5.39 パネルモーメント-パネルせん断歪関係(2階接合部)

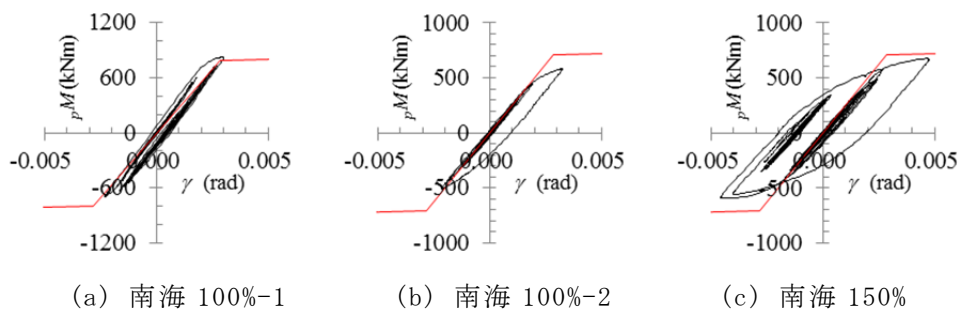


図 5.40 パネルモーメント-パネルせん断歪関係(想定南海トラフ加振 3階接合部)

## 5.4 考察

### 5.4.1 骨組全体挙動

図 5.1 に各加振ケースにおける最大ベースシア係数を示し、図 5.2 に最大層間変形角応答を示す。また、図 5.3 に累積残留層間変形角を示す。図 5.1 より、想定南海トラフ波 100% と鷹取波 40%のベースシア係数が 0.5 程度となっており、概ね 2 次設計時の地震力が作用したと判断できる。図 5.2 より、鷹取波 100%加振時に最大層間変形角応答が急激に増加しているが、これは、梁端溶接接合部の破断による影響と考えられる。

図 5.3 に示すようにいずれの加振ケースにおいても累積残留変形角は小さく、最大累積残留変形角は鷹取波 100%加振時の 3 層で生じた 1/500rad で、兵庫県南部地震で梁端溶接接合部に破断が生じた建物で残留傾斜角が小さかったことと対応している。

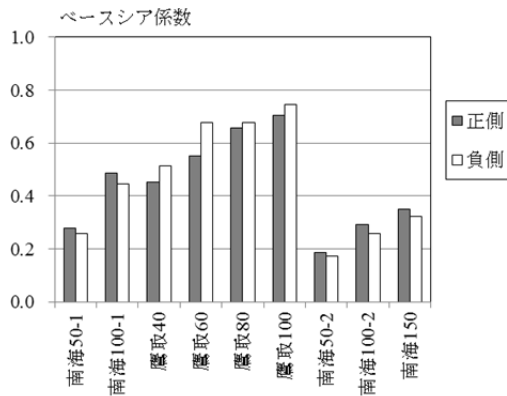


図 5.1 最大ベースシア係数

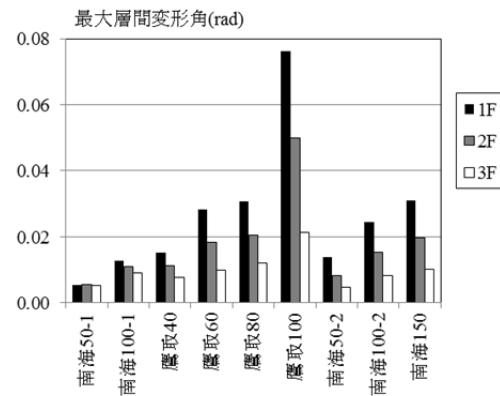


図 5.2 最大層間変形角応答

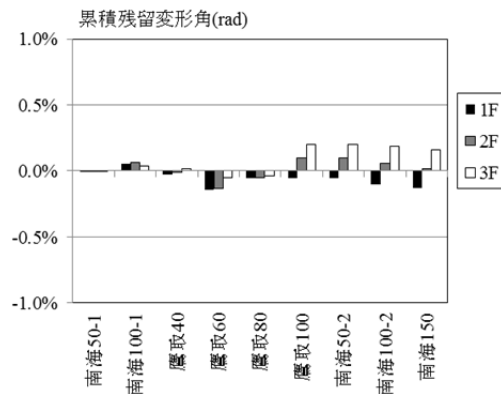
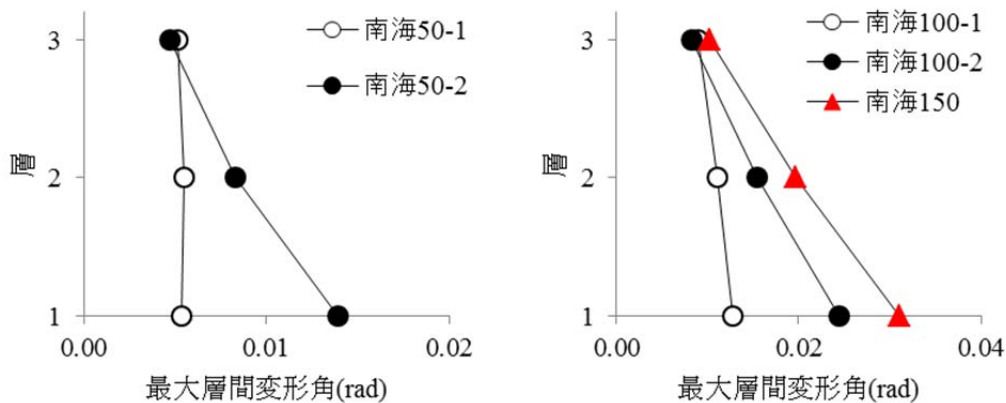
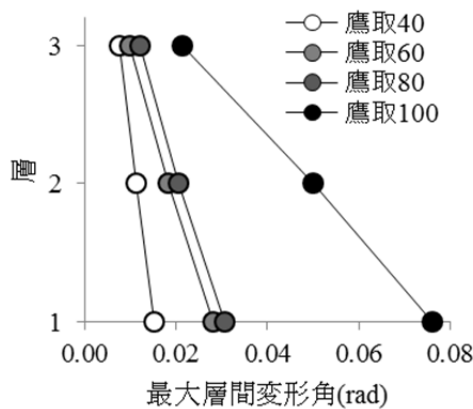


図 5.3 累積残留変形角

図 5.4 に最大層間変形角応答分布を示している。想定南海トラフ波 50%-1 では、各階の最大応答は概ね等しく、 $1/196 \sim 1/184 \text{rad}$  であるのに対し、想定南海トラフ波 50%-2 では、梁端溶接接合部の破断の影響により、1 層および 2 層の応答が、それぞれ 2.6 および 1.52 倍に増加した。想定南海トラフ波 100%-2 では、1 層の最大層間変形角応答は  $1/42 \text{rad}$  と梁端溶接接合部の破断前の 1.9 倍に達した。



(a) 想定南海トラフ波 50%-1 および 50%-2 (b) 想定南海トラフ波 100%-1, 100%2 および 150%



(c) 鷹取波 40%, 60%, 80% および 100%

図 5.4 最大層間変形角の高さ方向応答分布

#### 5.4.2 エネルギー吸収性状

図 5.5 に振動台の最大速度 (PGV) と加振により試験体への総エネルギー入力を示す。ここで、総エネルギー入力は、各階の層せん断力-層間変位関係の履歴面積を数値的に積分したものを全ての階の合計によりエネルギーの時刻歴における最大値としている。層せん断力に復元力の他に減衰力が含まれており、弾塑性ひずみエネルギーと減衰エネルギーの和に相当するものである。

同図より、想定南海トラフ波の場合は、梁端溶接接合部の破断前後で、PGV-VET 関係に

変化は見られず，概ね入力レベルの増加に比例的に地震動によりエネルギーが試験体に入力されている．鷹取波の場合でも鷹取波 80%までは，同様であるが，鷹取波 100%では，急激に入力エネルギーが増加している．これは，鷹取波の速度応答スペクトルで固有周期が 1.0s を上回るあたりから急激に増加する特性を有しており，鷹取波 100%加振では梁端溶接接合部が破断することで大きな層間変形角応答が生じることで，有効固有周期が増大したためである．

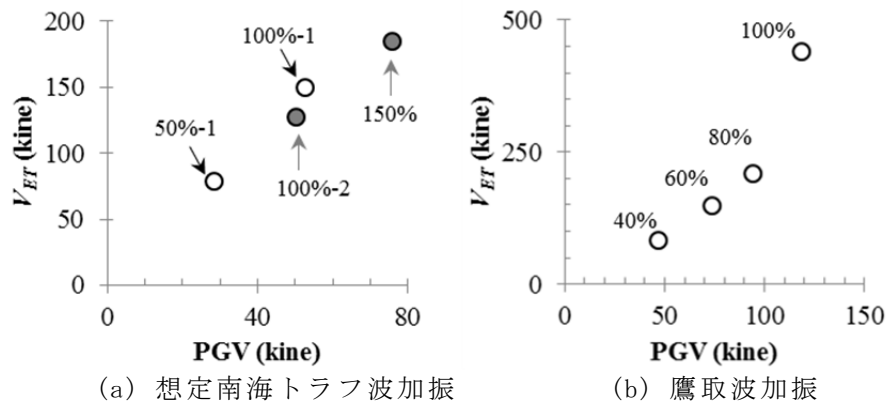


図 5.5 総エネルギー入力と加振レベルの関係

図 5.6 には，鷹取波 80%および 100%の場合の地震入力エネルギーの時刻歴を示している．同図中の▼印は，各梁端接合部のビデオ映像および梁端モーメント-梁部材角関係より同定した梁端溶接接合部に破断が生じた時点を表している．図より，鷹取波 100%加振における 2 階側柱の梁端溶接接合部の破断は，加振の早い段階で生じていることが分かる．これは，鷹取波 80%の際の梁端部の応答により，梁端部の残存塑性変形能力が減少していたためと考えられる．2 階の梁端溶接接合部で破断が生じた以後の方が大きいエネルギー入力になされており，梁端溶接接合部に他の部位でエネルギー吸収がなすことで，耐震安全性が発揮されたものと考えられる．

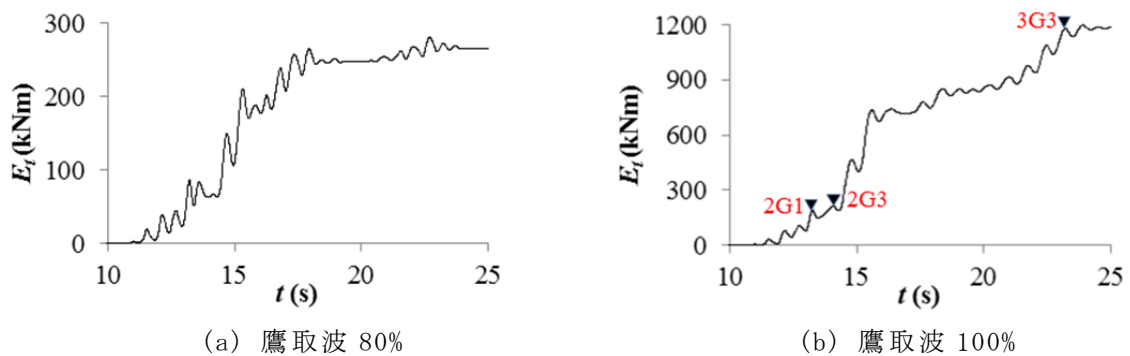


図 5.6 地震入力エネルギーの時刻歴応答

## 5.5 まとめ

兵庫県南部地震当時の仕様に基づく3層実大鉄骨造建物を想定した試験体を製作し、兵庫県南部地震の観測波と想定南海トラフ巨大地震波による加振実験を実施した。加振は、①健全な建物が想定南海トラフ巨大地震波を経験した場合の応答性状の把握、②段階的に地震動の入力レベルを変化させての兵庫県南部地震の被害状況の再現、③再現被災建物が想定南海トラフ波を経験する場合の応答性状の把握の3フェーズで実施した。いかに得られた知見を示す。

1. 本試験体では、損傷を受けていない状態で想定南海トラフ巨大地震動が作用した場合、概ね2次設計レベルの応答が生じる。主要構造部の損傷は軽微であった。最大層間変形角応答は、1層で1/70radであり、このレベルの応答が実際の建物に生じた場合は、外装材に軽微な損傷が生じると考えられる。
2. 兵庫県南部地震の観測波の加振で、実際の被害に対応する損傷が再現された。今回の加振プログラムでは、鷹取波80%の加振により、梁端部の残存塑性変形能力はかなり低下しており、鷹取波100%加振の早期に2階側柱の梁端溶接接合部で破断が生じた。しかし、その後も中柱の接合部パネルと3階側柱の梁端接合部でエネルギー吸収がなされることで、試験体が倒壊に至らなかったと考えられる。すなわち、耐震規定を上回る地震動に対しても冗長的に耐震安全性を発揮する機構が存在していると考えられる。
3. 梁端溶接接合部の全体の1/3が破断もしくは、大きい亀裂が生じている状態で、想定南海トラフ巨大地震が入力されても、試験体は倒壊に至ることはなかった。これは、前述の耐震安全冗長性によると言える。しかし、最大層間変形角応答は、健全試験体の2倍程度となり、外装材等の損傷進展に伴う補修や、場合によっては落下等による危険性が考えられる。大地震発生後には、損傷状況調査により、損傷状況を適切に把握し、必要に応じて適切に補修・補強を行う必要性があり、そのための新たな技術を開発する必要性は高いと言える。

## 第6章 梁端接合部の破断を考慮した地震応答解析

### 6.1 解析概要

梁端接合部の破断が建物の耐震性に及ぼす影響を予測するための解析手法の構築を行う。

図6.1に梁のモデル化を示す。梁端の破断は、低サイクル疲労モデルを用いる。

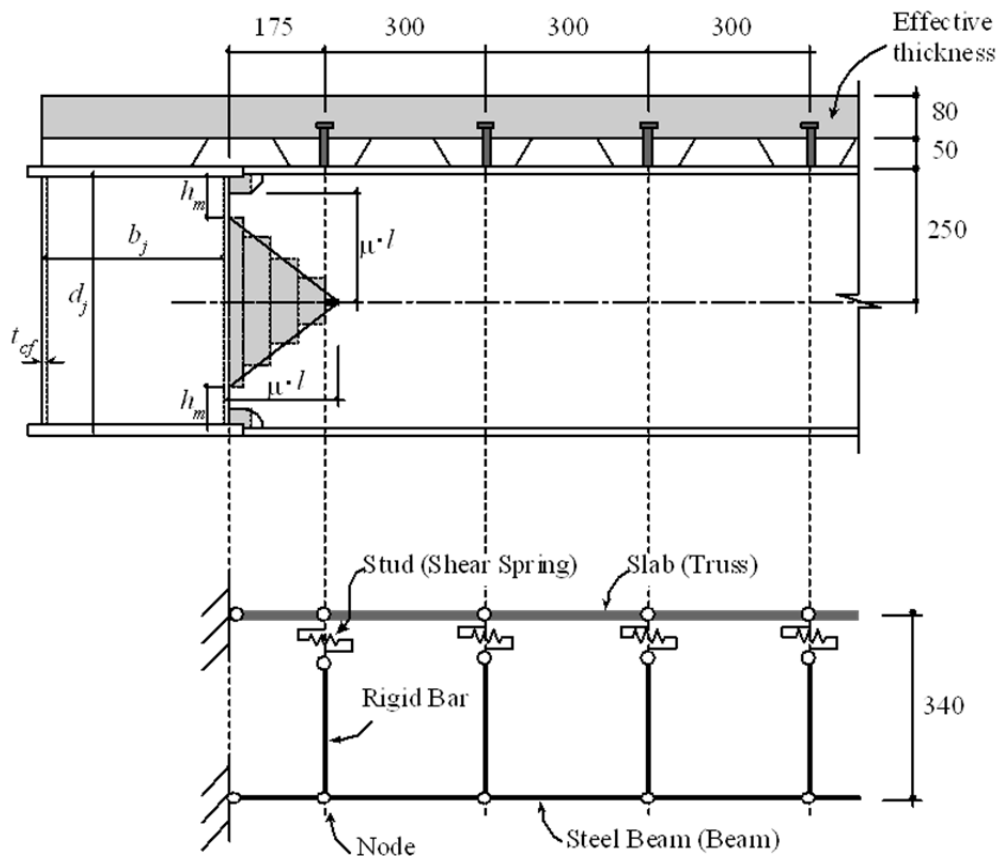


図 6.1 梁のモデル化

柱脚のモデル化は、図6.2に従い露出柱脚のスリップ挙動を考慮した。

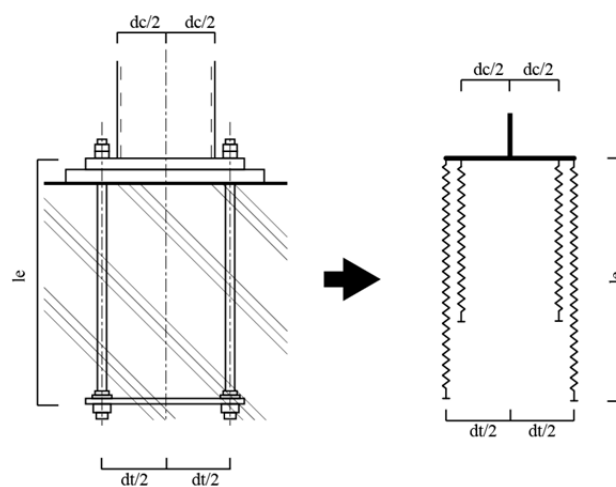


図 6.2 柱脚のモデル化

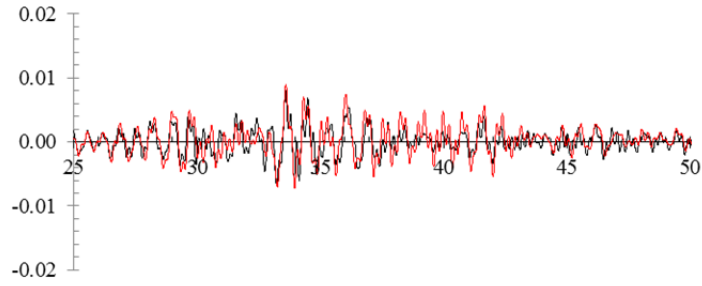
地震動入力は、実験の加振プログラムに従い実施しており、各地震動入力の中に自由振動の解析を実施し、十分に振動を減衰させた状態で、次の地震動入力を実施している。

## 6.2 解析結果

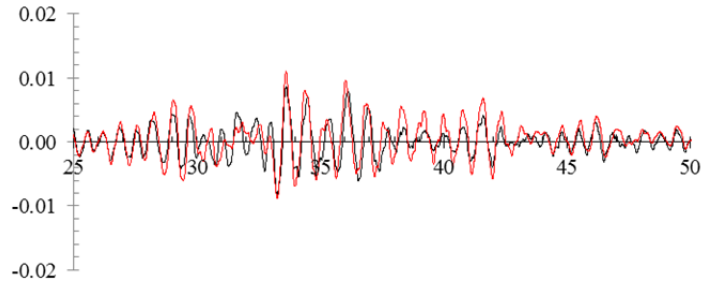
図 6.3～6.12 に実験結果と解析結果の比較を示す。図 6.3 および 6.4 に想定南海トラフ波 100%-1 を、図 6.5 および 6.6 に鷹取波 60%の結果を、図 6.7 および 6.8 に鷹取波 80%の結果を、図 6.9 および 6.10 に鷹取波 100%の結果を、図 6.11 および 6.12 には、想定南海トラフ波 100%-2 を示している。

いずれの加振ケースにおいても、本解析結果と実験結果は非常に良い対応を示している。特に鷹取波 100%の場合においては、梁端溶接接合部の破断により、破断前に比べて剛性および耐力が低下するが、この破断の影響についても良い対応を示している。また、再現被災状態で再加振を実施している想定南海トラフ波 100%-2 においても良い対応関係を示している。

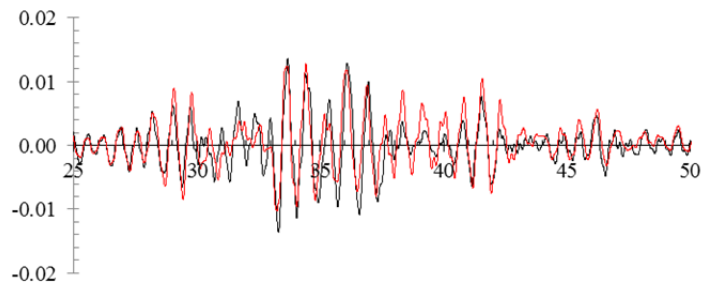




(a) 3層

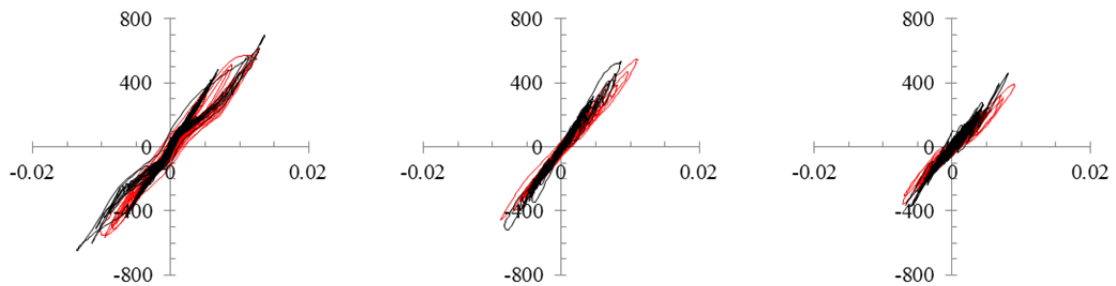


(b) 2層



(c) 1層

図 6.3 層間変形角時刻歴応答(想定南海トラフ波 100%-1)

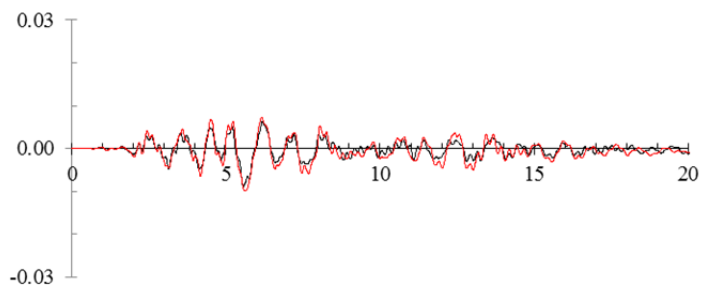


(a) 1層

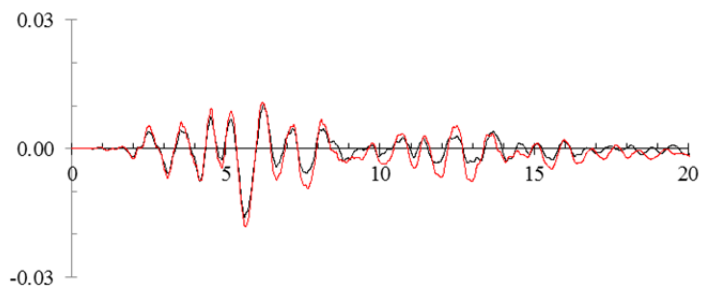
(b) 2層

(c) 3層

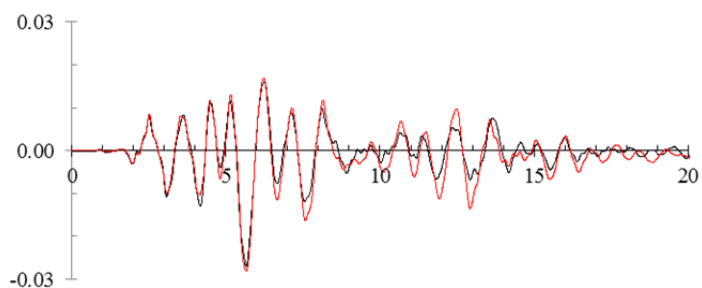
図 6.4 層間変形角時刻歴応答(想定南海トラフ波 100%-1)



(a) 3層

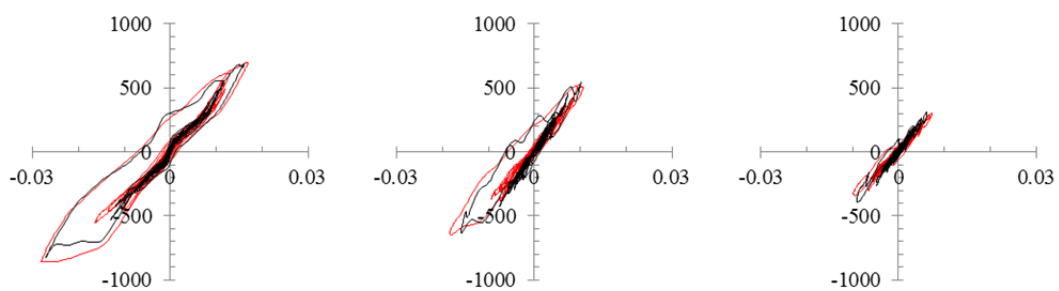


(b) 2層



(c) 1層

図 6.5 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 60%)

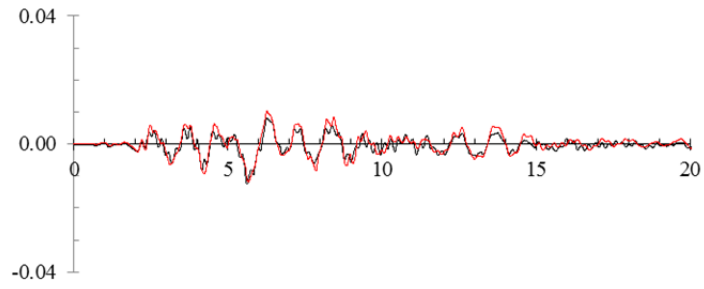


(a) 1層

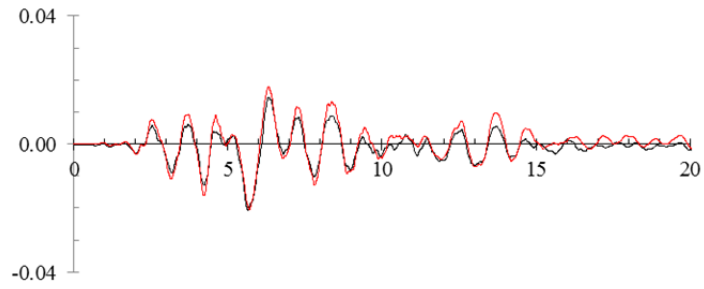
(b) 2層

(c) 3層

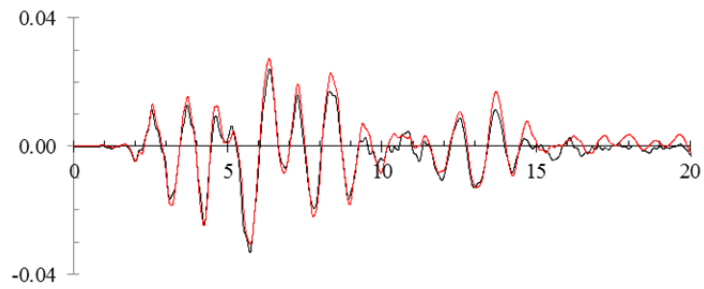
図 6.6 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 60%)



(a) 3層

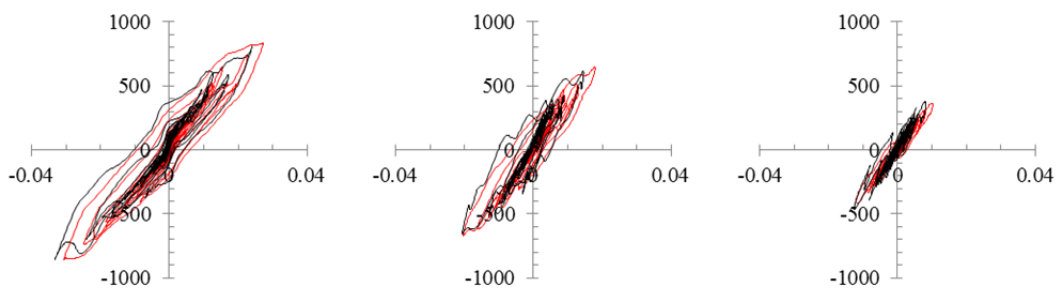


(b) 2層



(c) 1層

図 6.7 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 80%)

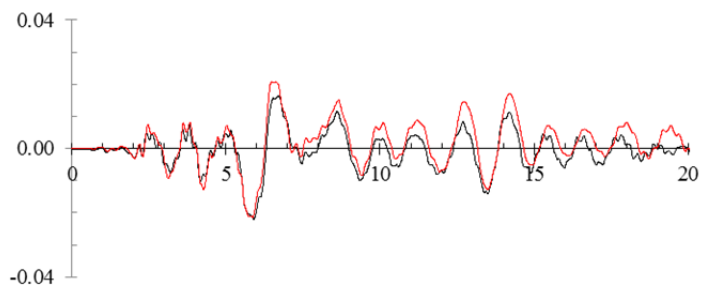


(a) 1層

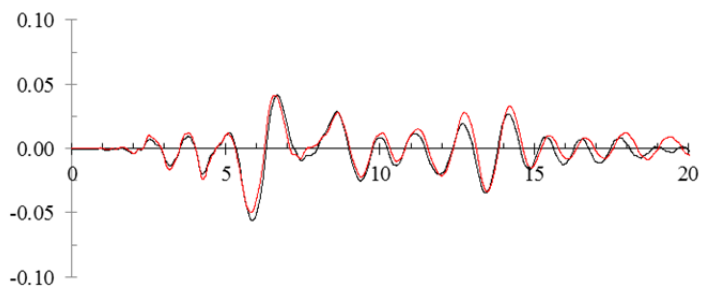
(b) 2層

(c) 3層

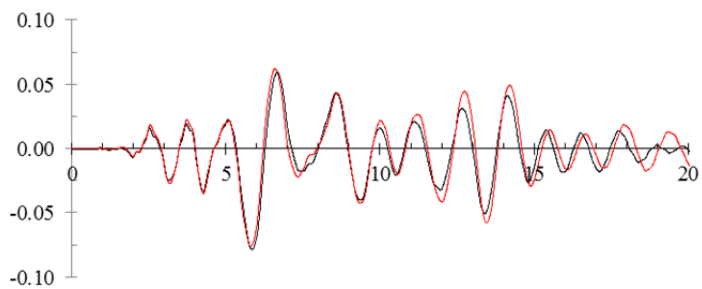
図 6.8 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 80%)



(a) 3層

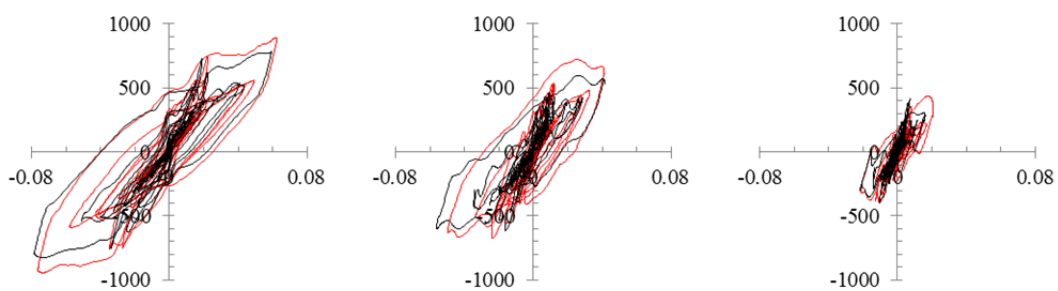


(b) 2層



(c) 1層

図 6.9 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 100%)

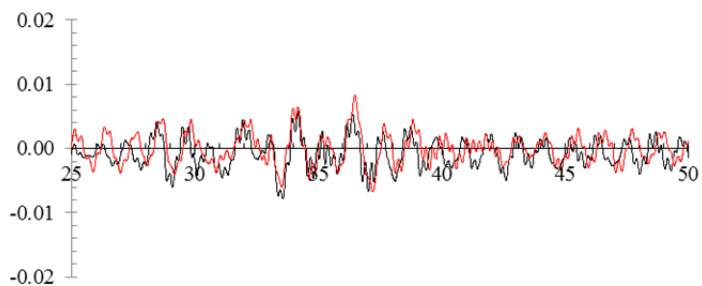


(a) 1層

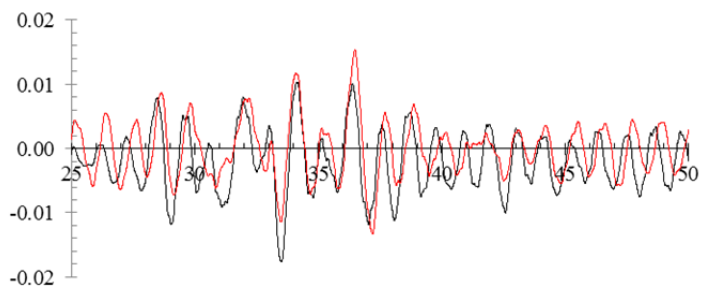
(b) 2層

(c) 3層

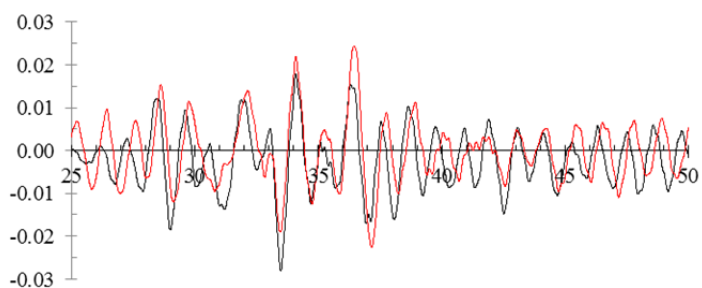
図 6.10 層間変形角時刻歴応答(鷹取波 100%)



(a) 3層

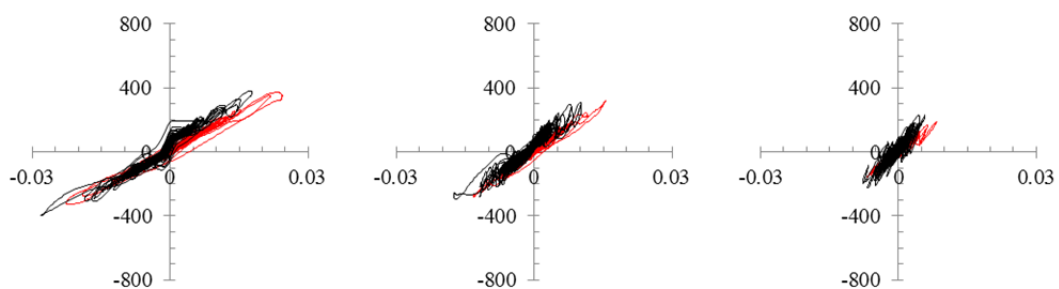


(b) 2層



(c) 1層

図 6.11 層間変形角時刻歴応答(想定南海トラフ波 100%-2)



(a) 1層

(b) 2層

(c) 3層

図 6.12 層間変形角時刻歴応答(想定南海トラフ波 100%-2)

## 第7章 随時型構造健全度推定法

### 7.1 はじめに

#### (1) 背景と研究の着眼

鉄骨造建築物が大地震を受けた時には、地震動の作用による繰り返し変形をうけ、部材接合部での累積塑性変形量や最大塑性変形量が相当量に達していることが予測される。しかしながら、これ等の値がある一定の閾値を超えるまでは、一般には大幅な剛性や耐力の劣化が生じるような破壊が脆性的に発生することはないと考えられる。一方、仮に局所的に接合部の破断が生じていたとしても、外観上、建物全体の残留変形が少なく、損傷も甚大でなければ、地震後の簡易的な診断では、内部の破壊を確認できない可能性もある。従って、こうした建物骨組内の破壊状態を非破壊で探査し、構造健全度を確実に評価する手法は未だ開発の途上にあるが、すでに大地震を経験した建物の再検証、今後の大地震後において深刻な損傷を生じた建物の確実な発見のためにも、構造健全度推定手法の実用化研究が急務である。

本テーマでは、大地震を受けた建築物の構造性能について、特に部材接合部が破断したような甚大な損傷の有無の探査を問題とし、すでに「このように建物が危険な状態に達していた場合」に、非破壊の診断手法を用いて「このような状態に達している可能性が発見できる」ような構造性能の診断法の開発を考えている。実際の補修や補強を行う段階での破壊箇所の確定と状態の確認には、仕上げ材等の除去による直接的な検査が必要不可欠となるが、そうした確認作業自体を行う必要があるか否かを判断する前提となる「構造健全度推定法」として、仕上げ材の除去を必要としない非破壊検査を活用するためにも、その精度向上のための研究・開発が必要となる。

このような、構造健全度推定法に関しては、対象とする建築物の振動特性を用いた構造特性の推定に関する研究が既に数多く実施されているが、この技術を実用化段階に持ち込むためには損傷現象と計測情報の関係性を説明するモデル構築とともに、建物の初期状態から損傷の進行過程に渡るデータの蓄積と分析が重要となる。ただし、実際に振動特性の変化と損傷程度の定量的な相関について、実証的な検討がなされている研究例の多くは、大型振動台による実大実験の加振時応答データによるものであり、現状ではその実施数も十分であるとは言えない<sup>1)3)</sup>。本研究でも基本的アプローチは、実大鉄骨フレームを用いた振動台加振実験により骨組みに損傷が発生する過程において、固有振動数と振動モード形状の変化の進行について振動特性の観点から検討するものである。具体的には、震災後の建物に小型の起振器を持ち込むことを想定し、建物各部に速度計を設置した後に、小型起振器により建物に伝達され、発生する微振動応答を計測し、建物の構造健全度を振動特性から推定する手法の開発を目指している。今回の実験では、小型起振器による加振点が異なる場合の、振動特性の計測結果を比較するとともに、実際の損傷発生および損傷箇所の状態と、振動特性評価結果との関連性を調べることを主眼としている。

なお、本テーマで扱う「随時型構造健全度推定法」という呼び方は、振動特性の診断を行うための主たるセンサ（加速度計や速度計）を常時設置するのではなく、振動特性計測の際に一時的に設置してデータを収録する手法であるということによる。すなわち、本手法による計測時期は、地震動の発生時点その瞬間ではなく、地震が発生した後等、適切な

タイミングで「随時」計測が行えればよいものであることから、こうした呼び方とした。ただし、本研究を通して得られた振動台実験の結果の考察により、地震が発生する前の随時型の振動計測、ならびに、地震発生時のリアルタイム計測、地震後から余震を計測できるような「常設型」振動計測、などのデータ利用を合わせて行うことができれば、「構造健全度推定」の精度向上の意味ではさらに有効となりうることが示唆されている。

## (2) 本研究テーマの計画策定

大地震を受けた鉄骨構造物の被災後における構造健全度推定については、(i)構造的に健全な状態を維持しているか、(ii)大損傷を生じていないが破壊の寸前の状態にあるか、(iii)すでに破壊を生じているか、という状況区分を適切に知ることができれば、補修や補強のための設計段階に手戻りなく移行できると考えられる。構造健全度推定のレベルとしては、(i)と(ii)の状態区分のための診断、ないし(i)・(ii)と(iii)との状態区分のための診断が非破壊で行えるか、ことに意味がある。ここで対象とする「破壊」とは、柱梁接合部などにおける部材破断のような甚大な損傷を考えているが、問題としているのは、震災後にも建物に残留変形が少なく、外観から内部の損傷が特定できないような場合にどう対処すべきかという点にある。そこで、本研究テーマの計画では、(i)、(ii)、(iii)の状態区分が、振動特性の変化をモニタリングすることにより、実用的な分解能で特定可能かをまず確認することとした。

一般に構造健全度推定のための診断については、

- ① 建物全体系としての振動状態から、卓越振動数や振動モードに生じた異常を検知し、大域的に損傷の有無の可能性をまず検知する診断段階：以下、グローバル・スキャン（モニタリング）と呼ぶ、
- ② グローバル・スキャンにより、損傷の可能性があると判断されるとき、建物各層の剛性低下を評価し、損傷を生じた個所がどの層に存在するかを見極めるための診断段階：以下、レイヤー・スキャン（モニタリング）と呼ぶ、
- ③ 損傷を生じている層において、実際にどの個所に破壊が生じているかを探査するために、部材レベルでの波動の伝播状態から、損傷個所を探索するための診断段階：以下、ローカル・スキャン（モニタリング）、

というような、大きく3つの段階を経ることが想定される。ここで、③の段階については、実際に十分な精度が得られるような探査を行うには、超音波や打撃などによる波動伝播による損傷推定法の導入が必要であると考えられる。今回の研究テーマは、実用的な視点からは、このような部材レベルの探傷を行う前提となる、その建物にそもそも損傷が生じているのか（①の段階により判断）、どの層を調査すればいいのか（②の段階により判断）、について、ある程度精度の事前推定が行えるような簡便な手法開発の段階までを本実験により目指すものとしている。このことは、建物に損傷があるどうかまだわからない段階では、非破壊にてこうした損傷を確実に確かめることが非常に重要であるとの観点に基づく。大地震後に、限られた時間の中で、①と②の段階の診断を実施していくことを想定し、ここでは、常時微動計測と小型加振器による微振動応答計測による振動特性の評価値が、構造健全度推定にどのように利用できるのかについて検討していくものとした。

もう一方の問題点としては、被災後の建築物において振動特性から構造健全度の検証を

することを想定する場合、地震後から初めて振動計測を行うことになることが現状では想定される。一般の建物において、地震計が常時設置されていて地震応答のモニタリングできるがなされている建物は限定されているし、地震前に常時微動計測等が実施され、振動特性が評価されている建物の数はほとんどない。従って、近いうちに構造健全度推定を実施していく必要が生じるとしても、当面は通常で考えられるような震災前と震災後の状態比較による診断手法ではなく、大地震後の状態の建物情報のみから構造健全度診断を進めていくための手掛かりをつかむことが重要である。被災後から振動計測を行う手法としては、常設型の地震計を当該建物に設定して余震応答を計測する「常設型」評価と、常時微動計測や加振器による振動応答計測を実施する「随時型」評価が可能な手法として考えられる。

そこで、本研究テーマの計画策定段階では、震災後の振動特性計測の情報から、随時型のモニタリングで損傷の有無を判断する、さらに損傷箇所を探す（絞り込んでいく）というアプローチに結びつけるための手掛かりを見つけるために、考えられる振動計測計画を実験スケジュールに盛り込んだ。これらは、以下の研究計画ポイントに示すような、繰り返し地震入力による本加振時応答、本加振時イベント間での振動台によるランダム波加振時応答、常時微動と小型加振器による微振動から得られる微振動応答を計測し、これ等のデータを同一試験体について集約し、それぞれのデータから得られる振動特性の評価値の利用方法を検討することとした。こうした計画策定に関して実験で確認すべきことを以下に整理する。

1. 実際の損傷状態に照らして、どのような状態に至ったとき、明確な固有振動数や振動モードの変化が生じるのか。また、それらが微振動の計測でも同様に得られるのか。(①グローバル・スキャン)

損傷の進行により、固有振動数や振動モードの変化がどのような段階で生じるのか、その変化の度合いを確認するとともに、微振動レベルで得られる情報からも一定の分解能が得られるか、また、微振動計測による振動モードの評価が、損傷を反映した情報を保持しているについて確認する。さらに振動モードの評価のために、起振器を設置する位置を各層に移動させ、モードの励起状況も見る。： 振動台によるランダム波加振、常時微動、計測各層での起振（ランダム波）を実施

2. 「随時型」計測を震災前後に実施できない場合を想定し、地震後の計測のみから損傷状態の発生の可能性を調べるためには、どのような計測と工夫が必要かを確認する。(①グローバル・スキャン)

事後の情報のみで損傷を推定するには、建物が図面どおり正確に施工され、計算による固有値が正確に評価できる必要性が考えられるが、実際にその精度を保証することは難しい。そこで、複数の入力レベルの振動による固有振動数の相違を利用できないかを考える。すなわち、被災後から常設のセンサを建物に設置すれば余震の観測はできる可能性はあるので、こうした常設型計測を震災後に行うことを念頭に、精度向上の手法を検討する。： 振動台によるランダム波加振を実施、各層での起振（ランダム波・サイン波）を実施



3. グローバル・スキャンにより損傷の可能性があるとは判断されるとき、その可能性が高い層をどのように絞り込むのという観点から、小型起振器を利用した随時型の診断法の利用の可能性を検討する。(②レイヤー・スキャン)

振動モード形状から層の剛性を評価した時に、層剛性の推定値そのものや高さ方向の分布比率から損傷の可能性を評価する手法を検討する。一方で、小型起振器を用いた実験では、同一階の中で起振器の設置位置を変えた加振実験を行い、部材レベルでなく層間レベルの振動計測により、振動伝播の様相をとらえた損傷推定ができないかを検討する。： 各層での小型起振器による複数個所での移動起振（スイープ波・サイン波）

以下ではこれらの3点の確認事項を踏まえて、実験実施結果についての速報とともに考察を示し、問題点と今後の展望についてまとめている。

## 7.2 実験計画

### 7.2.1 計測スケジュール

#### (1) 振動台加振実験ならびに振動特性計測

本実験計画では、既存の鉄骨造建築物をターゲットとし、その振動特性から構造健全度の推定を行う手法の適用性を検討することを目的としている。そこで、実大フレーム試験体が複数回加振を受けるプロセスにおいて振動特性の変化をモニタリングする「振動台ランダム波加振実験」とともに、「微振動計測試験」による振動特性計測を実施し、外乱入力レベルの異なるランダム波入力に対する応答から推定される振動特性値の相違とそれらの特徴について検証する。

これらの振動台加振実験と振動特性計測の実施スケジュールを時系列で表 7.2-1 に示す。また、図 7.2-1 に実大振動台実験の本加振（地震動応答観測）の各イベントと、その前後に実施する「振動台ランダム波加振実験」、ならびに、各加振実施日の前後に実施する「微振動計測試験」の実施フローを示す。全実験期間のうち、振動台加振実験を 8・10・15 日の 3 日間、それらの加振日の前後には微振動レベルにおける振動特性を把握するために 7・9・11・15 日の 4 日間振動特性計測を行った。振動台加振実験では入力波に、想定南海トラフ波、ならびに兵庫県南部地震の観測波である JR 鷹取波の 2 波を用い、入力レベルを変えた段階加振を行っている。それぞれの地震波加振の前後において、ランダム波加振（最大加速度  $0.5\text{m/s}^2$ ）を行うものとした。

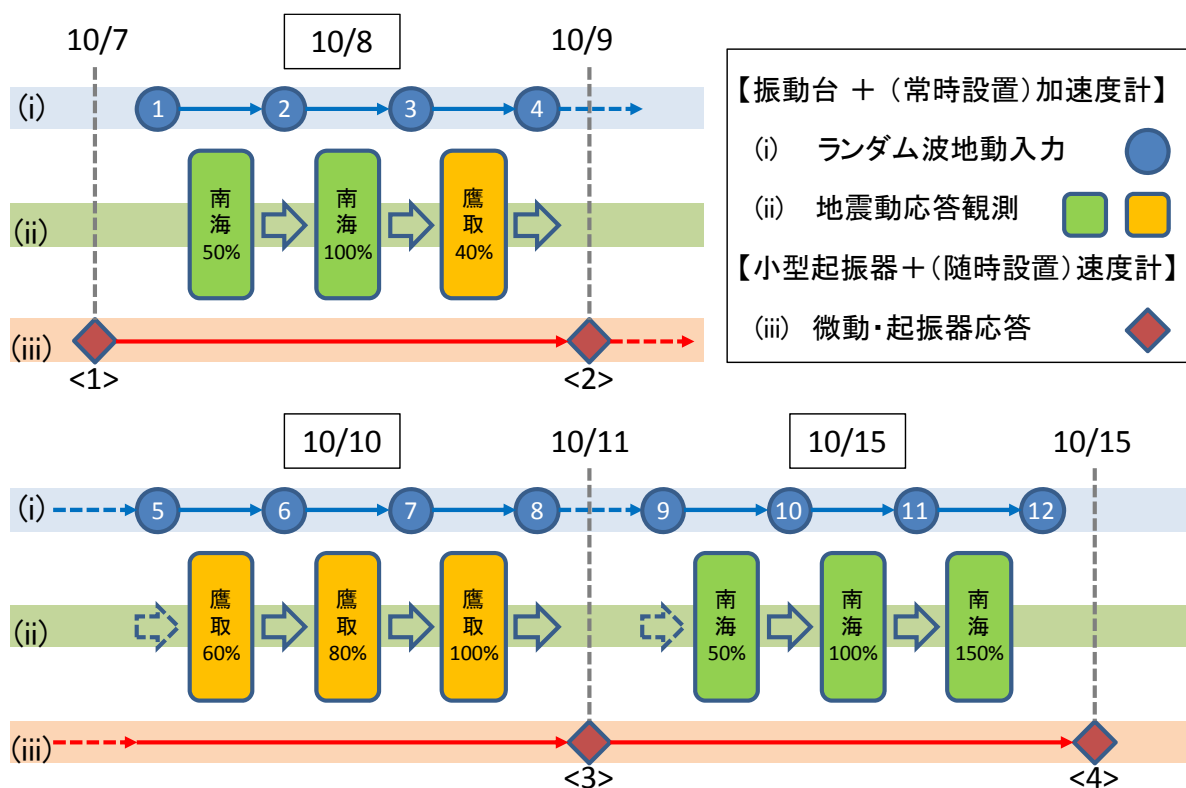


図 7.2-1 本加振実験イベントと各振動特性実験・計測との関連

表 7.2-1 振動台加振実験と振動特性計測の実施スケジュール

項目	入力波	日程
<1> 振動特性計測1日目	<1>常時微動・起振器ランダム波・起振器スイープ波	2013/10/7
(1) 振動台加振実験1日目	①ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海50%前】	2013/10/8
	(a)想定南海トラフ波50%	
	②ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海50%後】	
	(b)想定南海トラフ波100%	
	③ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海100%後】	
(1) 振動台加振実験1日目	(c)JR鷹取波40%	2013/10/8
	④ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【鷹取波40%後】	
<2> 振動特性計測2日目	<2>常時微動・起振器ランダム波・起振器スイープ波	2013/10/9
(2) 振動台加振実験2日目	⑤ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【鷹取波60%前】	2013/10/10
	(d)JR鷹取波60%	
	⑥ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【鷹取波60%後】	
	(e)JR鷹取波80%	
	⑦ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【鷹取波80%後】	
(2) 振動台加振実験2日目	(f)JR鷹取波100%	2013/10/10
	⑧ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【鷹取波100%後】	
<3> 振動特性計測3日目	<3>常時微動・起振器ランダム波・起振器スイープ波・起振器サイン波	2013/10/11
(3) 振動台加振実験3日目	⑨ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海50%前】	2013/10/15
	(g)想定南海トラフ波50%	
	⑩ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海50%後】	
	(h)想定南海トラフ波100%	
	⑪ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海100%後】	
(3) 振動台加振実験3日目	(i)想定南海トラフ波150%	2013/10/15
	⑫ランダム波(50 cm/s <sup>2</sup> )【南海150%後】	
振動特性計測4日目	<4>常時微動・起振器ランダム波・起振器サイン波	2013/10/15

振動台加振実験での振動台の加振は水平1方向であり、試験体の全層における加速度と層間変位が計測されている。データ処理は、1000Hz サンプリングの計測データをサンプリング周波数 200Hz に間引いた計測データを用いスペクトル解析を行うものとした。

## (2) 振動特性計測の着眼

微振動計測の工程と振動台加振実験との関連を示した図 7.2-1 において、(i) と (ii) については、振動台加振実験による応答計測に基づくものであり、これ等により対象試験体の破壊進行状態と振動特性の変動についての関連性についてまず検証を行う。一方、実際の随時型構造健全度評価の基本的な枠組みにおいては、建物重量に対して非常に小型の起振器利用による微振動計測、(iii) の常時微動計測結果を健全度評価のための指標として用いることを考えている。そこで本実験では、まず微振動レベルでの振動計測で得られたデータに基づく振動特性評価の結果が、振動台加振実験で得られた振動特性の変動と同様の傾向を示すことを確認したうえで、微振動計測に基づく随時型構造健全度評価法を実用化するために必要な課題や問題点を明らかにしていく。

図 7.2-1 において常時微動計測・起振器実験の <1> ～ <4> は、振動特性計測の1日目～4日目をそれぞれ表している。<1> は、試験体が振動台による地震動入力を受ける前の

無損傷の初期状態での計測である。<2> は、前日の振動台加振実験 1 日目の加振を受けたが試験体骨組自体には、まだ目立った損傷が見られない状態での計測である。<3> は、前日の振動台加振実験 2 日目における最終加振の JR 鷹取波 100%入力時に試験体の 1・2 層目の梁端において、計 3 箇所の破断と、1 箇所での亀裂を生じ、試験体が甚大な損傷を受けた状態で計測となる。<4> は、<3> で計測した段階以降、想定南海波 50%、100%、150%入力の加振を受けた後の計測となるが、試験体には、JR 鷹取波 100%入力後からは、顕著な損傷の進行が生じていない状態での計測となった。

### (3) 振動特性計測の手順

図 7.2-1 に示した <1> ~ <4> において速度計と小型起振器を用い、常時微動による振動特性計測を行うとともに、試験体内で小型起振器によりランダム波入力・スイープ波入力・サイン波入力を行った時の振動特性計測を行った（なお、スイープ波入力・サイン波入力は、全日程について行っていない。第 1 日目の計測で、スイープ波入力では明瞭な共振点が十分に得られなかったため、第 2 日目以降は振動特性計測の小型起振器による加振実験はランダム波入力を主たるソースとして、以後、スイープ波入力・サイン波入力は参考データとして計測している）。なお、図 7.2-2 は微振動レベルの振動計測時の速度センサ・小型起振器の配置計画を示す。図 7.2-2 (a)に示すように、常時微動計測時のセンサ配置は水平方向 2 軸、振動台上のみ 3 軸（垂直 1 軸・水平 2 軸）として行った。そのあと、図 7.2-2 (b)に示すように、試験体 2 階～R 階のセンサは、加振方向と直交の両端位置に加振方向と平行に設置し、振れの影響を確認した。図 7.2-2 (c)に示す小型起振器による実験では、加振の方向を振動台実験と同じ水平方向 1 軸のみとし、速度センサの配置も各計測位置で水平方向 1 軸のみとした。

計測の手順は、まず、図 7.2-2(a)、(b)の配置で常時微動を計測、その後図 7.2-2 (c)の配置にセンサを再配置して常時微動を計測したあと、小型起振器での加振による振動計測を行った。小型起振器の配置は(a1)から(c2)まで順に移動させながら、それぞれの加振位置に応じた振動応答を計測していくものとした。サンプリング周波数は、常時微動計測、ランダム波加振による振動計測ともに 200Hz とした。計測時間は、微動計測では 250 s、ランダム波入力時では 150 s とした。また、用いた起振器の可動部の質量は 20 kg であり、ランダム波入力時の最大入力加速度は 2.83 m/s<sup>2</sup>であった。図 7.2-3(a) は計測で用いた起振器であり、図 7.2-3(b)は、計測時の起振器と速度計の設置状況の写真である。

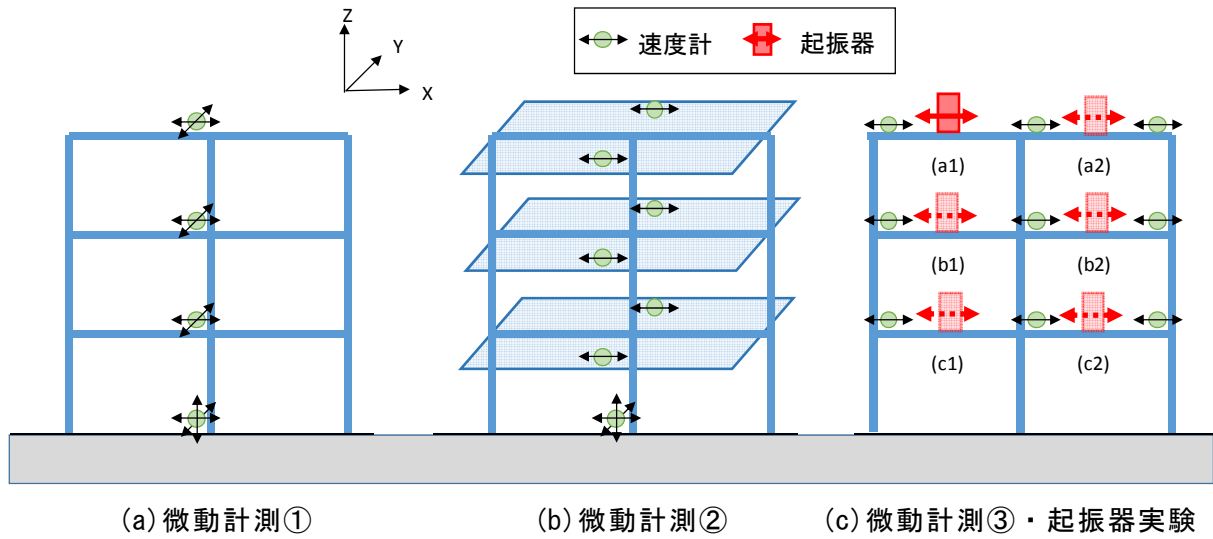
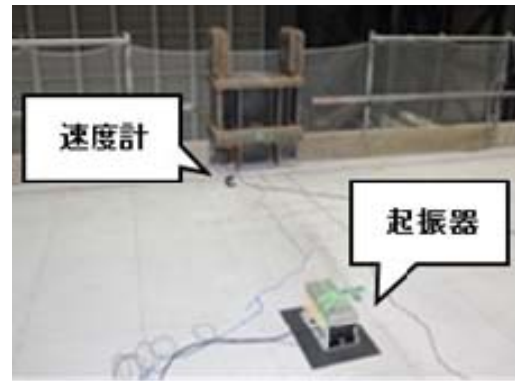


図 7.2-2 速度センサ・起振器の配置状況



(a) 起振器



(b) 設置状況 (屋上階)

図 7.2-3 小型起振器実験に用いた装置

## 7.3 実験結果

### 7.3.1 振動台加振実験データに基づく振動特性の変化の検証

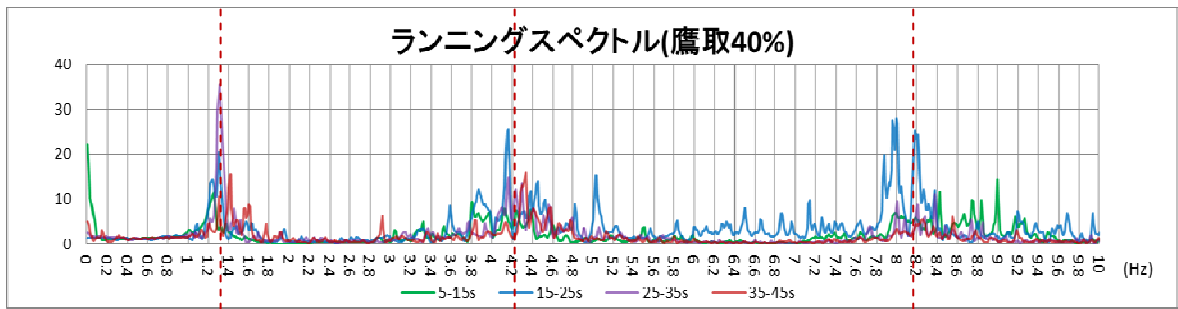
#### (1) 本加振ランニングスペクトルの比較

初めに、本加振により損傷の発生に伴う、本加振レベルの入力から求まる振動特性の変化を確認する。本加振実験において、JR 鷹取波の 40%入力→60%→80%→100%入力（1層と2層での梁端部での破断の発生）の加振履歴中における、入力10秒ごとのランニングスペクトルの変化を示す。2階、3階、R階に設置した加速度計の応答から求めたフーリエ振幅スペクトルを振動台上のRC基礎梁上に設置した加速度計の応答から求めたフーリエ振幅スペクトルで除したスペクトル比の変化を図7.3-1、7.3-2、7.3-3に示す。図7.3-1、7.3-2、7.3-3はそれぞれ、2階、3階、R階のランニングスペクトル比である。JR 鷹取波の加振時の全サンプリング時間（約55s）のうち、5-15s、15-25s、25-35s、35-45sの部分にあたる10s間隔で切り出した区間のフーリエスペクトル比の変遷を示している。なお、これらの図中に縦に引いた破線（赤色）は、本加振実験の最初のランダム波入力（①）段階での卓越振動数を表している。

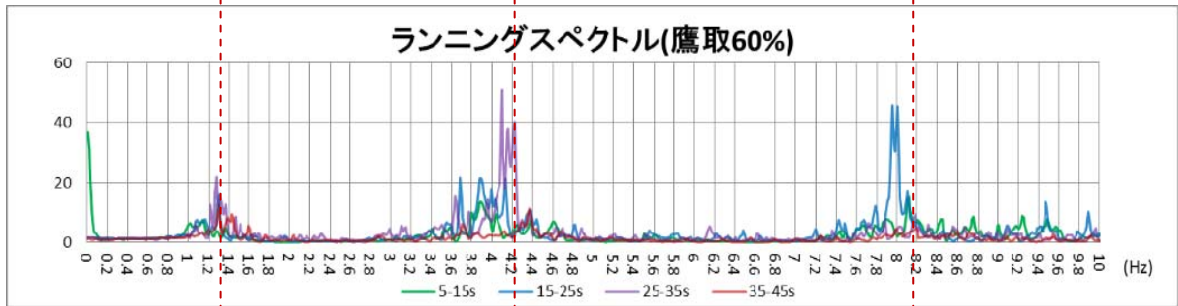
ランニングスペクトル比の評価では、フーリエ解析のためのデータ処理は、200Hzサンプリングでとした10s分のデータ（2000点）の後方に0値を付加した8192点のデータについてFFTを行い、4サイクルのハニングウィンドウによるデジタルフィルタ（バンド幅0.065Hzの相当）による平滑化処理を行った。

JR 鷹取波100%入力時において、1次、2次、3次のすべての卓越スペクトルが生じる振動数が、低振動数側に移動している。なお、JR 鷹取波80%入力時までの段階では、1次、2次の卓越振動数については、変化が見られない。一方、JR 鷹取波40%入力時と比較して、60%入力時、80%入力時にかけては、3次の卓越振動数についてのみ、低振動数側への移動がみられる。

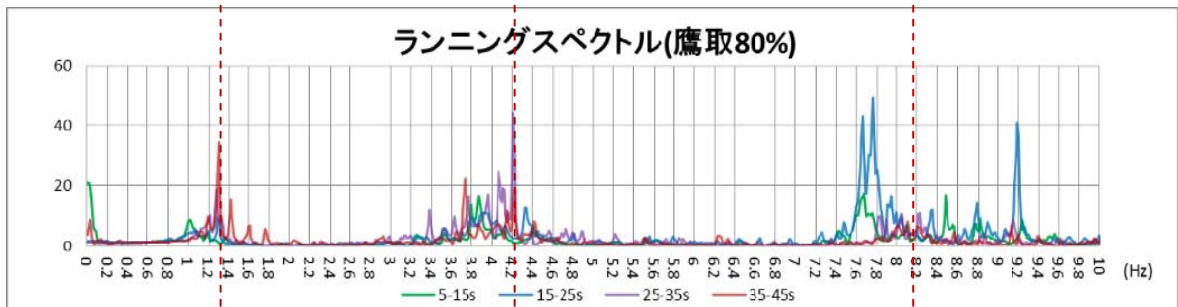
また、いずれの入力時においても、2Fレベルにおけるスペクトル比の大きさは、高々40倍程度であったが、JR 鷹取波100%入力時のランニングスペクトルにおいて、25-35s、35-45sの区間においては、2次の卓越振動数近傍において、振幅の増幅率が120～170にまで増大していることが分かる。これにより、主要動で梁破断を起こした直後には、2次モード増幅されて生じたことがわかる（図7.3-1）。



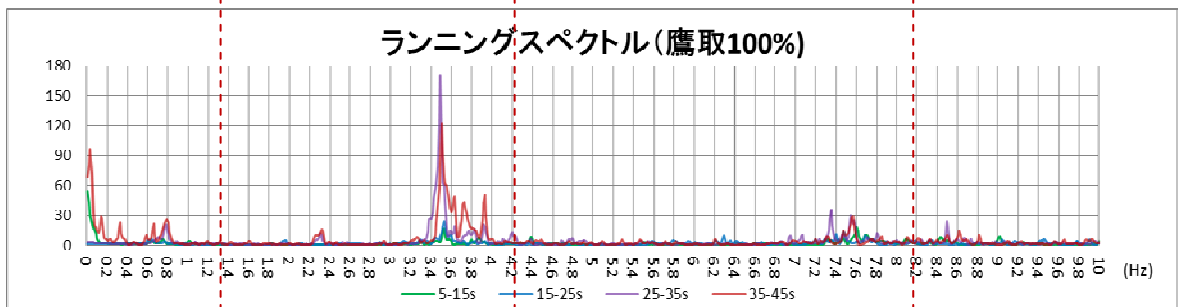
(a) JR 鷹取波 40%加振時



(b) JR 鷹取波 60%加振時

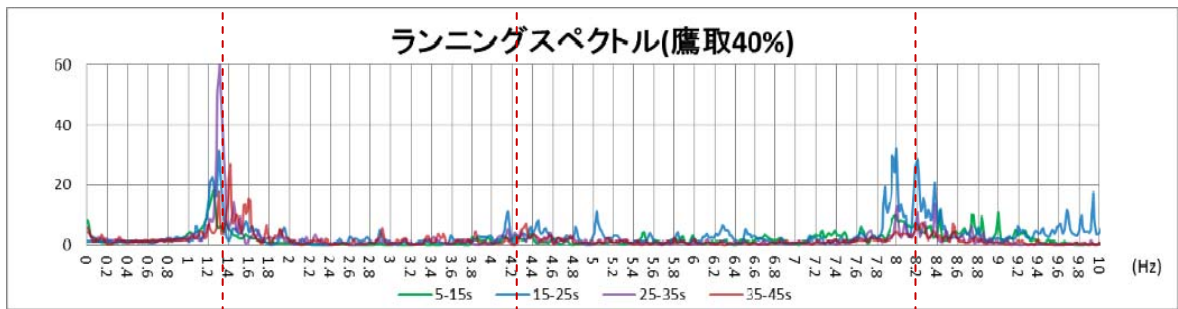


(c) JR 鷹取 80%加振時

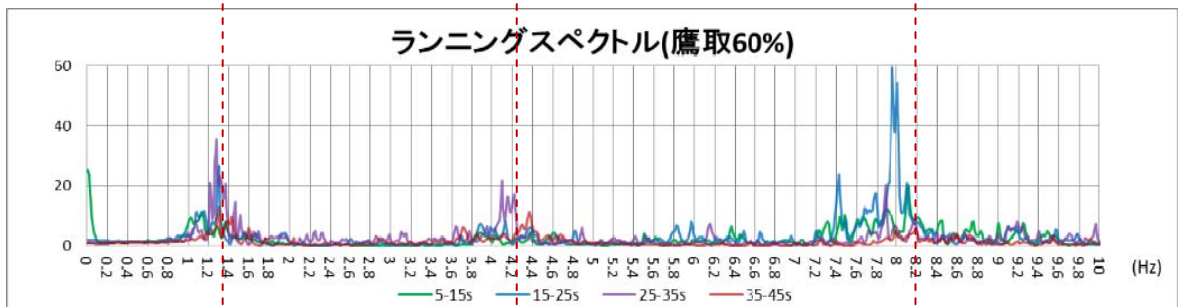


(d) JR 鷹取 100%加振時

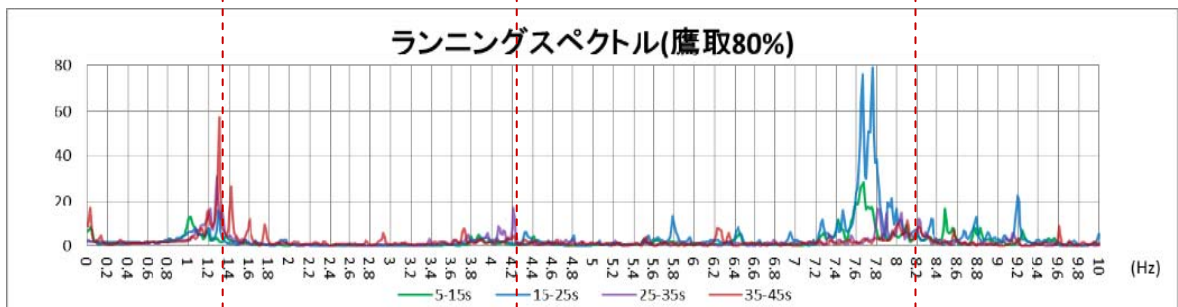
図 7.3-1 本加振実験ランニングスペクトル比 (2F レベル計測)  
(縦の破線は、本加振実験の最初のランダム波入力 (①) 段階での卓越振動数を表す)



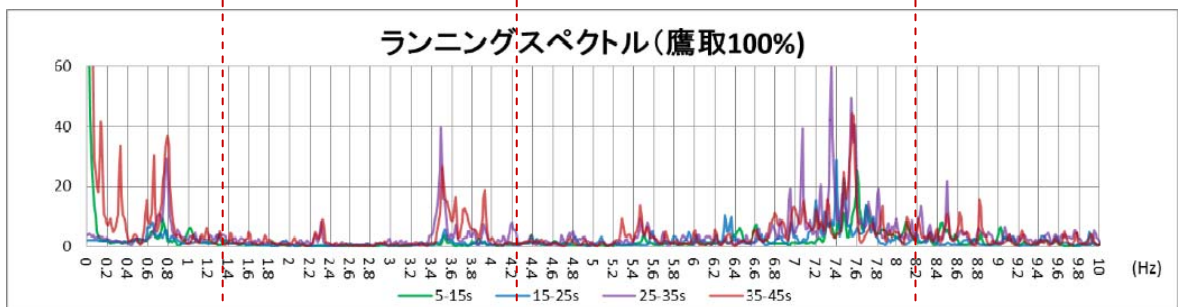
(a) JR 鷹取波 40%加振時



(b) JR 鷹取波 60%加振時



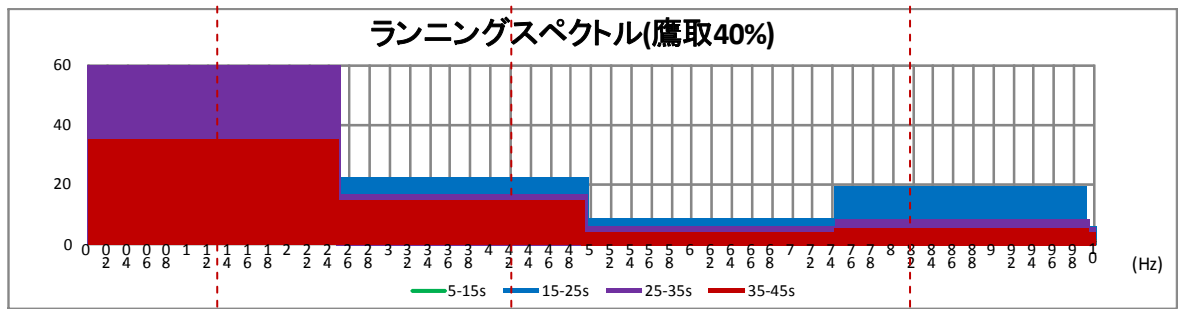
(c) JR 鷹取 80%加振時



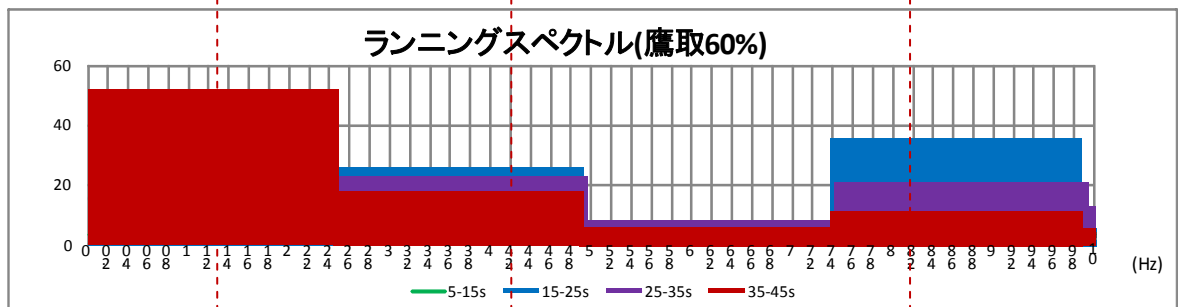
(d) JR 鷹取 100%加振時

図 7.3-2 本加振実験ランニングスペクトル比 (3F レベル計測)  
 (縦の破線は、本加振実験の最初のランダム波入力 (①) 段階での卓越振動数を表す)

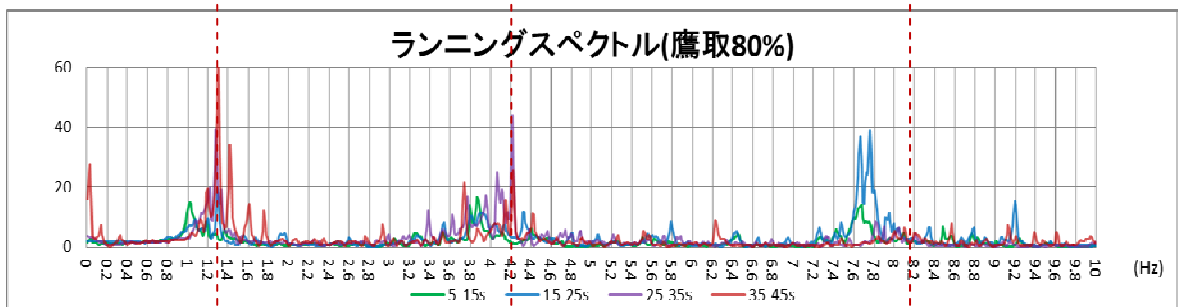




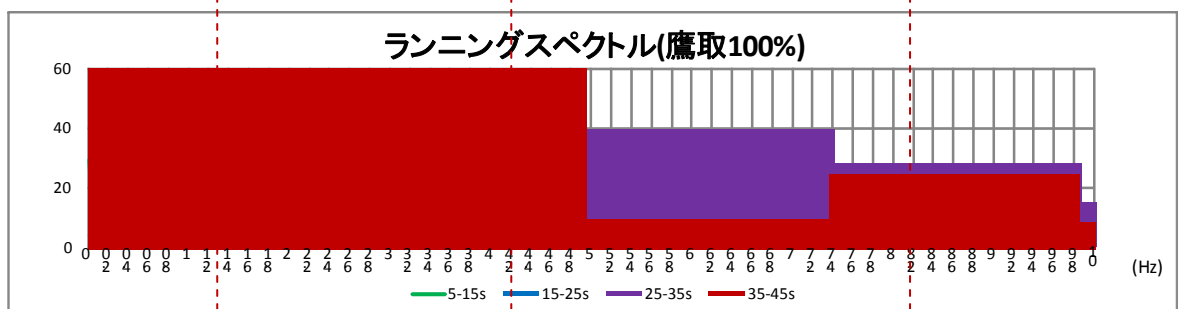
(a) JR 鷹取波 40%加振時



(b) JR 鷹取波 60%加振時



(c) JR 鷹取 80%加振時



(d) JR 鷹取 100%加振時

図 7.3-3 本加振実験ランニングスペクトル比 (RF レベル計測)  
(縦の破線は、本加振実験の最初のランダム波入力 (①) 段階での卓越振動数を表す)

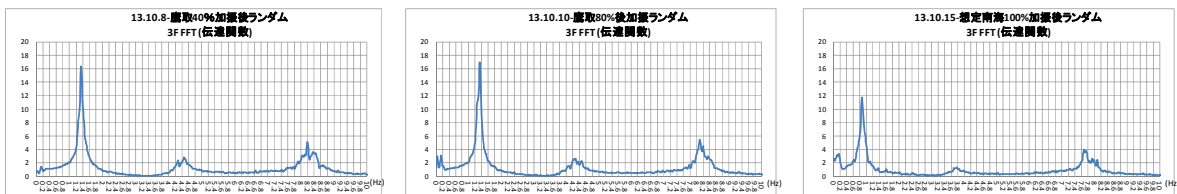
## (2) 本加振ランダム波入力結果による振動特性の変化

### 1) 固有振動数の変化

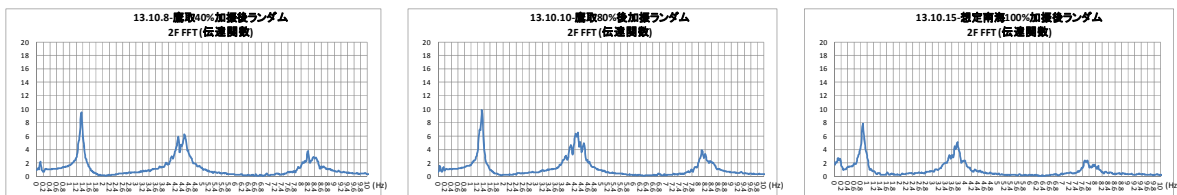
続いて、振動台におけるランダム波入力（最大加速度 0.5 m/s）時の応答のスペクトル解析により求まる振動特性の変化について検証する。図 7.2-1 に示すように、3 日間の本加振日それぞれの日に 3 回の本加振の前後にランダム波入力を行っており、1 日につき 4 回、計 12 回の入力実験を実施している。



(a) R 階レベルの加速度応答のフーリエスペクトル比



(b) 3 階レベルの加速度応答のフーリエスペクトル比



(c) 2 階レベルの加速度応答のフーリエスペクトル比

図 7.3-4 振動台でのランダム波入力により求めたスペクトル比の変化  
(左より、ランダム波加振④、⑦、⑪)

これらのうち、④（本加振第 1 日・JR 鷹取波 40%加振後）、⑦（本加振第 2 日・JR 鷹取波 80%加振後）、⑪（本加振第 2 日・想定南海波 100%加振後）における、試験体の各階で計測した加速度応答のフーリエスペクトル振幅比（各階応答の RC 基礎梁上応答に対するスペクトル比）を図 7.3-4 に示す。各次の卓越する振動数の変化は、JR 鷹取波 100%時の大損傷を受けた後にあたる、ランダム波加振⑪のケースにおいて、低振動数側への変化がみられる。ランダム波入力では、全 12 回の入力波は、概ね同一であるとみなせるが、振動台より上の試験体での伝達関数についてみると、④と⑦では、各階・各次のフーリエ振幅比についてひかくすると、概ね同程度であるが、⑪については、1 次のフーリエ振幅比は、最上階で 7 割程度となっている。また、2 階に対する 3 階、R 階の加速度振幅の比率は、④と⑦では、1.7、2.0 倍、⑪では、1.5、1.7 倍と変化しており、1 次の振動モード形状にも変化が生じていることが確認される。

なお、フーリエスペクトル解析においては、1 つのランダム波加振時の計測データ

(200Hz・160秒程度)について、全区間から16384点のデータ分の区間を複数個所切り出してFFT解析を行い、これ等のアンサンブル平均をとった。なお、スペクトルの平滑化のために、30回サイクルのハニングウィンドウによるデジタルフィルタ(バンド幅は0.475Hz相当)処理を行っている。

ランダム波加振入力①～⑫における応答データのスペクトル解析の結果により得られた、各次の卓越震度数の変化を表7.3-1に示す。また、これ等の結果について、卓越振動数の変化、ならびに*i* (*i*=1, 2, 3) 次の卓越振動数の減少比率  $R_i(n)$  ( $n$  ( $n=1, \dots, 12$ ) 回目の対象加振後の振動数  $f_i(n)$ としたとき、 $R_i(n)=100 \times \{(1-f_i(n)) / f_i(1)\}$ により算定)の変化を図7.3-5の(a)ならびに(b)にそれぞれ示す。

表 7.3-1 振動台によるランダム波加振入力実験から求めた固有振動数の変化

加振スケジュール	卓越振動数(ランダム波加振):Hz			振動数の減少比率(①に対する比):%		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
① 131008 南海50%前	1.56	4.83	8.52	—	—	—
② 131008 南海50%後	1.48	4.60	8.49	4.96	4.88	0.38
③ 131008 南海100%後	1.36	4.47	8.21	12.53	7.58	3.68
④ 131008 鷹取40%後	1.34	4.38	8.21	13.84	9.34	3.72
⑤ 131010 鷹取60%前	1.36	4.47	8.20	13.05	7.58	3.77
⑥ 131010 鷹取60%後	1.36	4.28	8.20	13.05	11.53	3.77
⑦ 131010 鷹取80%後	1.34	4.25	8.10	13.84	12.11	4.96
⑧ 131010 鷹取100%後	0.90	3.81	7.74	42.56	21.21	9.21
⑨ 131015 南海50%前	0.89	3.80	7.77	43.08	21.30	8.83
⑩ 131015 南海50%後	0.88	3.78	7.68	43.60	21.89	9.93
⑪ 131015 南海100%後	0.87	3.78	7.67	43.86	21.89	10.07
⑫ 131015 南海150%後	0.87	3.76	7.66	44.39	22.22	10.12

図7.3-5(a)に見られるように、卓越振動数の主たる変化は、②および③の想定南海波50%、および100%入力の後、ならびに⑧のJR鷹取波100%入力後に生じている。②および③の入力後には、合成スラブのRCスラブ縁において亀裂の発生が生じており、これらの影響によるものと推定される。また、⑧の入力後には、1層目と2層目において外柱にとりつく梁端フランジに破断を生じており、これに起因するものと考えられる。なお、④～⑦、⑨～⑫の計測時においては、卓越振動数の変化はほとんど見られなかった。

表7.3-1、ならびに図7.3-4(b)に見られるように、①の想定南海波50%入力前(処女加振前の状態に相当する)の段階での卓越振動数を基準とし、卓越振動数の減少比率  $R_i(n)$  の変化をみると、⑧JR鷹取波100%入力後における1次の卓越振動数の変化が顕著であり、甚大損傷によると卓越振動数の大幅な変化との関連が確認される。なお、⑥のJR鷹取波60%入力後、⑦のJR鷹取波80%入力後の損傷観察においても、梁端フランジの座屈や亀裂の発生が確認されているが、甚大損傷の直前の兆候となるこれらの損傷については、卓越振動数の変化には現れてこないことが確認される。このことから、振動特性計測は、骨

組みのメカニズムが明らかに変化するような状況が発生したときに、損傷探査として有効な手法であるもと考えられる。

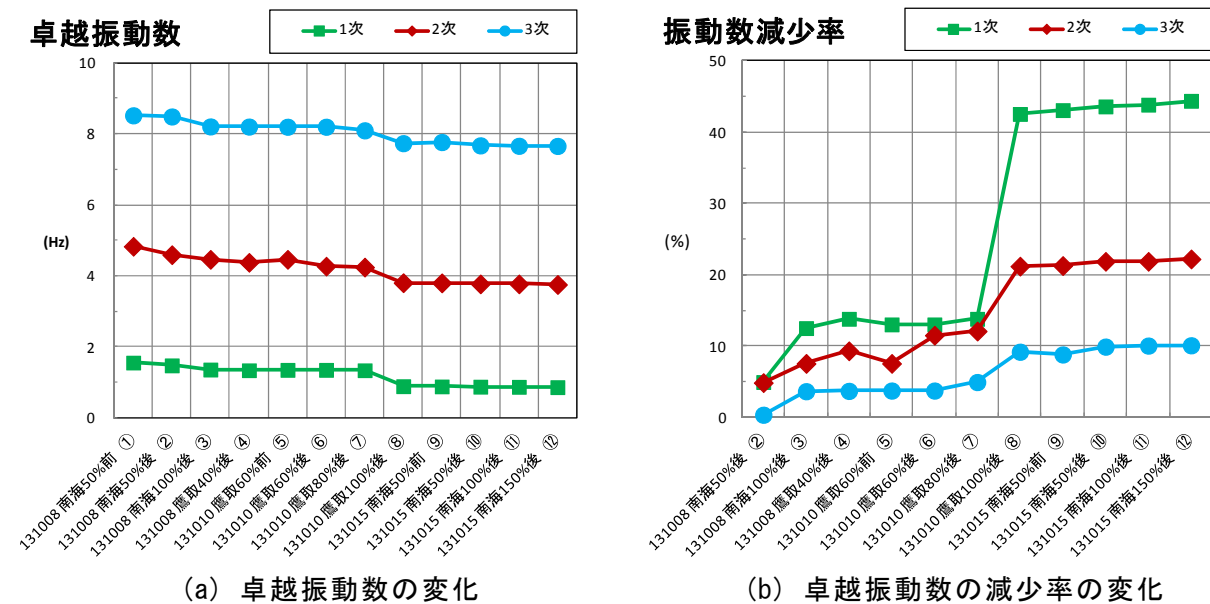


図 7.3-5 振動台によるランダム波加振入力実験から求めた固有振動数の変化

## 2) 各層の剛性の変化

図 7.3-6 および 7.3-7 は、③の想定南海波 100%入力後、および⑧の JR 鷹取波 100%入力後におけるランダム波加振実験で計測した各層の加速度に層質量を乗じて求めた慣性力の値から推定した層せん断力と、レーザー変位計で測定した層間変位により、各層の履歴曲線を描いたものである。③の曲線はほとんど履歴ループを描いていないが、JR 鷹取波 100%入力により甚大損傷を受けた後の状態となる③の曲線では、各層とも層剛性が低下し、履歴ループを描くようになっていくことがわかる。なお、層剛性の低下と履歴ループ面積の増加については、梁端破断を生じていない 3 層目についても、下層の梁端に破断を生じた影響を受け、層剛性の低下を引き起こすことがわかる。

この履歴曲線の回帰直線の傾きを層剛性と考え、各本加振実験の合間に入力したランダム波加振 12 回分のデータについて層剛性の推移を求めた。図 7.3-8 に示す。初期状態①から③の想定南海波 100%入力後にかけて、特に 1 層の層剛性の低下がみられる。これは、RC スラブの亀裂発生、アンカーボルトの端抜けにより、梁端部、柱脚部の固定度に変化を生じた影響と考えられる。その後、⑧の JR 鷹取波 100%入力時までは、各層の層剛性に大きな変化は見られない。JR 鷹取波 100%入力により、梁端破断を起こした 1 層と 2 層の層剛性の低下が顕著であることがわかる。梁端破断に至っていない 3 層の剛性低下はこれらに比べると少ないが、下層の梁端部のメカニズムの変化を受けて 3 層の剛性も低下して確認できる。なお、JR 鷹取波 100%入力以後、想定南海波 50%、100%、150%入力を行った際には、層剛性の変化はほとんど見られないことがわかる。

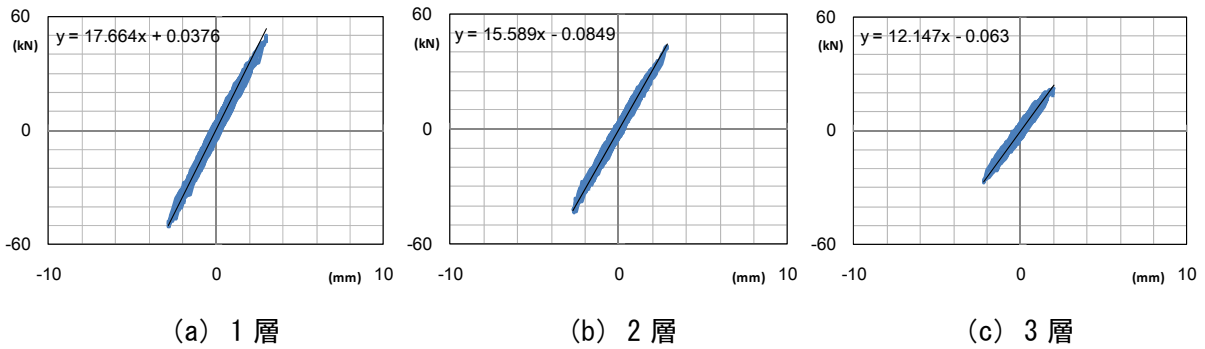


図 7.3-6 層せん断力－層間変位関係 (③想定南海波 100%入力後)

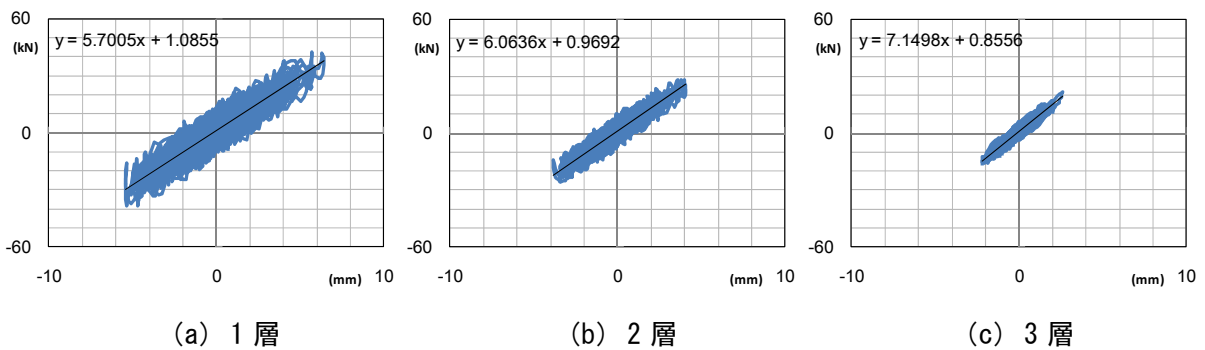


図 7.3-7 層せん断力－層間変位関係 (⑧JR 鷹取波 100%入力後)

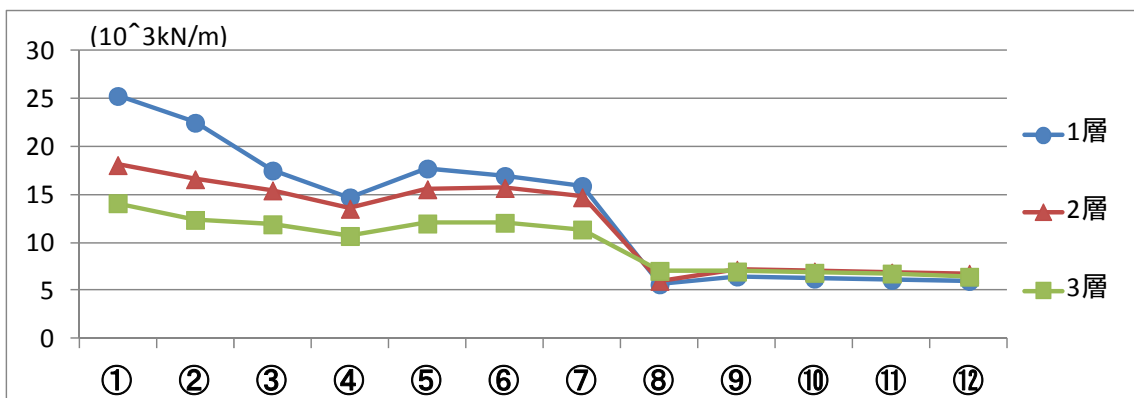


図 7.3-8 層剛性の推定値の変化

### 3) 固有値解析 (スペクトル解析結果との比較)

表 7.3-2 に、推定した各層の層剛性と質量をもつ、非減衰 3 質点系の固有振動数 (以下、計算値と表現する) と、振動台加振実験におけるランダム波入力による応答の FFT 解析から求めた固有振動数 (以下、実測値と表現する)、ならびに実測値に対する計算値の誤差 (%) を示す。なお、表の中の破線による行の区切り線 (⑦・⑧間) は、1 層と 2 層の梁端に破断が発生した JR 鷹取波 100% 入力となされた時点を示している。固有振動数の実測値と計算値を比較すると、1 次の固有振動数については両者がほぼ一致している。一方、JR 鷹取 2 次は、JR 鷹取波 100% 入力全後で見ると、①～⑦で 20% 程度、⑧～⑦で 35% 程度、3 次は、①～⑦で 35% 程度、⑧～⑦で 55% 程度の誤差があり、高次の固有振動数になるに従って、計算値と実測値の誤差が大きくなっている。

表 7.3-2 固有振動数の比較（計算値と実測値）

	計算値 [Hz]			実測値 [Hz]			誤差 [%]		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
①	1.57	4.00	5.79	1.57	4.85	8.58	0.1	17.5	32.6
②	1.49	3.76	5.50	1.50	4.63	8.52	0.9	18.8	35.4
③	1.38	3.56	5.23	1.38	4.51	8.25	0.0	21.1	36.6
④	1.28	3.33	4.89	1.37	4.48	8.22	6.5	25.6	40.5
⑤	1.39	3.57	5.25	1.39	4.50	8.24	0.2	20.6	36.2
⑥	1.37	3.55	5.25	1.37	4.49	8.22	0.0	20.8	36.1
⑦	1.33	3.45	5.09	1.34	4.29	8.11	0.6	19.6	37.3
⑧	0.84	2.41	3.48	0.92	3.80	7.77	8.9	36.6	55.2
⑨	0.90	2.51	3.65	0.92	3.76	7.76	2.4	33.3	53.0
⑩	0.88	2.47	3.60	0.90	3.80	7.73	1.8	35.0	53.5
⑪	0.88	2.45	3.57	0.89	3.71	7.72	1.7	34.0	53.7
⑫	0.87	2.41	3.52	0.89	3.76	7.68	2.7	36.0	54.2

(3) 固有振動モードの変化

ランダム波入力①～⑫のそれぞれのスペクトル解析結果を用い、各層の各次のスペクトル振幅比により固有振動モード図を作成した。図 7.3-9 は、ランダム波入力①～⑫の段階における 1 次～3 次の固有振動モードを最上層のモード振幅を 1 として基準化したものを重ね書きしたものである。また、図 7.3-10 は、推定した各層の層剛性と質量を用い、固有値解析により算定した①～⑫の段階における 1 次～3 次の固有振動モード図である。

図 7.3-9、図 7.3-10 のいずれも 1 次～3 次の固有振動モード形状、①～⑫の段階に応じたモード形状の変化の様子は概ね同様であると考えられる。加振スケジュールの進行に伴い、図中の矢印の方向に推移している（白抜き矢印：減少、黒塗り矢印：増加）。

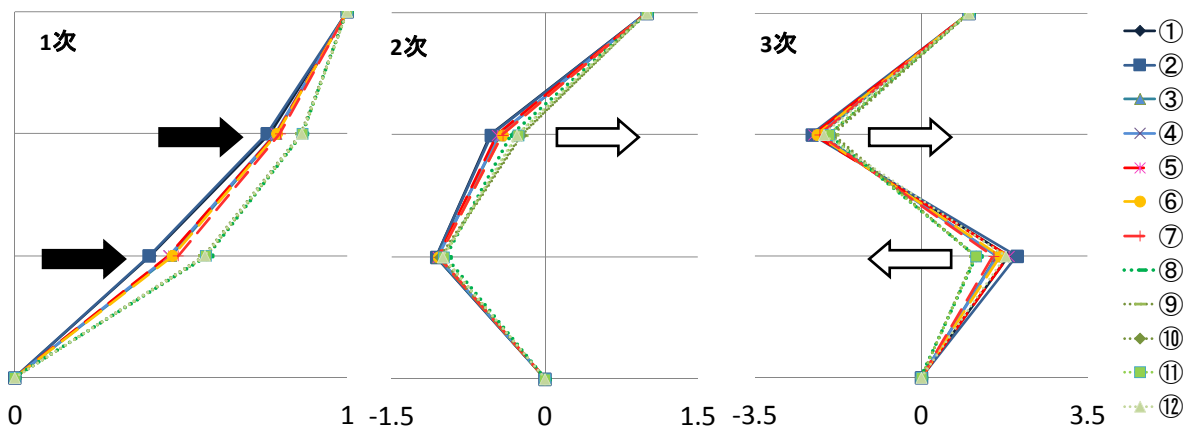


図 7.3-9 振動モード図（実測値）の変化

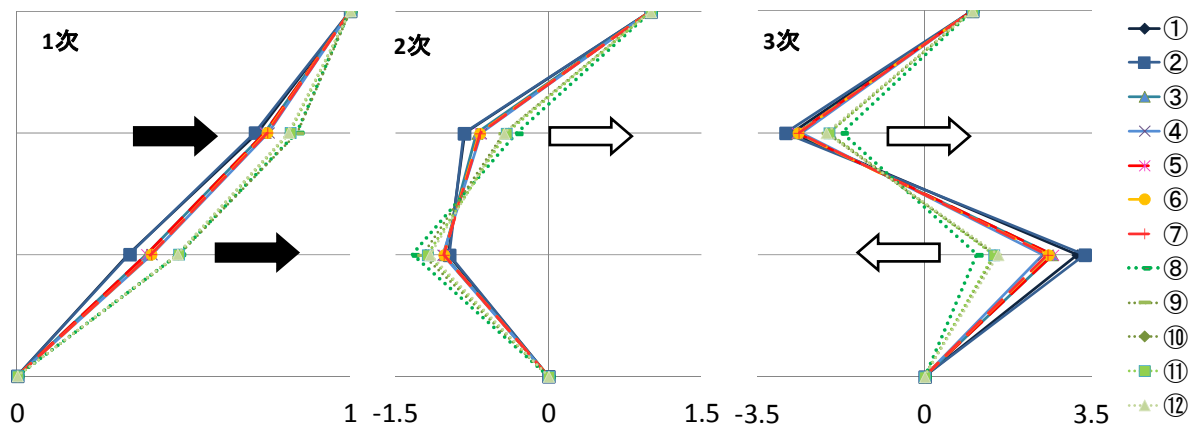


図 7.3-10 振動モード図（計算値）の変化

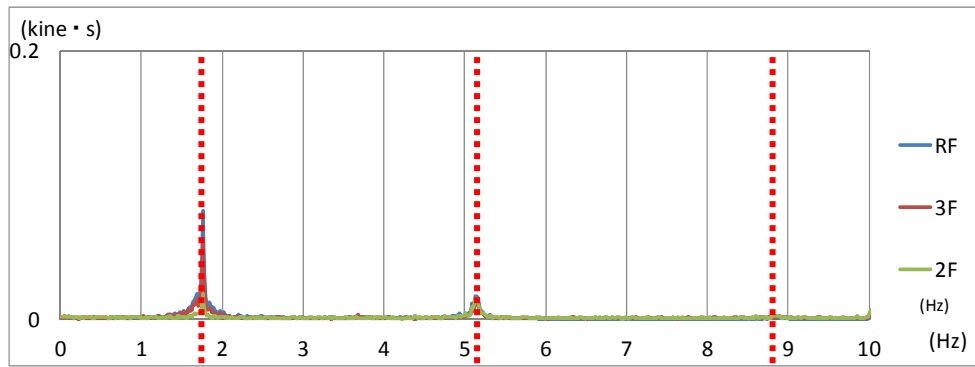
振動モードは各次とも JR 鷹取波 100%入力前 (⑦) から入力後 (⑧) の間で大きく変化していることがわかる。また、①～⑦の間の状態と、⑧～⑫の間の状態の変化は、⑦→⑧の状態の変化に比べると非常に少ない。最上階で基準化した各層での振動モードの振幅を比較すると、⑦→⑧の甚大損傷発生の前後では、1次は増加、2次は1層が同等ないし増加し2層が減少、3次はいずれの層も減少する傾向がみられる。

### 7.3.2 微振動レベル振動計測結果による振動特性の変化

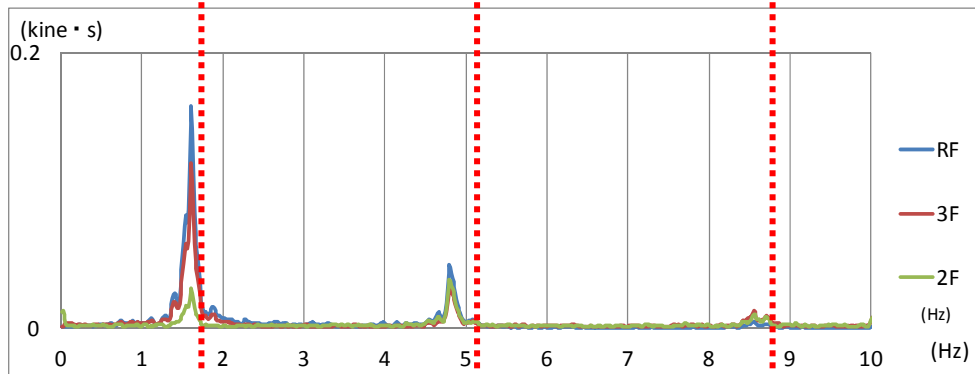
#### (1) 常時微動計測

図 7.3-11、図 7.3-12 に速度計を用いて計測した常時微動のフーリエスペクトル解析の結果を示す。これらの図は、図 7.2-2(a)、(b)のセンサ配置に対応している。それぞれ、各層の速度応答のフーリエスペクトルを表しており、(a)～(d)の4つのスペクトル曲線は、上から順に振動特性計測日 <1> ～ <4> での状態に対応している。なお、これらの図中に縦に引いた太破線(赤色)は、振動特性計測1日目 <1> の段階での卓越振動数を表している。2日目以降、並進1次～3次の各次の卓越振動数が小さい値に変動していることが分かる。特に、JR 鷹取波 100%加振により大損傷が発生した前後の振動特性計測日にあたる <2> と <3> のスペクトル曲線を比較すると、1～3次とも著しく低下していることが読み取れる。この結果は、振動台加振実験のランダム波入力時に確認された正常とほぼ同様の結果であり、微動レベルの応答計測値からでも骨組の甚大損傷に伴う固有振動数の変化は確認された。

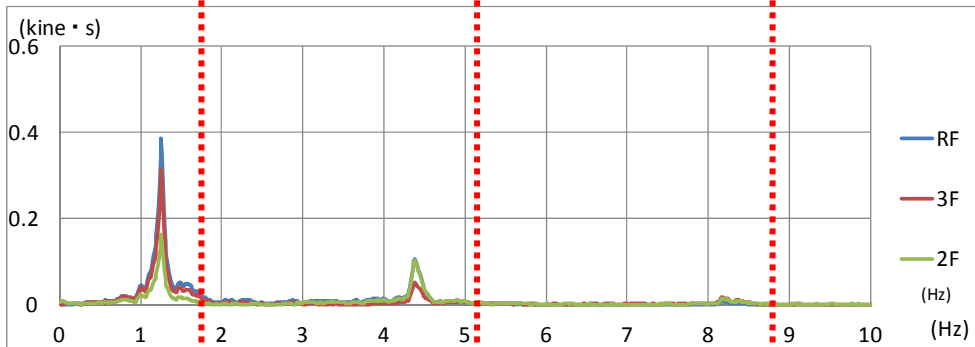
また、図 7.3-12 の中に縦に引いた細破線(青色)で示した振動数のところにも振幅の卓越値が見られるが、これは、試験体のねじれに伴う振動であり、これ等の影響はもっぱら加振方向と直交方向の動きに影響している。なお、この振動モードに関する固有振動数(約 3.72Hz)は、実験の全期間を通して殆ど変化が見られない。これは、損傷を生じたフレームの剛性は平面内での捩れ抵抗には関与しないためであると考えられる。



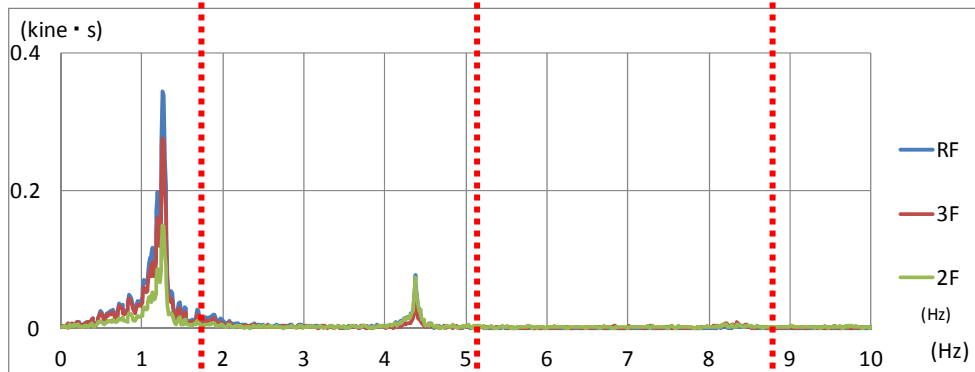
(a) <1> 振動特性計測 1 日目



(b) <2> 振動特性計測 2 日目



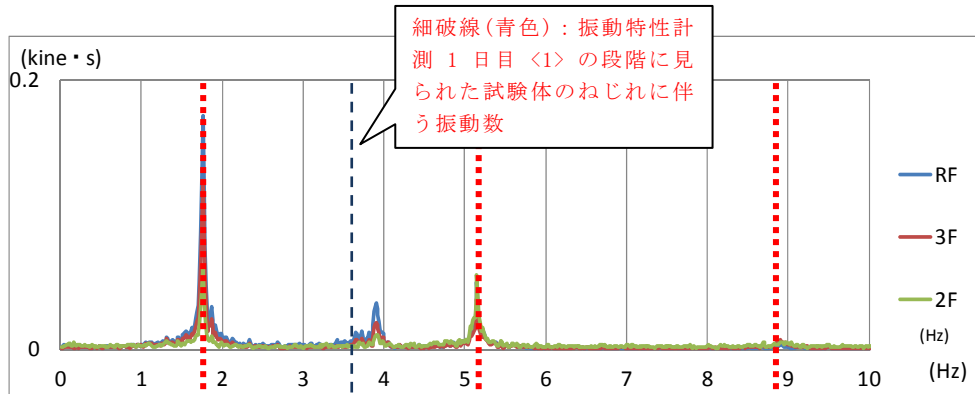
(c) <3> 振動特性計測 3 日目



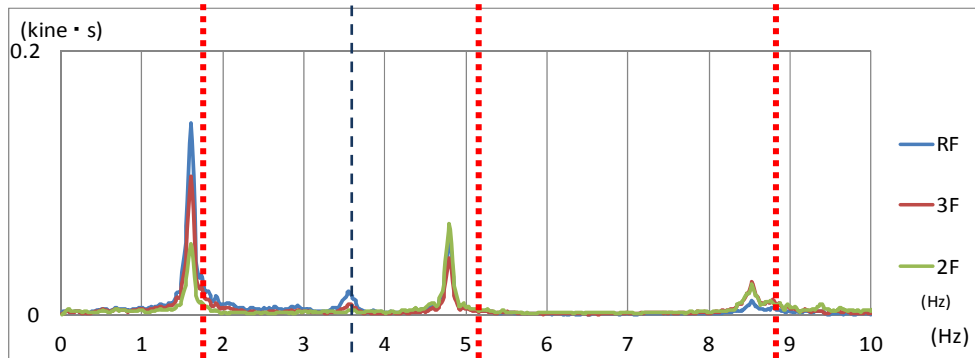
(d) <4> 振動特性計測 4 日目

図 7.3-11 常時微動計測データの FFT 解析結果 (センサー配置①)  
 (縦の太破線は、振動特性計測 1 日目 <1> の段階での卓越振動数を表す)

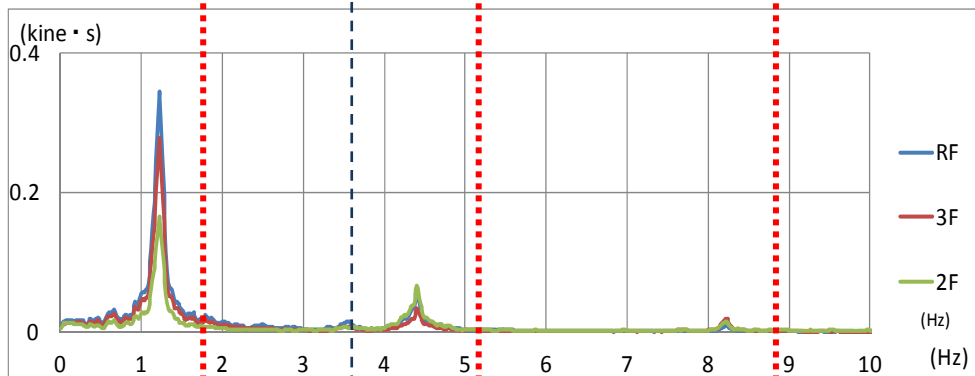




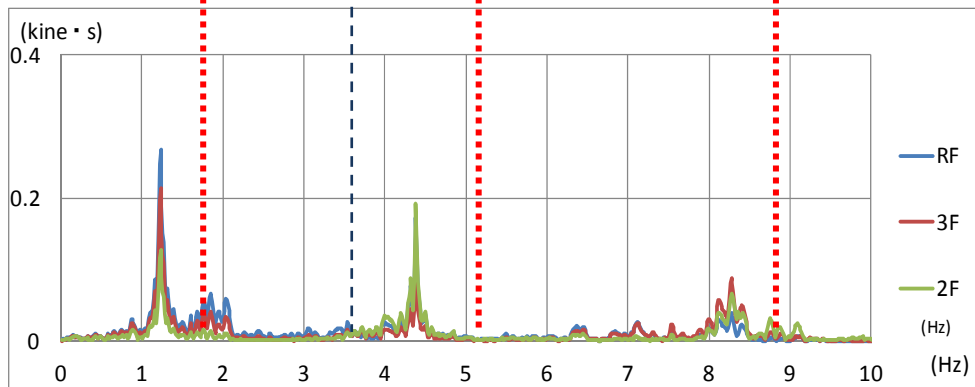
(a) <1> 振動特性計測 1 日目



(b) <2> 振動特性計測 2 日目



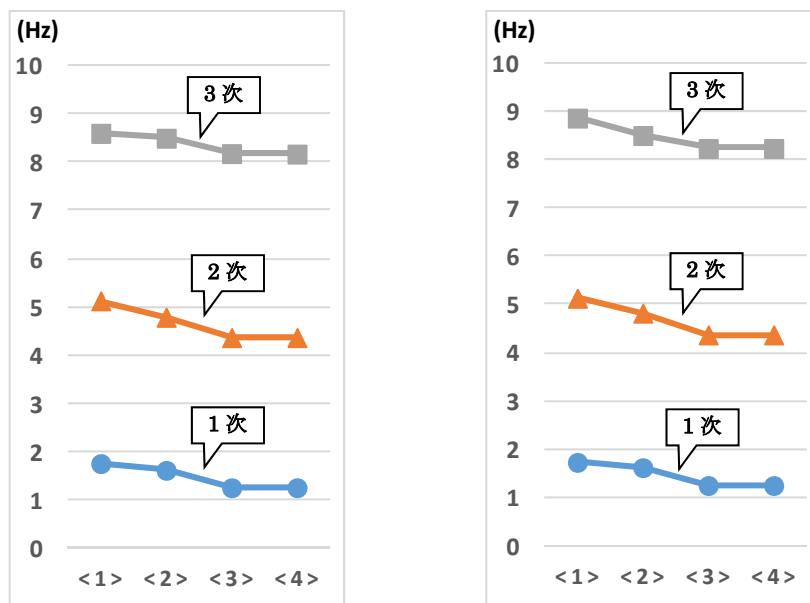
(c) <3> 振動特性計測 3 日目



(d) <4> 振動特性計測 4 日目

図 7.3-12 常時微動計測データの FFT 解析結果 (センサー配置②)  
 (縦の太破線は、振動特性計測 1 日目 <1> の段階での卓越振動数を表す)

図 7.3-13 (a) は、常時微動の計測結果から得られた各次の固有振動数の変化を、図 7.3-14 は <2> 以降の固有振動数について、<1> の状態の固有振動数に対する減少率を表している。図 7.3-14 から、JR 鷹取波 100%加振により大損傷が発生した前後の <2> → <3> の間の 1 次固有振動数の減少が大きいことが確認できる。また、<3> → <4> の間では固有振動数は各次ともほとんど変化が見られなかった。なお、図 7.3-13 (b) は、(a)と同様に、起振器によるランダム波入力時の固有振動数の変化を表しているが、この結果は、(a)とほぼ等しい。このことから、起振器によらない常時微動レベルでも、固有振動数の変動の評価は十分可能であることが確かめられた。



(a) 常時微動計測 (b) 起振器によるランダム波入力時

図 7.3-13 固有振動数の推移

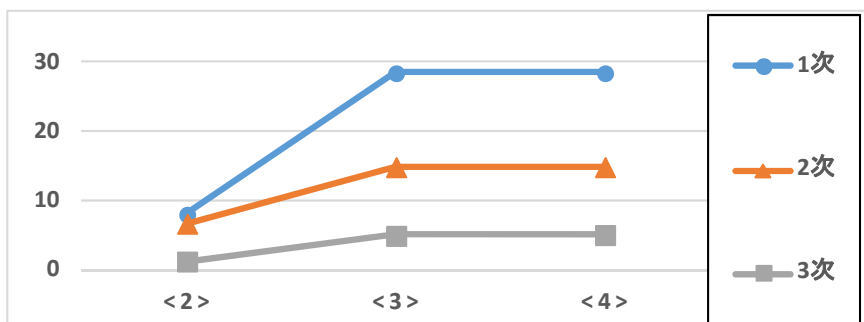


図 7.3-14 常時微動計測により評価した固有振動数の減少率

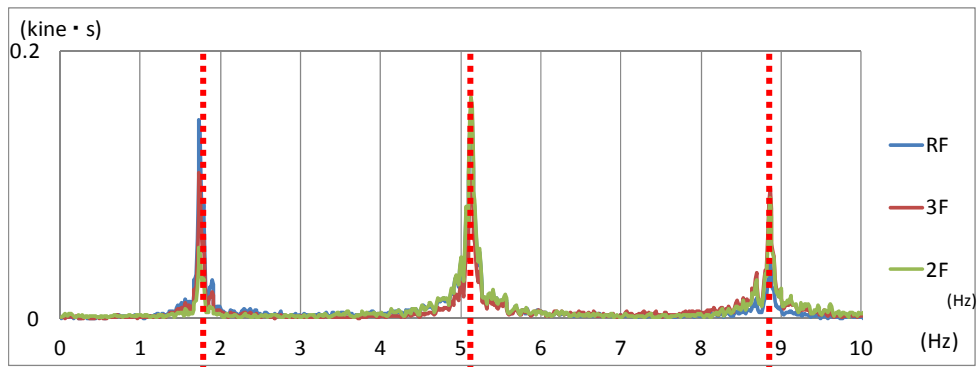
## (2) 起振器によるランダム波入力時の応答計測

図 7.3-15～図 7.3-17 に建物内で小型起振器によりランダム波入力を行った際の微振動応答に対するフーリエスペクトル解析の結果を示す。これらの図は、それぞれ、起振器を

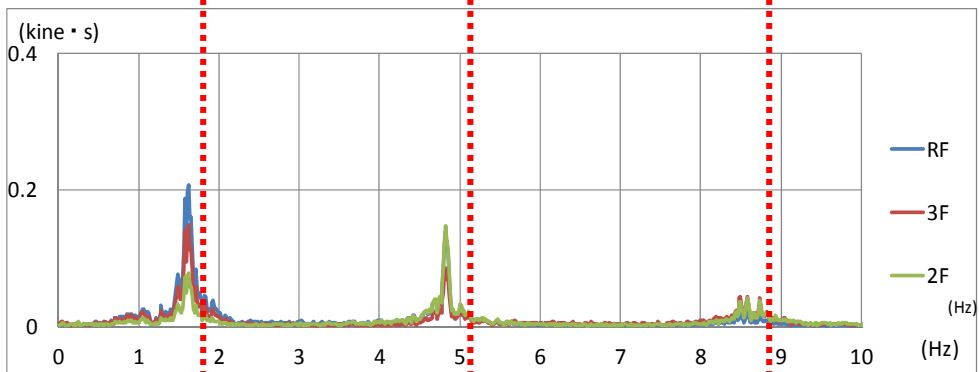
設置した階が、2階、3階、R階の場合に相当しており、図7.2-2(c)のセンサ配置での計測である。それぞれ、各層の速度応答のフーリエスペクトルを表しており、(a)～(d)の4つのスペクトル曲線は、上から順に振動特性計測日<1>～<4>での状態に対応している。なお、これらの図中に縦に引いた太破線は、振動特性計測1日目<1>の段階での卓越振動数を表している。2日目以降、並進1次～3次の各次の卓越振動数が小さい値に変動していることが分かる。微動計測の場合と同様、特に、JR鷹取波100%加振により大損傷が発生した前後の振動特性計測日にあたる<2>と<3>のスペクトル曲線を比較すると、並進の1～3次とも著しく低下していることが読み取れる。なお、これは、図7.3-13(b)に示す起振器によるランダム波入力試験での計測結果から得られた各次の固有振動数の変化によって確認できる。

なお、起振器による加振実験では、常時微動計測によるフーリエスペクトルでは明確に読み取れなかった高次の卓越振動数についても、加振位置を適宜変えることで、高次モードの分解能がよくなることが確認された。すなわち、対応する固有振動モードの腹に近い層に起振器を設置し、ランダム波入力を行うことが、比較的明瞭に高次の固有振動数、固有振動モードを推定することに有効であることが確認できる。なお、微動測定結果のスペクトルから推定された卓越振動数と、起振器によるランダム波入力試験結果のスペクトルから推定された卓越振動数の相違は、計測階・起振位置の異なる全てのケースにおいて、高々2～3%未満程度の誤差であることが確認されている。

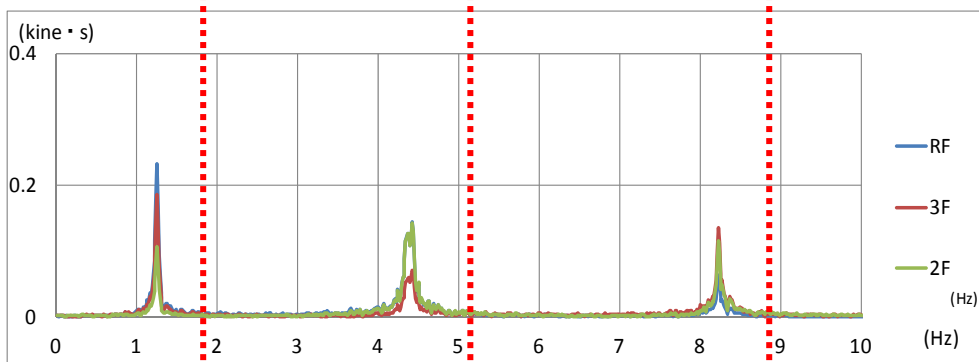
一方、各層で、起振器の加振位置を変えた実験も実施したが、今回の試験体では、水平構造面が比較的剛に近いと考えられるため、微振動レベルの加振状態では、加振位置を変えてもスペクトル曲線には有意な差異は見られなかった。本報の報告段階では、スイープ加振やサイン波加振の結果について、起振器の加振位置を変えた実験結果の相違がみられるかの検証は完了していないが、損傷個所を絞り込んでいく測定法の可能性については、引き続きデータを検証していくこととしたい。



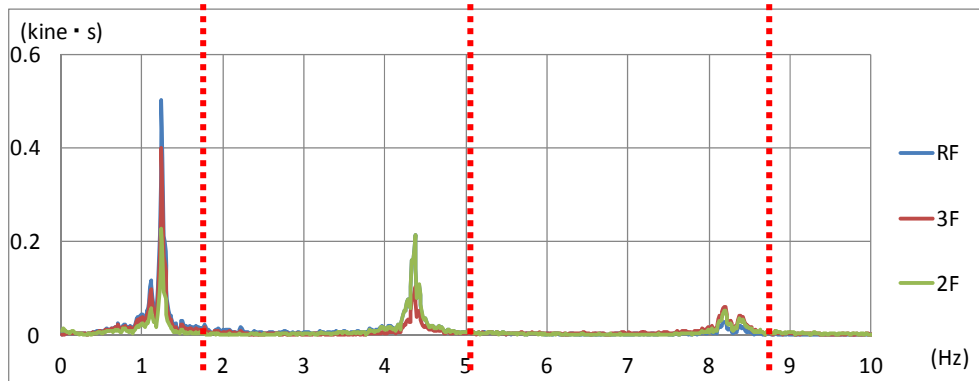
(a) <1> 振動特性計測 1 日目



(b) <2> 振動特性計測 2 日目

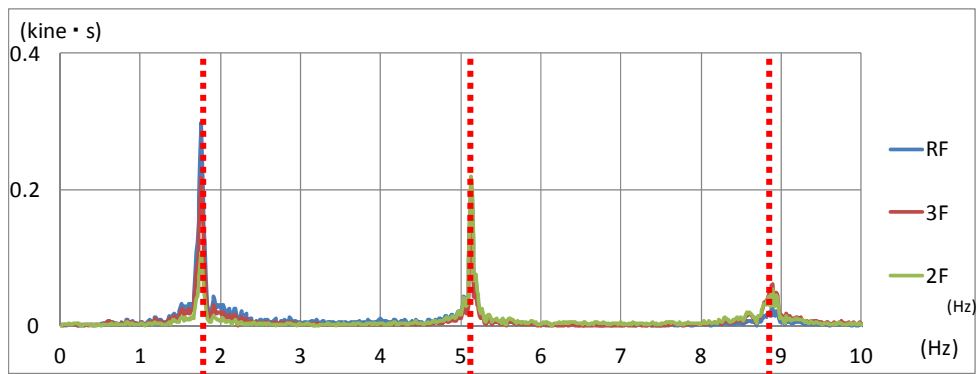


(c) <3> 振動特性計測 3 日目

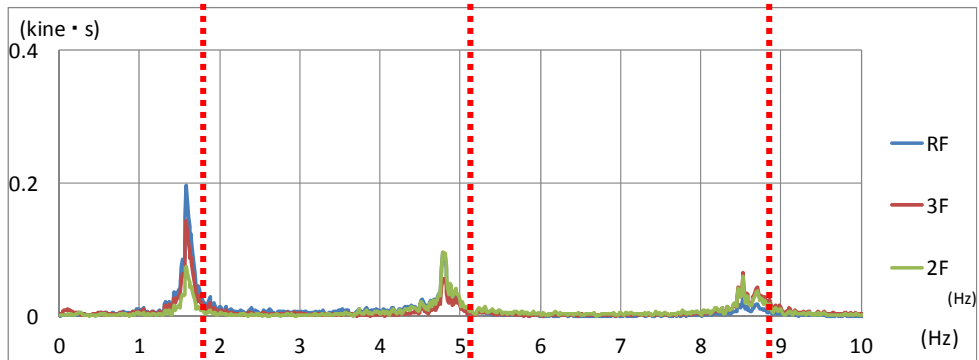


(d) <4> 振動特性計測 4 日目

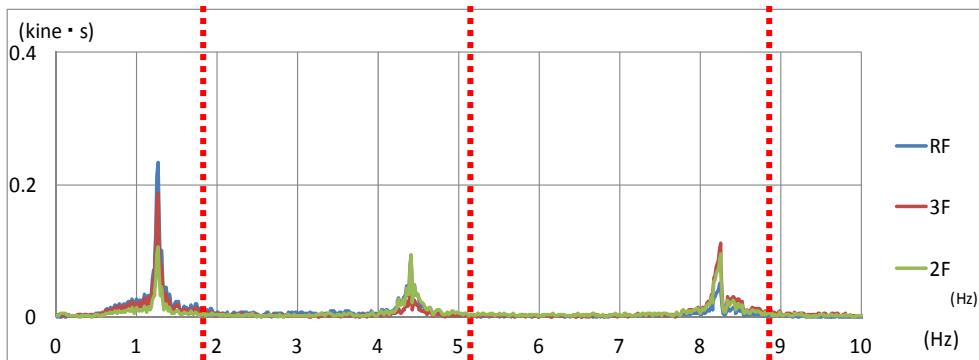
図 7.3-15 起振器によるランダム波入力時の FFT 解析結果（起振器設置：2 階）



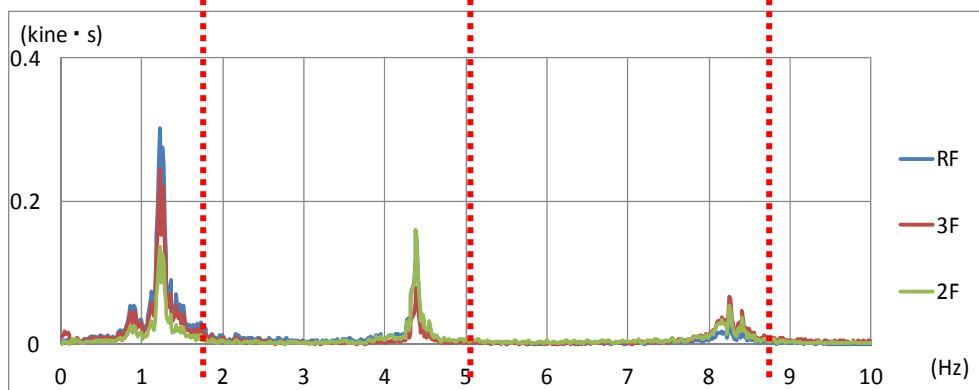
(a) <1> 振動特性計測 1 日目



(b) <2> 振動特性計測 2 日目

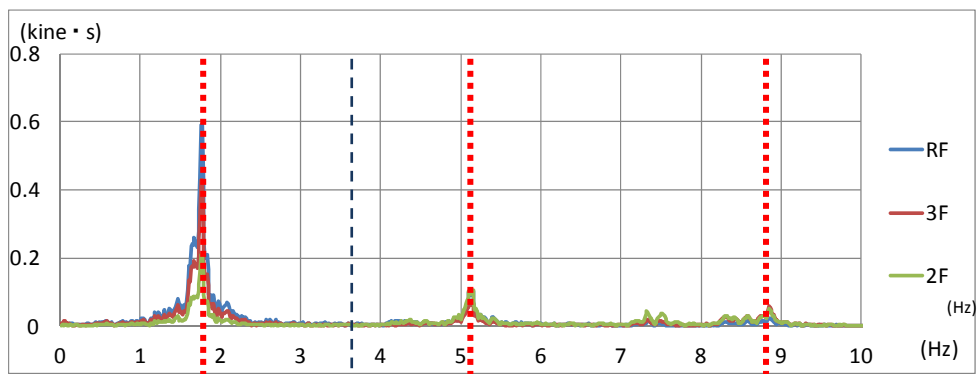


(c) <3> 振動特性計測 3 日目

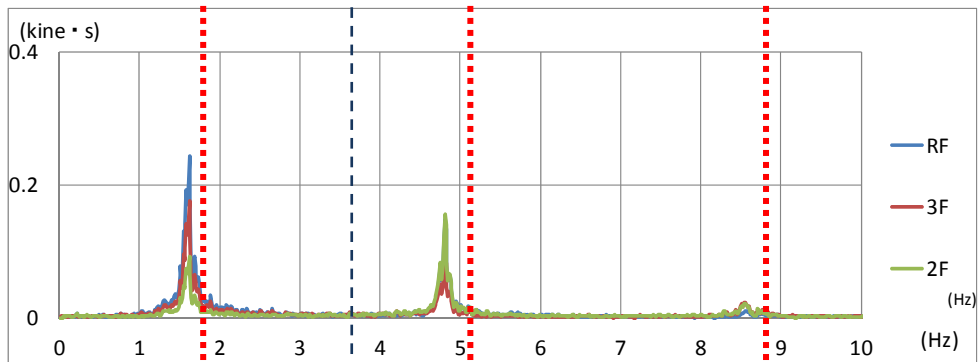


(d) <4> 振動特性計測 4 日目

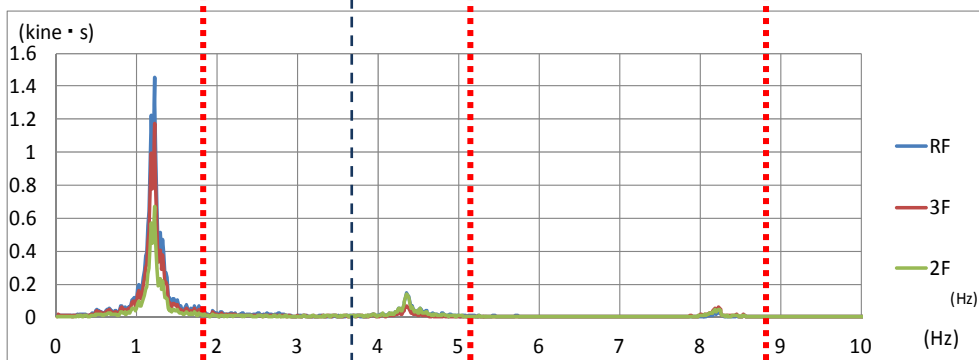
図 7.3-16 起振器によるランダム波入力時の FFT 解析結果（起振器設置：3 階）  
（縦の太破線は、振動特性計測 1 日目 <1> の段階での卓越振動数を表す）



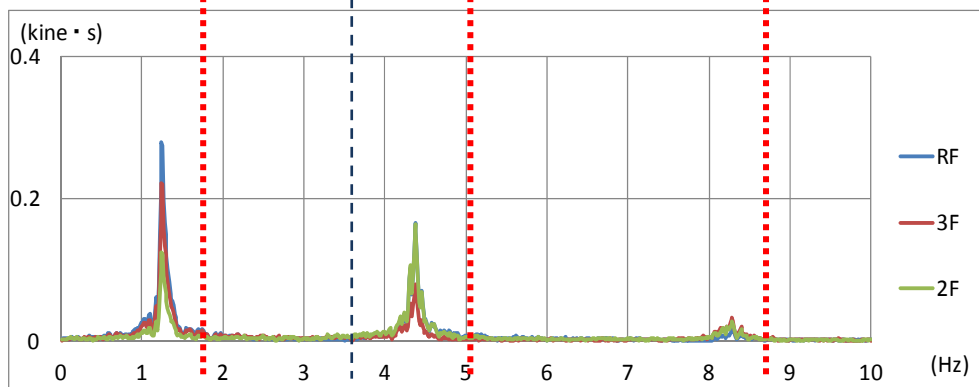
(a) <1> 振動特性計測 1 日目



(b) <2> 振動特性計測 2 日目



(c) <3> 振動特性計測 3 日目



(d) <4> 振動特性計測 4 日目

図 7.3-17 起振器によるランダム波入力時の FFT 解析結果（起振器設置：R 階）  
（縦の太破線は、振動特性計測 1 日目 <1> の段階での卓越振動数を表す）

### (3) 振動モード形状

微動計測の結果と起振器によるランダム波入力による応答計測の結果をもとに、スペクトル解析により、各次の固有振動モード図を作成した。各層のモード振幅には、速度のスペクトルの単位 (kine\*s) を用いている。なお、振動台加振実験の過程で生じた損傷の状態に応じた 1・2 層のモード振幅の変化を明確にするため、各次のモードとも最上層のモード振幅を 1 として基準化を行っている。

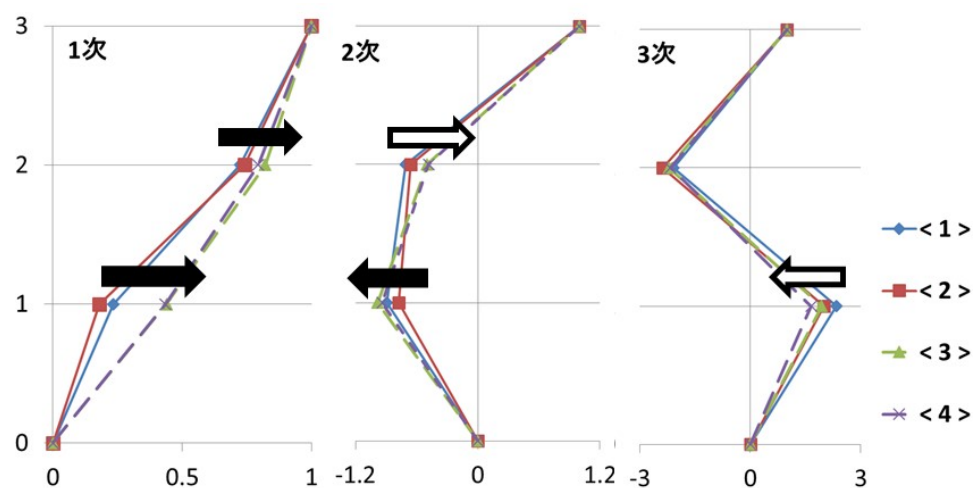


図 7.3-18 常時微動計測結果より得られた固有振動モード図

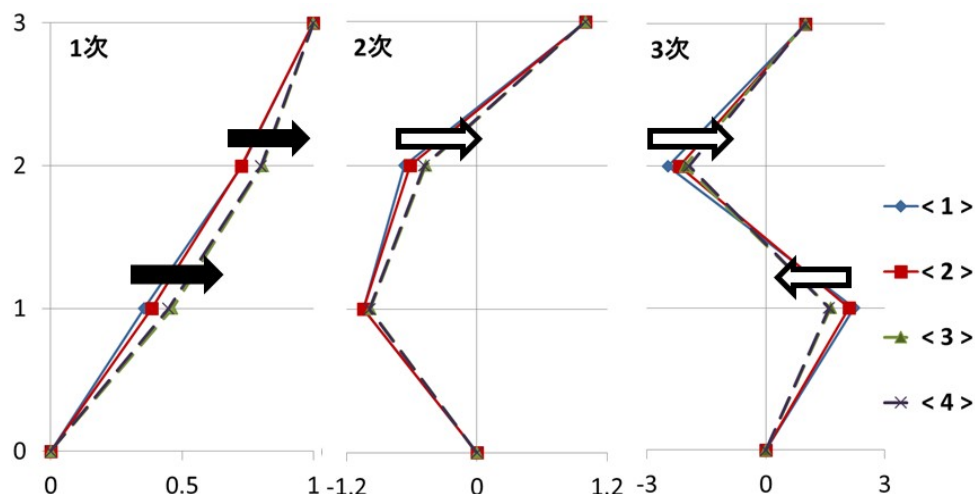


図 7.3-19 起振器によるランダム波加振応答計測結果により得られた固有振動モード図

図 7.3-18 は常時微動計測結果から求めた振動台加振実験日前後の振動特性計測日 <1> ~ <4> における振動モード形状の変化を示しており、同様に図 7.3-19 には起振器によるランダム波加振により得られた微振動応答計測結果から求めた振動モード図を示している。微動計測とランダム波加振計測によりそれぞれ推定した固有振動モード形状は、各次ともおおむね近い形状をしている。1 次モードに着目すると、JR 鷹取波 100%入力後には、3 層目に対して 1・2 層のモード振幅が大きくなっていることがわかる。1・2 層部分の梁端破断により、相対的に強くなった 3 層目の振幅が小さくなり、下層部が振られる形状とな

っていることがわかる。また、2次モードでは2層目(3階)のモード振幅が小さなり、3次モードでは1層目のモード振幅が小さくなっていることがわかる。

#### (4) 本加振と微振動レベル計測との比較

最後に、振動台加振実験でのランダム波入力結果から推定した固有振動数と、微振動レベルでの計測値(常時微動計測、ならびに小型起振器によるランダム波加振応答計測)により推定した固有振動数との比較を行う。表 7.3-3 にそれぞれの測定ステージで得られた計測データのFFT解析結果により推定した固有振動数の値をまとめて示す。微振動レベルでの振動特性計測によって得られた固有振動数の値は、振動台加振実験の計測データから得られた値よりも1~1.4倍程度高い値となった。

特に、1次の固有振動数については、JR 鷹取波 100%入力前では、微振動/振動台比率(固有振動数比)は1.2倍程度であったものが、JR 鷹取波 100%入力によりフレームに甚大損傷を受けた後には1.4倍程度に増加していることが確認される。なお、2次の固有振動数については、JR 鷹取波 100%入力前後の微振動/振動台比率(固有振動数比)は、1.07倍程度から1.15倍程度に微増、3次の固有振動数については、微振動/振動台比率(固有振動数比)はJR 鷹取波 100%入力前後でも、殆ど変化していない。

表 7.3-3 本加振実験との固有振動数の比較

		微動・起振器実験			振動台(ランダム波加振)			微振動/振動台 比率		
		1次	2次	3次	1次	2次	3次	1次	2次	3次
< 1 >	微動	1.76	5.13	8.60	1.56	4.83	8.52	1.13	1.06	1.01
	ランダム波	1.73	5.13	8.86				1.11	1.06	1.04
< 2 >	微動	1.62	4.79	8.50	1.36	4.47	8.20	1.20	1.07	1.04
	ランダム波	1.62	4.82	8.50				1.20	1.08	1.04
< 3 >	微動	1.26	4.37	8.18	0.89	3.80	7.77	1.42	1.15	1.05
	ランダム波	1.25	4.37	8.23				1.41	1.15	1.06
< 4 >	微動	1.26	4.37	8.17	0.87	3.76	7.66	1.45	1.16	1.07
	ランダム波	1.25	4.37	8.23				1.44	1.16	1.07

#### 7.4 まとめ

本取組みにおいては、まず振動台加振による実大実験結果に基づき、各地震波入力時の計測データと、その前後におけるランダム波加振による計測データから振動特性評価を行った。さらに、振動台加振による実大実験日の前後の日における常時微動計測、小型起振器による微振動応答計測に基づく振動特性評価を行った。これらの計測データの分析を行い、それらの計測過程を、実際の随時型構造健全度推定法の手順に結びつけることを念頭に、以下のような知見と問題提起をもってまとめとした。ただし、本速報の段階では、十分なデータの検証が未完の段階のものもあり、これらを今後精査し、明らかになった知見と問題点は今後別の段階で報告を行いたいと考える。



- ・ 振動台実験により、損傷に伴う固有振動数の明確な変動は、梁端破断という甚大損傷の発生後生じることが確認された。すなわち、振動特性試験の実施のみからは、このような梁端破断の直前までの兆候をとらえることは難しいと考えられるが、破断を生じた結果をとらえるという意味では、十分に有効な手法であることが確認された。
- ・ 常時微動計測、ならびに小型起振器によるランダム波入力による微振動計測から求めた固有振動数の変動からも、梁端破断のようなフレームの大損傷後における大幅な低下が確認された。
- ・ 微振動レベルの応答計測については、小型起振器によるランダム波入力において、起振器の設置位置を適宜観測したい振動モードを励起できる位置（層）に設置すれば、常時微動計測のみで振動特性を評価する場合よりも高次のモード推定が明確にできることが確認できた。
- ・ 層剛性の推定値を用い、固有値解析により求めた固有振動数の変化と、振動台によるランダム波加振計測の加速度データにおけるフーリエスペクトルから推定した固有振動数を比較した結果、いずれも損傷の進行に伴い減少傾向にあり、梁端破断の発生時に大幅に低下する事が確認された。さらに、損傷個所が生じた影響は、固有振動モード形状の変化を確認することで、直観的な評価支援に結びつくことがわかった。
- ・ 梁端破断が生じるような大地震前後における随時型モニタリング結果の比較が可能であれば、固有振動数の変動を明確に確認できる。このことは、震災後の構造健全度推定の精度向上のためには、震災前と震災後における随時診断のデータが得られており、これ等を比較することが、本質的な手順であることを裏付けているので、震災後のデータのみから随時構造健全度推定が行える手法が可能となったとしても、大地震に備えた事前の構造健全度の診断を受けることを合わせて行うことに意義があると考えられる。
- ・ 地震前後の微動計測、または起振器加振計測により観測される固有振動数の変化と、対象建物の弾性応答域の振動レベル（50Gal程度）の固有振動数との比率は、損傷が大きくなるにつれて大きくなる傾向がある。こうした特性を活用すれば、震災後のみのデータによる構造健全度推定の精度向上が可能となると考えられる。ただしこのためには、震災後に比較的レベルの大きな地震動応答をとらえること（すなわち、大地震後に対象建物に常設型計測センサを一定期間設置し、余震観測を行うこと）等のための、常時型計測を併用することが必要となるものと考えられる。

本研究成果は、特定の試験体におけるデータ収集の結果であり、汎用的な結果をとするのは早急ではあるが、上記の知見により得られた、随時型構造健全度推定のための計測情報活用の道理性について今後さらに数値解析や理論的分析と検証を進めていくこととした。最後に当初の研究計画策定時の狙いと、現段階で明らかになったことや問題点、継続して確認を進める必要のある今後の課題との関係について整理しておきたい。

1. 実際の損傷状態と固有振動数の変化の関係。また、微振動計測で得られる情報の分解能について。

2. 「随時型」計測を震災前に実施できない場合に、事後計測から損傷状態の発生の可能性を推定する手法に必要な課題。

(①グローバル・スキャンの実施のために)

微振動レベル計測データによっても、損傷による固有振動数の大きな変化は確認可能である(常時微動計測の適用性)。同様に、振動モード形状についても、微振動レベルからも損傷の発生状況を反映したモード形状の評価を行う。この際、起振器を設置する位置を各層に移動させ、モードの励起状況を確認する手法は有効である。

一方、地震後のみの計測によって、①グローバル・スキャンの診断を行うためには、振動モード形状を確認することとともに、余震計測による常設型の振動計測を合わせて行うことの有効性が考えられる。すなわち余震のような比較的大きなレベルの地震時応答による振動数同定結果と微振動レベルの振動数同定結果との比率から、損傷推定の有無の判断が行えることの可能性が示唆される。

また、建物が図面どおり正確に施工された場合の計算による固有振動モードを評価するためのモデルの構築と、これと実測値のずれが生じるときにその要因を特定できるような検証を行っていくことが今後の課題である。すなわち、設計図面通りの設計がなされた建物の固有振動数を評価する手法を一般化し、この値と微動計測結果との関係(特に被災していない建物)についてのデータベースを蓄積することを行っていけば、震災後の振動特性計測のみからの損傷推定精度を上げていく手掛かりとなると考えられる。

また、被災後でも余震の観測の結果を利用し、損傷個所の履歴の影響の検証、減衰の増加等を指標とすることを検討する。ただし、減衰の評価、サイン波の加振結果の評価については、現段階では検証中につき今後、別の機会に報告・公表したいと考える。

3. 損傷の可能性が見いだされた時にその可能性が高い層を絞り込むための随時型の計測法の活用可能性について(②レイヤー・スキャン実施のために)

一方で、起振器を用いた実験では、同一階で起振器の設置位置を変えることにより、振動伝播の様相から、損傷推定ができないかの可能性について検討を行ったが、本試験体のようにデッキスラブにRCスラブを打設した合成梁構造では面内の剛性が高く、各層の同一階での複数個所起振による振動特性の変化はほとんど確認できなかった。なお、スイープ波・サイン波による伝播特性から、損傷発生の影響の兆候がみられるかについては、現段階では検証中である。さらに、スイープ波加振については、今回1つの卓越振動数の周辺で、4分間程度の上昇下降計測を行ったが、共振点域での十分な振幅成長時間に達していなかったため、固有振動数の同定には十分な効果が得られなかった。スイープ波の活用方法については、今後の検討としたい。

#### 【参考文献】

- 1) 飯野夏樹, 金澤健司, 尾野勝, 佐藤大樹, 北村春幸, 長江卓也, 「地震損傷を受ける鉄骨高層建物の剛性モニタリング, 第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集 pp.1584-1590, 2010.
- 2) Kenji Kanazawa, Haruyuki Kitamura, Daiki Sato, Masashi Morimoto, Masaru Ono, Yakuya Nagae, "Vibration-based Damage Detection of a High-rise Steel Building before and after the E-defense Shaking Table Test", Proc. of 5th World Conf. on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Paper No. 5WCSCM-022, pp.1-13, 2010.
- 3) M. Kawashima, T. Suzuki, T. Hirata, "Damage Detection in a Structure Based on Shaking Test", Proc. of 5th World Conf. on Structural Control and Monitoring (5WCSCM), Paper No. 5WCSCM-152, pp.1-10, 2010.
- 4) 下村華子, 入江千鶴, 向井洋一, 難波尚, 「複数回加震を受けた鉄骨構造物の損傷に伴う振動特性の変化に関する研究(その 1・その 2)」, 日本建築学会近畿支部研究報告集, 第 54 号・構造系, 2014.