

第8章 常時建築構造性能モニタリングシステム

8.1 はじめに

地震の揺れを受けた建物を継続使用する場合、構造物の劣化・損傷の有無や継続使用の可否、補修・補強の必要性を判断する必要がある。また建物の長寿命化のためには、構造物のライフサイクルの各時点における劣化・損傷個所の把握が重要となる。しかし、建築物の構造部材は、天井や仕上げ材等で被覆されることが多く、構造部材そのものや接合部を調査するためには、多くの時間・コストが必要となる。このため、被災建物の構造部材の損傷を、短時間で容易に検出できる手法の開発が必要とされている。

このような背景から、近年、情報通信技術(ICT)の発展に伴い、センサや種々のシステムを用いた建築構造物の性能モニタリングに関する研究が、計画・構造・環境の各分野で活発に行われている(例えば参考文献1)～5)など)。

上記の研究を踏まえ、本章では地震作用時の構造物の応答を、簡易かつ容易に検出する手法として、比較的安価で入手可能なオープンソースハードウェアとセンサを用いてモニタリングシステムを構築し、実大構造物の振動実験に適用して得られた成果を記す。

具体的には、以下の実験を行った。

- ① 加速度センサを用いた加速度計測及び、計測データから算出した固有周期による建物損傷の検出
- ② 角速度センサを用いた柱梁接合部の角速度計測及び、計測データから算出した梁端回転角と角速度変化量による梁フランジ破断の検出
- ③ 角速度センサを用いた柱傾斜角の角速度計測及び、計測データから算出した層間変形角の精度の検証

8.2 実験方法

8.2.1 計測装置

(1) オープンソースハードウェア

オープンソースハードウェア (Open Source Hardware : 以下 OSHW) とは、ハードウェア情報が公開され、オープンソースのソフトウェアを用いて誰でも容易にシステム開発を行うことが可能なハードウェアで、近年、多くの OSHW のワンボードマイコンが利用可能となっている。ワンボードマイコンとは、1枚の基板上に、CPU、ROM、RAM、I/O 装置を搭載したマイクロコンピュータで、種々の性能を有するものが流通している。本研究では、OSHW の内、Arduino を用いる。Arduino にも多種の製品があるが、本研究ではその中から Arduino Uno を使用する。以下に、Arduino の有する特徴と仕様を示す。

① Arduino の特徴

Arduino とは、シンプルな入出力ボード (I/O ボード) と Processing 言語で実装された開発環境のことで、フィジカルコンピューティングのためのオープンソースプラットフォームであり、また、Windows, Macintosh, Linux 環境下で動作するマルチプラットフォームである。Arduino では、プログラムを「スケッチ」と呼び、ソフトウェアの Arduino IDE が無償でダウンロードでき、Java や C++ を用いたプログラミングよりも容易にプログラミング可能である。また、プログラムの書き込みが USB 経由で行えること、ハードウェアが低価格であることなどが特徴としてあげられる。

② Arduino ボード(ハードウェア)の概要

入出力ポートとしては、デジタル、アナログ合わせて 20 本の I/O ピンをもち、各ピンにコンピュータやセンサなどを接続することで情報をやりとりする。表 8.2-1 に Arduino 基板上に配される主なピンの種類と機能を示す。

表 8.2-1 Arduino 基板上のピンの種類と機能

ピン	機能
デジタル I/O ピン (pin 0-13)	HIGH, LOW のデジタル値の入力ポートまたは出力ポートとして、任意に設定できる。
アナログ IN ピン (pin 0-5)	0V から電源電圧 (Vdd) までの電圧 (Vinp) を入力し、以下の式でその値を読み取る (10bit A/D, 出力 : 0~1023 の整数値)。 アナログ入力値 = $(V_{inp}/V_{dd}) \times 1024$
Vdd	電圧出力 5V または 3.3V
GND	基準電位 0V

③ Xbee (無線通信デバイス)

Arduino は、基板上に種々のシールドと呼ばれる追加基盤を接続することにより、容易に機能を拡張することができる。Arduino には、有線 LAN や無線通信機能を付加するシールドが用意されているが、本研究では、ZigBee 規格の無線通信モジュールである Xbee を用いる。Arduino で使用可能な Xbee の規格は 2 種類あるが、ここではシリーズ 2 を用いる。ZigBee とは、低コストでワイヤレスセンサーネットワークを構築するのに適した無線通信

規格で、データ転送速度は他の無線 LAN に比べ低速で転送距離は短い、安価で、消費電力が少なく、複雑な設定をしなくてもネットワークを構築することができるという特徴を有している。表 8.2-2 に本研究で用いる XBee の特性を示す。

表 8.2-2 XBee の特性

RF データレート	250 Kbps	シリアルデータレート	1200 bps~1 Mbps
室内/アーバンレンジ	最大 40 m	動作温度	-40 °C~+85 °C
屋外/見通しレンジ	最大 120 m	動作湿度	0~95 %
送信出力	2 mW	電源電圧	2.1~3.6 VDC
受信感度(1%PER)	-96 dBm	送信電流	45 mA
周波数帯域	2.4 GHz	受信電流	40 mA

(2) 加速度及び角速度センサ(IMU Fusion Board)

IMU Fusion Board は、IMU3000 (三軸角速度センサ) と ADXL345(三軸加速度センサ)を搭載した IMU(慣性計測装置)であり、センサノードとの接続は I2C により行う。I2C (Inter-Integrated Circuit) とは、フィリップス社が提唱した周辺デバイスとのシリアル通信の方式である。IMU Fusion Board の特性を表 8.2-3 に示す。尚、本研究では、IMU3000 のみを Arduino に接続したものを角速度センサとして、IMU Fusion Board を Arduino に接続したものを加速度センサとして用いる。

表 8.2-3 IMU Fusion Board の特性

測定軸	3 軸加速度 3 軸角速度	レートノイズ(dps/ $\sqrt{\text{Hz}}$)	0.01
出力	I2C	電源電圧(VDC)	2.1~3.6
感度(LSB/° /sec)	131 65.5 32.8 16.4	フルスケールレンジ (° /sec)/(g) 任意に選択可	±250/±2 ±500/±4 ±1000/±8 ±2000/±16
クロック誤差(%) (-40~85°C)	1.0	消費電力(mW)	12

8.2.2 実験方法

(1) センサ設置位置

図 8.2-1 にセンサ設置位置及びデータ受信位置の概略図を示す。3 層試験体に設置したセンサは以下のとおりである。

- ・加速度センサ：A01 (2 階床面), A02 (3 階床面), A03 (R 階床面)
- ・角速度センサ：G01~G08 (梁端)
- ・角速度センサ：G09 (B 通り柱面), G10 (A 通り柱面)

図 8.2-2 に A01~A03 の設置状況, 図 8.2-3 に G01~G08 の設置状況, 図 8.2-4 に G09, G10 の設置状況を示す。また, 図 8.2-5 には試験体とデータ受信位置を示す。

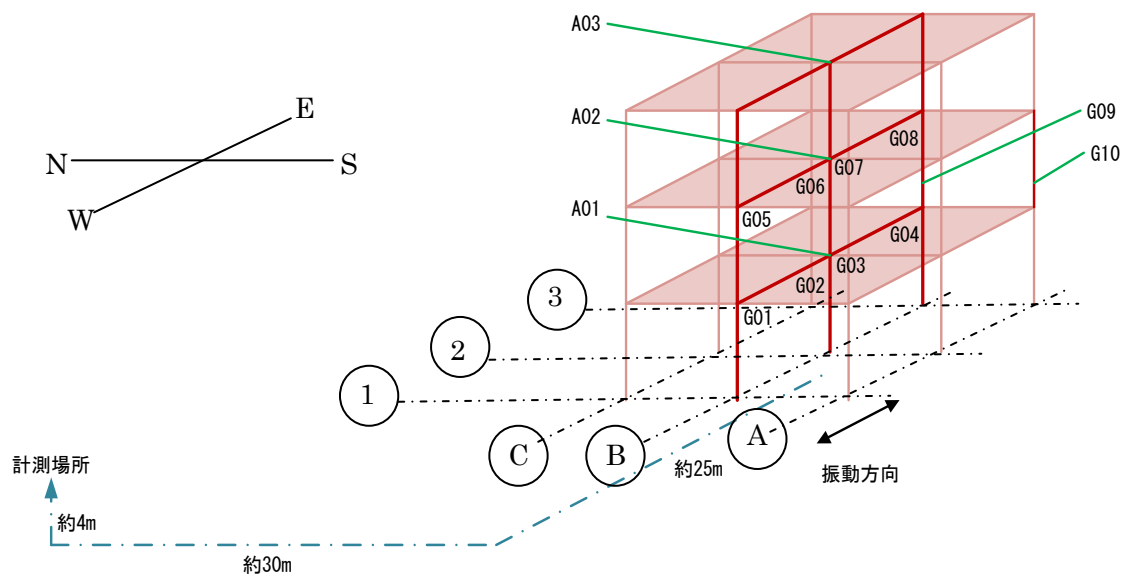


図 8.2-1 センサ配置位置及びデータ受信位置概略図

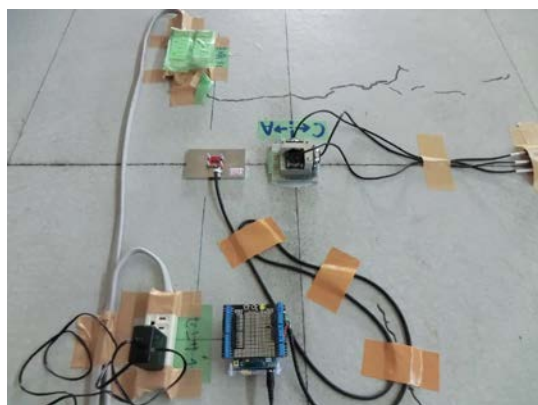


図 8.2-2 センサ設置状況 (A01～A03)



図 8.2-3 センサ設置状況 (G01～G08)



図 8.2-4 センサ設置状況 (G09, G10)



図 8.2-5 データ受信位置

(2) Arduino と Xbee 無線通信を用いた計測システム

図 8.2.6 に計測システムのフローチャートを示す。各センサノードは電源が入ると待機モードに入る。待機モードでは、決められたサンプリング間隔で加速度及び角速度を計測する。実験が開始され、試験体に変形が生じることによりトリガー1 に設定された基準値を超える値が計測されると、記録モードに入り、計測値をSDカードへ記録する。記録モードは、トリガー2 で設定された基準値を下回る状態が2分継続したと判断されるまで継続し、観測値をSDカードに記録し続ける。トリガー2により揺れが収まったと判定されると、センサノードは記録モード中に計測したデータの最大値を無線によりデータ送信を行う設定とした。

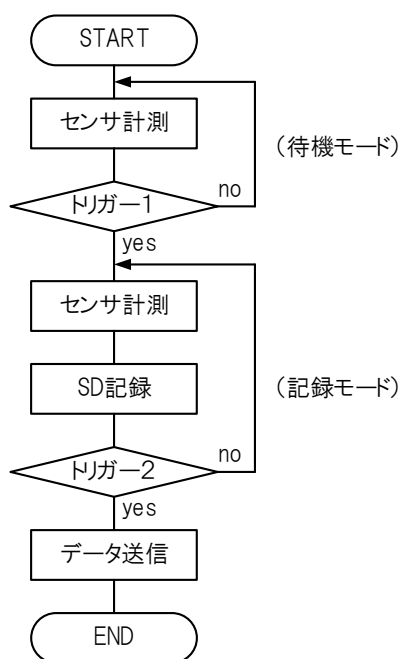


図 8.2-6 計測システムのフローチャート

8.3 実験結果及び考察

8.3.1 Xbee による無線通信状況について

表 8.3-1 に Xbee 無線通信の成否を示す。表より、無線通信の成功率は約 76%であった。本研究では、各センサから計測データをサーバに直接受信する方式としたが、2 階の 1 通に設置した G05 では 100%の受信率だったが、2 階梁の 2 通東側に設置した G07 では成功率は約 50%となり、通信状況に大きな差が見られた。これは、障害物の有無や受信位置が影響したためと考えられる。

表 8.3-1 Xbee 無線通信状況

		A01	A02	A03	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	成功率
10/8		2F 床	3F 床	RF 床	2F 梁				3F 梁				2F 柱		
13:00	南海 35%	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	0.77
13:10	南海 45%	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	0.77
13:20	南海 50%	○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	×	0.77
14:00	南海 50%	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	○	×	0.77
14:30	南海 100%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	×	0.77
16:30	鷹取 40%	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	0.92
10/10															
11:33	鷹取 60%	×	×	×	×	×	×	×	○	○	×	○	○	○	0.38
14:00	鷹取 80%	○	○	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	0.69
16:20	鷹取 100%	○	○	×	○	×	○	○	○	○	×	○	○	○	0.77
10/15															
13:45	南海 50%	×	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	0.77
15:15	南海 100%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	×	○	0.85
15:40	南海 150%	○	○	×	○	○	○	×	○	○	○	○	○	○	0.85
成功率		0.83	0.67	0.67	0.75	0.67	0.92	0.75	1.00	0.83	0.50	0.92	0.75	0.58	0.76

○：成功，×：失敗

8.3.2 SD カードへのデータ保存状況について

表 8.3-2 に SD カードへのデータ保存の成否を示す。なお、10 月 8 日に無効なデータが多い原因は、センサノード制御プログラムにおいて、計測終了判定の閾値の設定が小さすぎたため、揺れを感知したときだけセンサノードを作動させる制御が適切に機能しなかったためであり、10 月 10 日からのものは、プログラムの修正（閾値を大きくすること及び、揺れが無いと判断する時間を長くすること）を行っている。10 月 8 日の SD カードへの記録状況を検討し、計測プログラムの制御プログラムを修正したことにより、10 月 10 日からは SD カードへの記録状況は約 95%となった。なお、SD カードへの記録状況で、2 階柱に設置した G10 の SD カードの記録状況が約 58%、10 月 10 日の鷹取 60%加振時の SD カードへの記録状況が約 69%と低い値となったのは、センサが計測した加速度及び角速度が閾値を超えなかったため、トリガーが作動しなかったことによるものと考えられる。

表 8.3-2 SD カードへのデータ保存状況

		A01	A02	A03	G01	G02	G03	G04	G05	G06	G07	G08	G09	G10	成功率
10/8		2F 床	3F 床	RF 床	2F 梁				3F 床				2F 柱		
13:00	南海 35%	▲	▲	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	○	▲	×	0.15
13:10	南海 45%	▲	▲	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	×	0.08
13:20	南海 50%	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	×	0.23
14:00	南海 50%	○	○	○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	×	0.23
14:30	南海 100%	○	○	○	▲	▲	▲	▲	○	▲	▲	○	○	×	0.46
16:30	鷹取 40%	○	○	○	▲	▲	▲	○	▲	▲	▲	▲	○	○	0.46
10/10		/			/				/				/		
11:33	鷹取 60%	○	○	×	×	○	×	×	○	○	○	○	○	○	0.69
14:00	鷹取 80%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.00
16:20	鷹取 100%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.00
10/15		/			/				/				/		
13:45	南海 50%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.00
15:15	南海 100%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.00
15:40	南海 150%	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	1.00
成功率		0.83	0.83	0.92	0.42	0.50	0.42	0.50	0.58	0.50	0.50	0.67	0.67	0.58	0.61

○：成功，▲：データ欠損，×：失敗

8.3.3 加速度計測結果について

(1) 計測データの誤差について

表 8.3-2 に示したように、A01～A03 の計測結果を総合すると、加速度応答に関して 31 ケースの加振時計測データが得られたが、ここでは、加速度センサごとに例として 1 ケースの計測データを示すと共に、各加振時に計測された加速度の絶対値の最大値をまとめた図を図 8.3-1～8.3-6 に示す。また各図において、比較対象として防災科研が設置した加速度計で計測した情報も併せて記載している。尚、両者のデータは時刻同期が取れていないため、得られた加速度波形の最大加速度の時刻を合わせて表記した。また、以降本研究で設置したセンサで計測したデータを「元データ」、防災科研が設置したセンサで計測したデータを「比較データ」と呼ぶこととする。

図 8.3-1～8.3-3 に示すように、元データと比較データは、時刻歴波形の振幅、位相ともに大きな差は見られなかった。また、両者の誤差は、表 8.3-3 に示すように最大で約 19.90%程度となり、10月8日は10%を超えるものが多かったが、10月10日以降は6%未満であり、比較的良い精度を有していることがわかる。また、上階の加速度センサになるほど誤差が大きくなる傾向が見られ、加速度応答値が大きい場合に計測誤差が大きくなる傾向があった。この現象の理由については今後の検討課題とする。

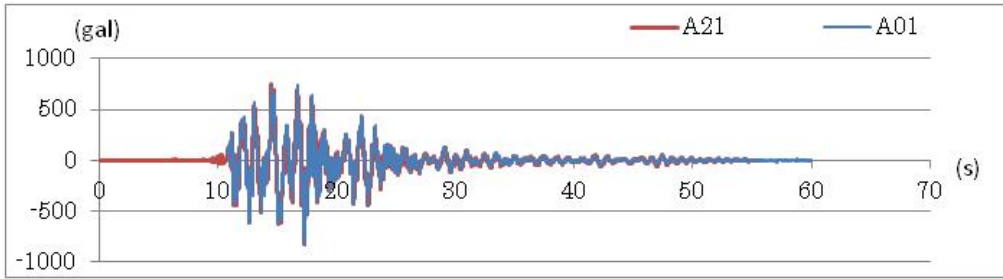


図 8.3-1 元データ (A01) 比較データ (A21) 地震波：鷹取 80%

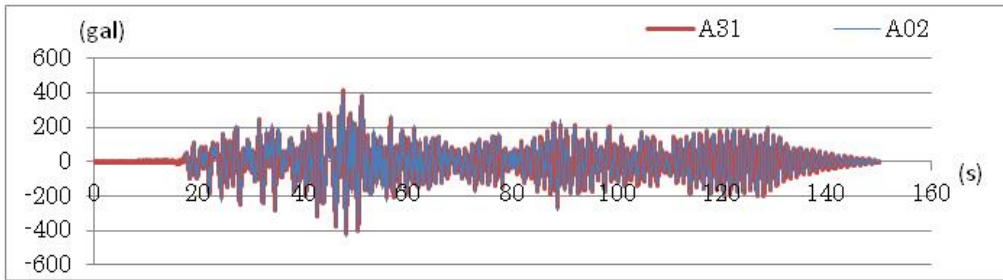


図 8.3-2 元データ (A02) 比較データ (A31) 地震波：南海 150%

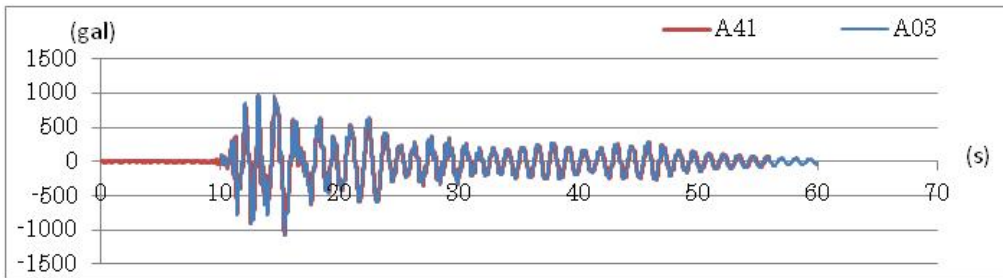


図 8.3-3 元データ (A03) 比較データ (A41) 地震波：鷹取 100%

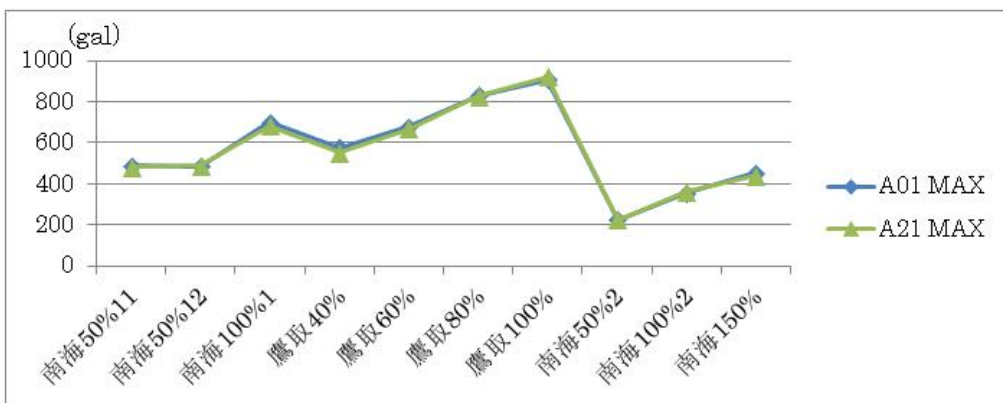


図 8.3-4 元データ (A01) 比較データ (A21) 最大値の比較

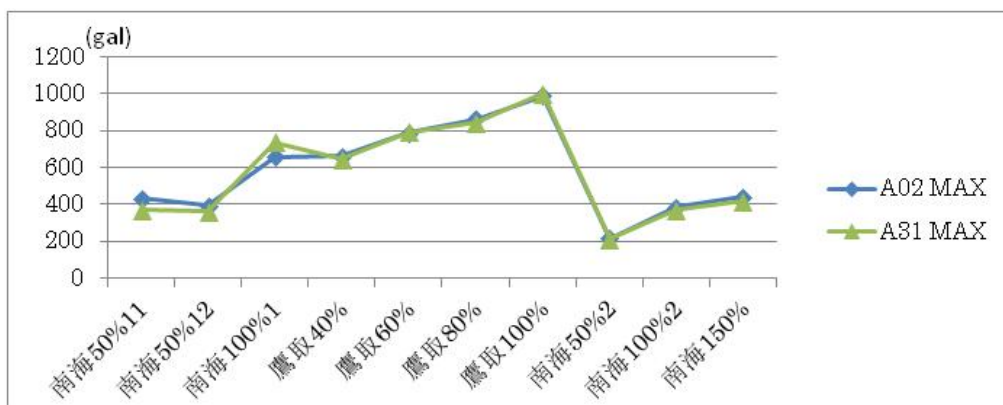


図 8.3-5 元データ (A02) 比較データ (A31) 最大値の比較

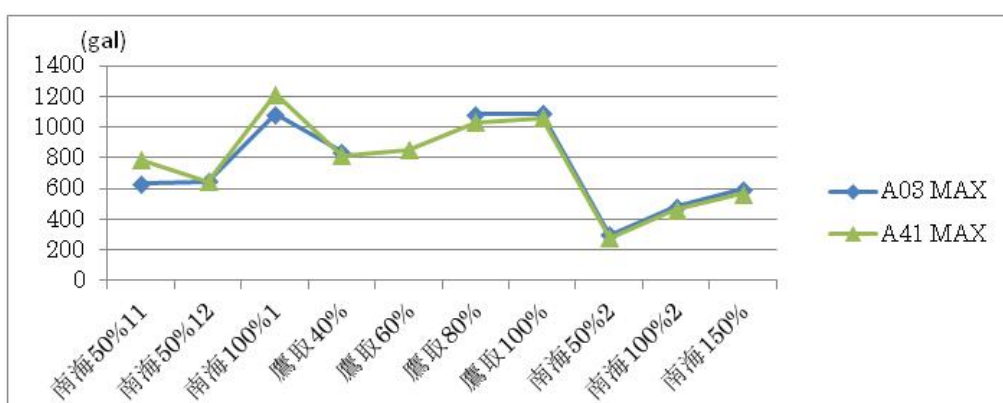


図 8.3-6 元データ (A03) 比較データ (A41) 最大値の比較

表 8.3-3 元データ (A01~A03) と比較データの最大加速度の誤差

		A01	A02	A03	MAX
10月8日	南海 50%	1.46%	16.44%	19.90%	19.90%
	南海 50%	0.95%	8.19%	0.21%	8.19%
	南海 100%	2.38%	10.90%	10.79%	10.90%
	鷹取 40%	4.62%	2.20%	3.14%	4.62%
10月10日	鷹取 60%	1.63%	0.24%		1.63%
	鷹取 80%	0.23%	2.53%	5.02%	5.02%
	鷹取 100%	1.30%	1.07%	2.56%	2.56%
10月15日	南海 50%	0.15%	1.00%	5.56%	5.56%
	南海 100%	2.11%	3.70%	3.81%	3.81%
	南海 150%	2.87%	5.73%	5.22%	5.73%
MAX		4.62%	16.44%	19.90%	19.90%

(2) 固有周期の変化について

元データ (A01, A02) を FFT 解析することで固有周期を求めた。また、比較データについても同様に固有周期を算出し、その結果と比較を行った。さらに、梁鉄骨フランジが破

断した鷹取 100%加振時の元データ (A02) を用いて、200 データごとのランニングスペクトルを求めた。尚、FFT 解析は、通常等間隔で計測されたデータを用いて行われるが、実験システムで計測された絶対加速度の計測間隔にはばらつきが見られた。ばらつきは、計測初期に多く見られたため、ここでは、計測間隔にばらつきの見られた初期のデータを除いて、計測間隔がほぼ一定のデータを用いて、計測間隔を設定値の 0.033s として FFT 解析を行うこととした。ただし、Arduino 加速度センサの計測データ数とデータの継続時間は、データの継続時間(s)=(計測データ数-1)×0.033(s)となり、両者は一致している。なお、FFT 解析に用いるデータは、フィルタ処理等は行わず、計測された原波形を用いた。

図 8.3-7~9 に、元データ (A01, A02) 及び比較データ (A21) の一次~三次固有周期の比較を示す。また、ランニングスペクトルは、開始点を 0 から 100 データずつずらし、各開始点からの 200 データを用いる。このため、データ数はそれぞれ 200 データとなるが、200 個のデータに後続の 0 を追加し、データ数 2048 個として FFT 解析を行った。図 8.3-10 に鷹取 100%加振時のランニングスペクトルを示し、図 8.3-11 にランニングスペクトルによる各区間の一次固有周期の変化を示す。なお、図中の時間は、FFT 解析に用いたデータの時間ではなく、E-Defense 実験の加振時間に調整したものを示している。

図 8.3-7~9 より、元データと比較データを用いた FFT 解析結果による固有周期は、値、定性的傾向共に一致しており、十分な精度を有していることがわかる。鷹取 100%加振時までは一次固有周期、二次固有周期、三次固有周期共に、周期は長くなり、損傷が進んでいることがわかる。また、その後の南海 50%から南海 150%加振時では、鷹取 100%加振時と比べると、若干固有周期は短くなるがほぼ一定の値となっており、鷹取 100%加振時に破断などの大きな損傷が建物に発生し、それ以降は損傷が進展していないと判断することができる。さらに、図 8.3-11 に示すランニングスペクトルの結果から、14.17s~20.737s の間で固有周期が伸びていることがわかる。このことから、鷹取 100%加振時の、14.17s~20.737s の間で建物に大きな損傷が起きたと判断できる。

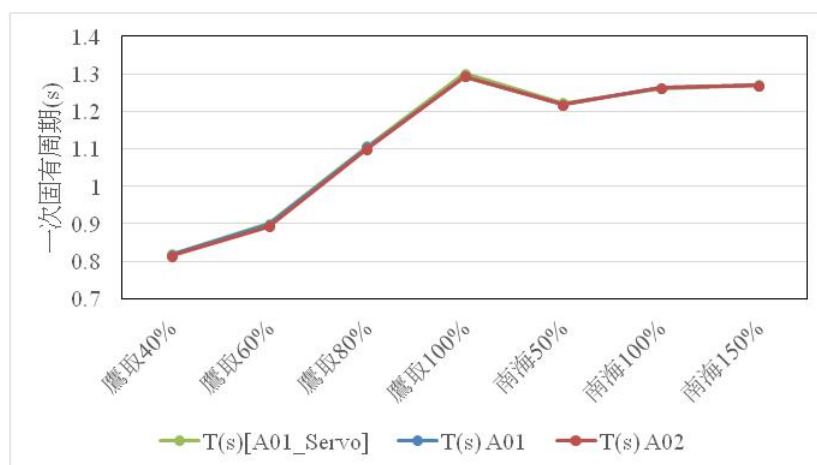


図 8.3-7 一次固有周期

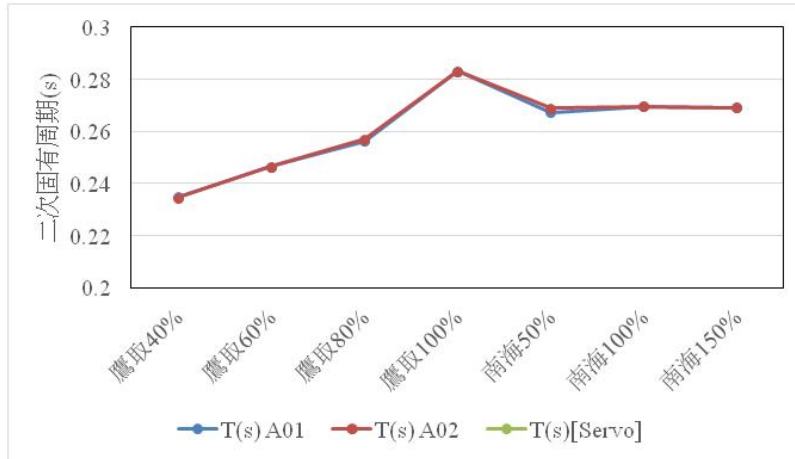


図 8.3-8 二次固有周期

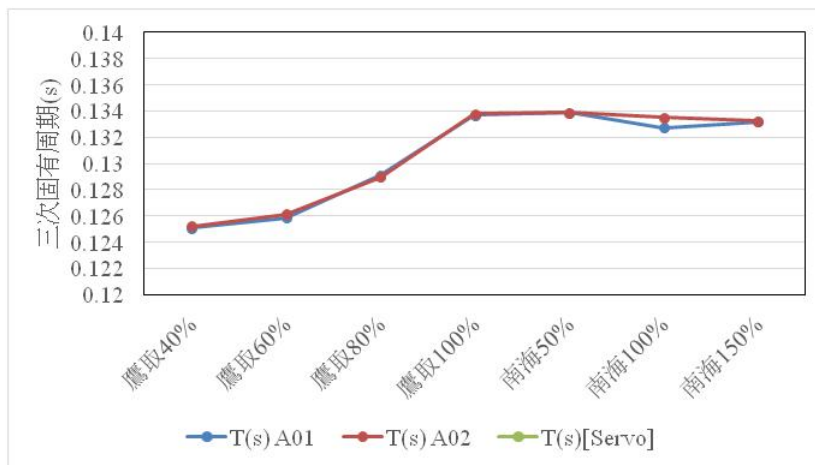


図 8.3-9 三次固有周期

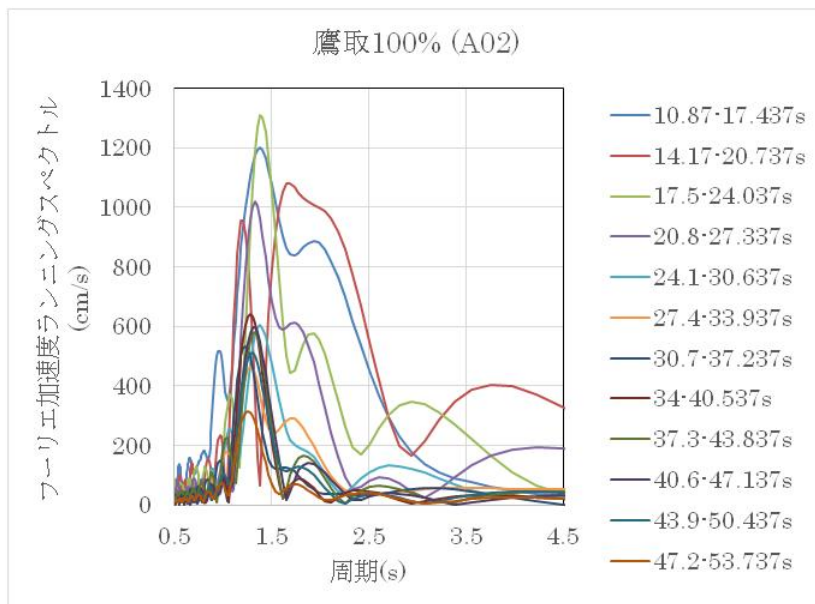


図 8.3-10 ランニングスペクトル (鷹取 100%)

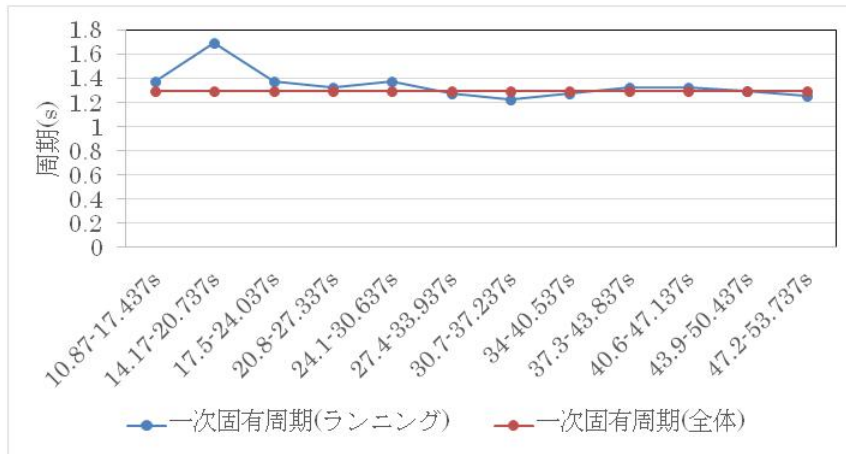


図 8.3-11 各区間の一次固有周期の変化（鷹取 100%）

8.3.4 角速度計測結果について

(1) 角速度及び角速度の変化量に関する考察

2階梁端部に設置した角速度センサ（G01, G03, G04）で計測したデータから、鷹取 40%～南海 150%の 7 回の加振実験のうち、計測データが SD カードに記録されていた角速度の最大値を図 8.3-12 に示し、角速度の変化量（角速度の微分値）の最大値をを図 8.3-13 に示す。また、同様に 3 階の梁端部（G05, G06, G07）に関しても図 8.3-14, 15 に示す。尚、2 階の G02 及び、3 階の G08 については、角速度、変化量ともにドリフトが大きかったため、ここでは比較対象から除外した。

実験で 2 階では梁フランジが破断したのは G01, G04 であったが、図 8.3-12, 13 より、鷹取 100%加振時に角速度がそれぞれ 11.2, 9.8 rad/s, 変化量は 300, 503 rad/s²であり、破断前後の計測結果及び破断しなかった G03 との比較からも、顕著な差異が認められる。3 階の梁の中では G05 に亀裂が入ったが、図 8.3-14, 15 より、鷹取 100%加振時に角速度が 46 rad/s, 変化量は 333 rad/s²であり、こちらも亀裂の前後及び他の梁での計測値との比較から、比較的大きな差異が認められる。このように、各階単位で計測値を比較すると、破断や亀裂発生が生じた梁には、他と比較して顕著な差異があったが、定量的に閾値を決定することは今回の結果からは難しいことがわかる。つまり、角速度に関していえば、2 階では 10 rad/s 以上で梁が破断したと考えられるが、3 階では 10 rad/s を観測しても梁は破断しておらず、46 rad/s で梁に亀裂が生じる結果となっている点である。

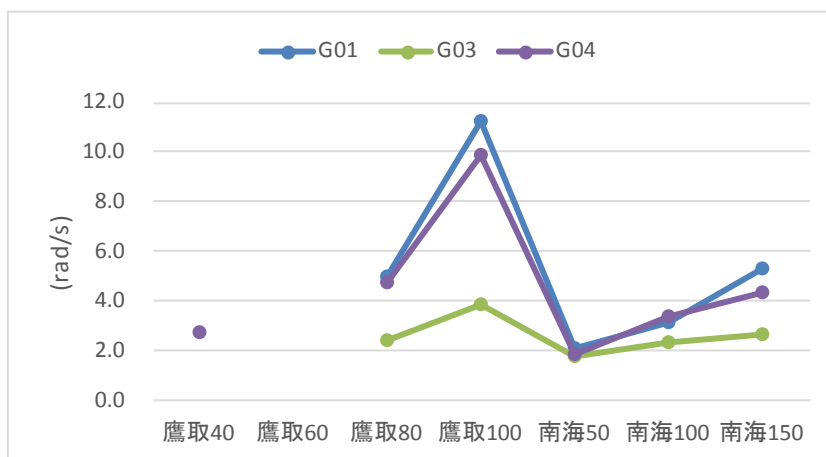


図 8.3-12 角速度の最大値 (2 階 : G01, G03, G04)

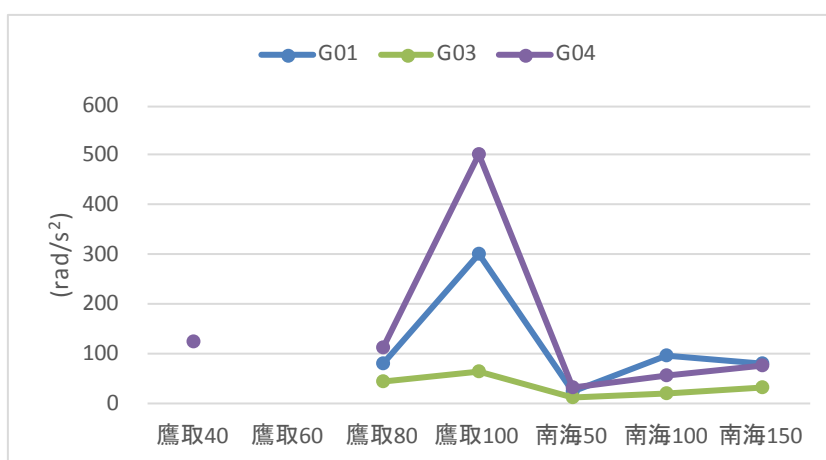


図 8.3-13 変化量の最大値 (2 階 : G01, G03, G04)

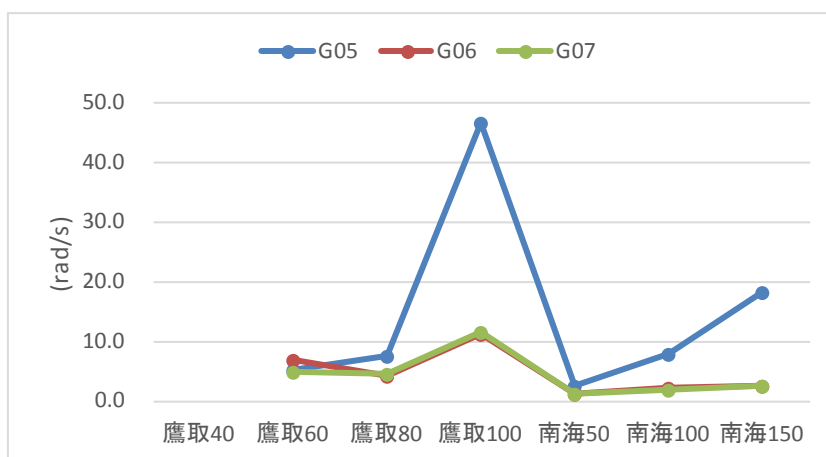


図 8.3-14 角速度の最大値 (3 階 : G05, G06, G07)

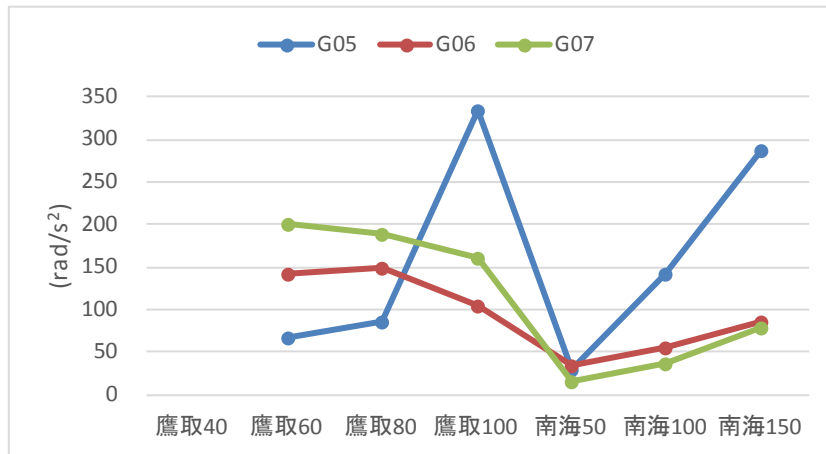


図 8.3-15 変化量の最大値 (3 階 : G05, G06, G07)

(2) 梁端回転角に関する考察

原則的には、角速度を積分することにより角度を求めることができる。ここでは、計測された角速度を基に角度を算出してその精度について考察を行う。但し、単純に積分しただけではドリフトが大きかったので、図 8.3-16 に示すように、最小 2 乗法を用いた傾き補正及びオフセット補正を行い、手作業で修正を施した。また、比較対象としては防災科研が設置したワイヤ式変位計で計測したデータを変換したものを「比較データ」とした。ただし、元データの計測装置は柱梁接合部の近傍に設置したのに対して、比較データの計測位置は柱梁接合部から 1.5m ほど離れた位置に設置したため両者を単純に比較することはできないが、変形が小さい範囲では大きな差はないと考え、ここでは比較対象として取り扱うことにする。図 8.3-17 以降に、例として両者の比較及びまとめの図を示す。尚、図中 G○○は元データから算出した角度を示し、D○○は比較データから算出した角度を示す。

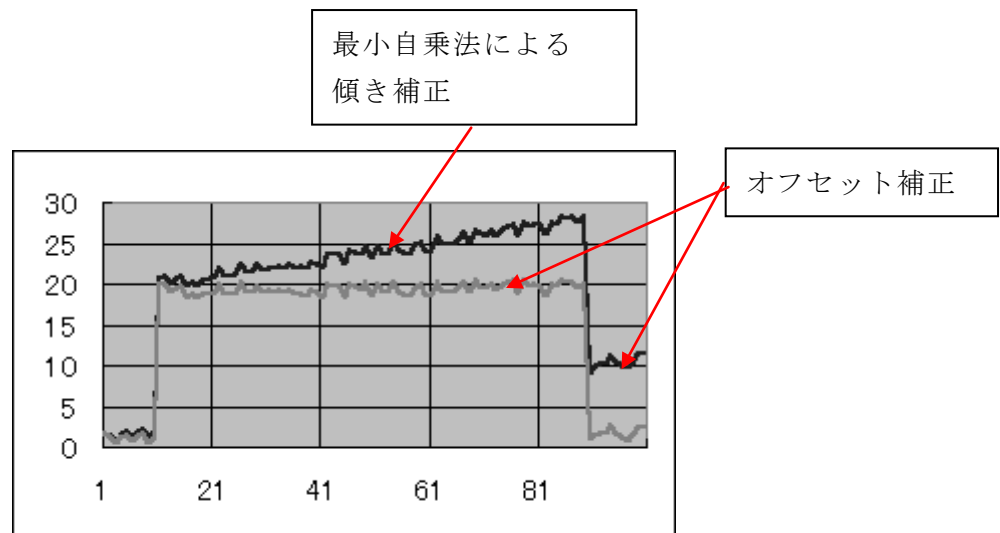


図 8.3-16 角度の補正方法

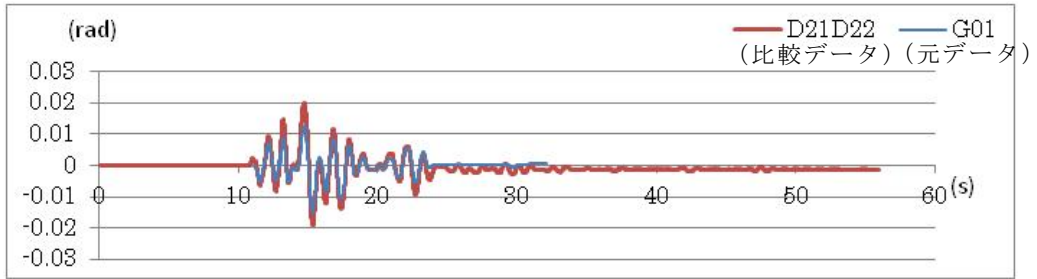


図 8.3-17 角度の比較 (G01, 鷹取 80%)

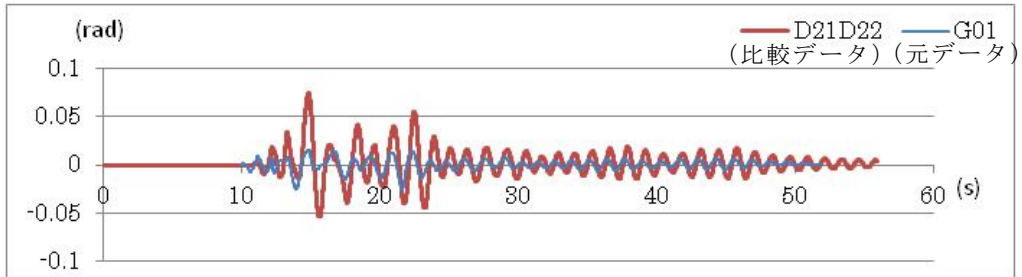


図 8.3-18 角度の比較 (G01, 鷹取 100%)

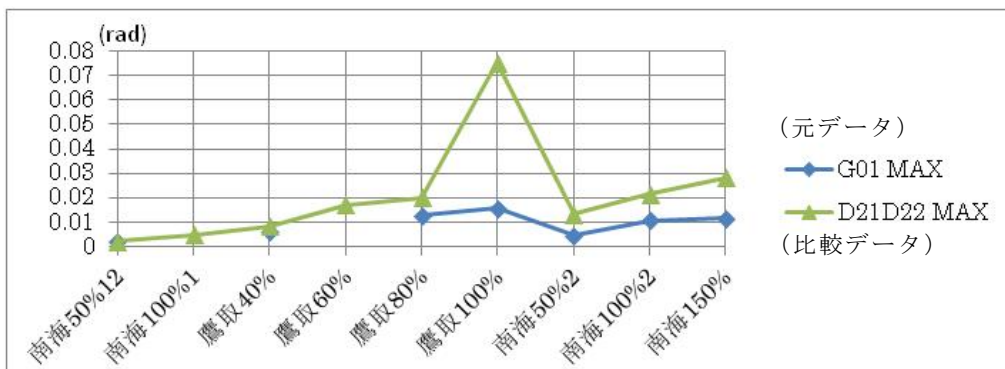


図 8.3-19 角度最大値の比較 (G01)

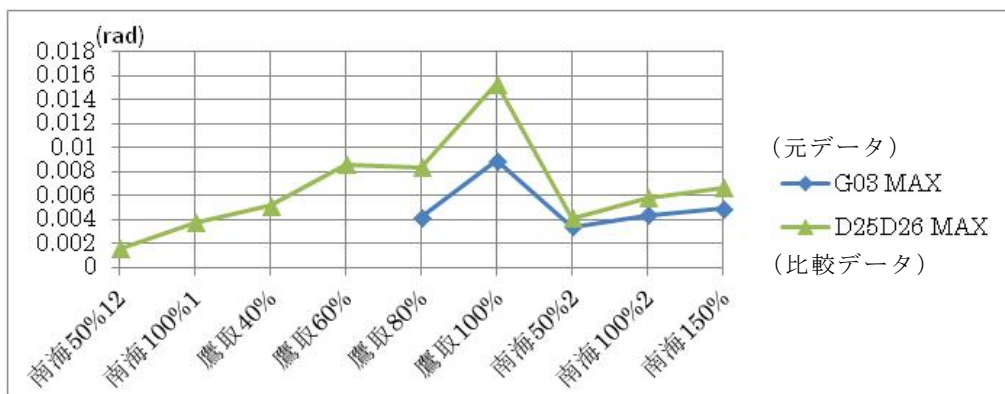


図 8.3-20 角度最大値の比較 (G03)

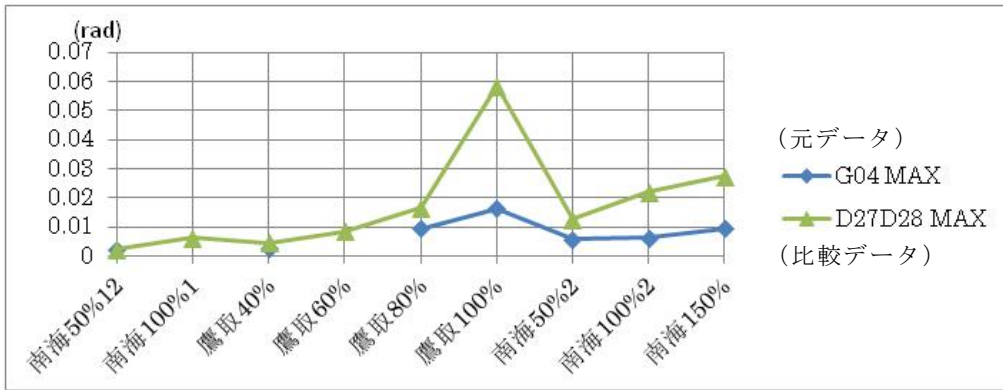


図 8.3-21 角度最大値の比較 (G04)

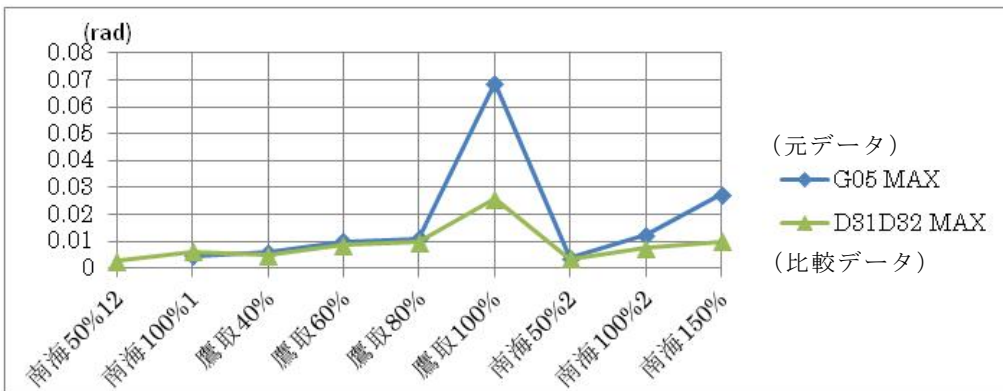


図 8.3-22 角度最大値の比較 (G05)

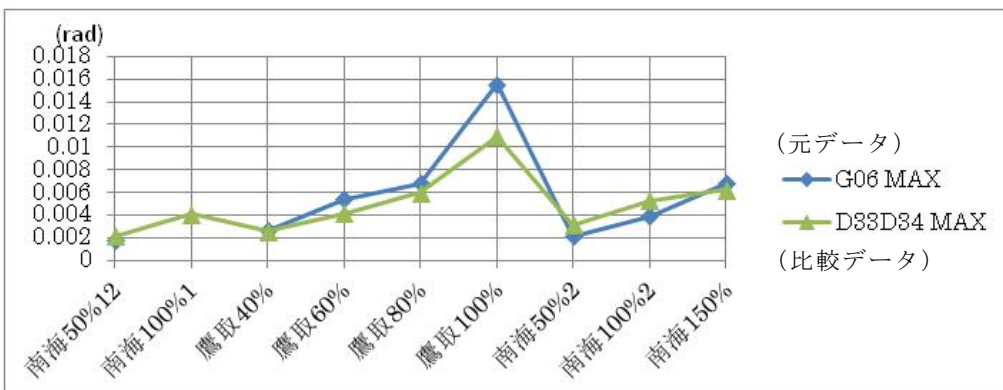


図 8.3-23 角度最大値の比較 (G06)

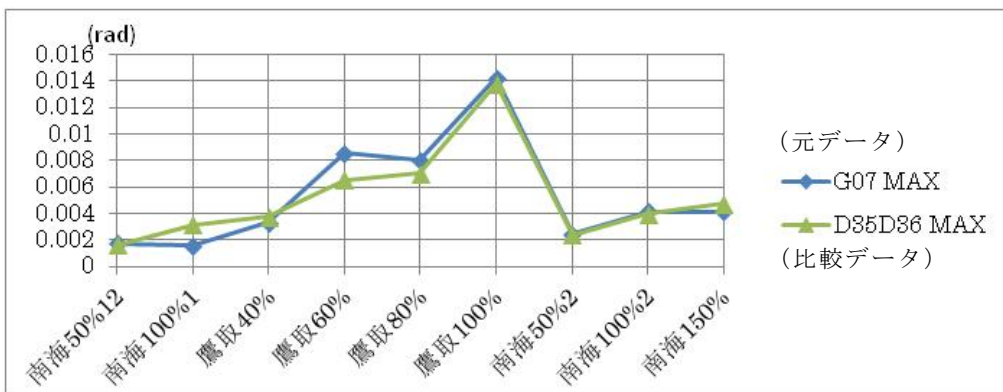


図 8.3-24 角度最大値の比較 (G07)

結果より、位相には大きな差は見られなかった。振幅には差が見られ、角度が大きくなるほど差も大きくなる傾向があった。結果からは角度が 0.02 rad を超えると差が大きくなる傾向があった。また、2 階の梁 (G01, G03, G04) では比較データの方が大きい値をとる結果であったが、3 階の梁 (G05, G06, G07) では元データの方が大きな値となるという対称的な結果となった。大変形時の角度に大きな差が生じた原因の一つとしては、元データの計測装置は柱梁接合部の近傍に設置したため、梁下端フランジの座屈の影響により計測治具の固定位置が不安定になったためであると考えられる。

(4) 層間変形角について

前項と同様に、柱表面に設置した G09, G10 で計測した角速度を積分することにより柱の傾斜角を求め、防災科研が設置したレーザ式変位計の計測データより求めた層間変形角を比較データとして比較した。G09, G10 の計測データを基に算出した角度についても、ドリフトが大きかったため補正を行った結果を元データとしている。また、計測位置が異なるため厳密に対応するものではないが、柱表面に角速度センサを貼付するという簡易な手法で計測したデータがどの程度の精度を持っているかを検証するために以下の検討を行う。図 8.3-25, 26 に G09 の層間変形角の時刻歴波形の比較を示し、図 8.3-27 に各地震波での最大値の比較を示す。また、G10 についても同様に図 8.3-28~30 に比較結果を示す。

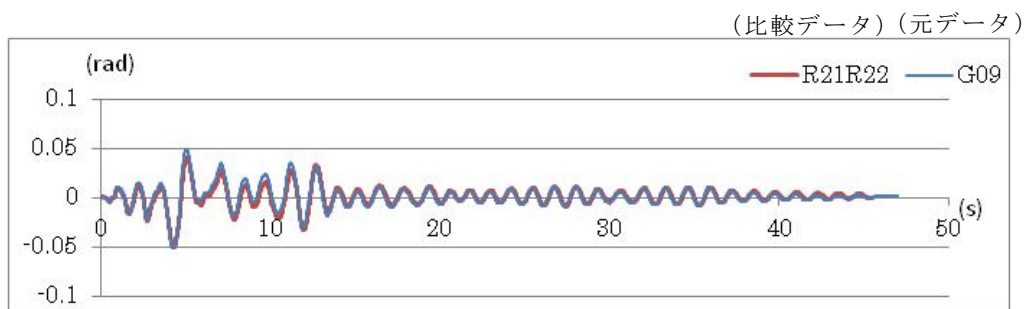


図 8.3-25 層間変形角の比較 (G09, 鷹取 100%)

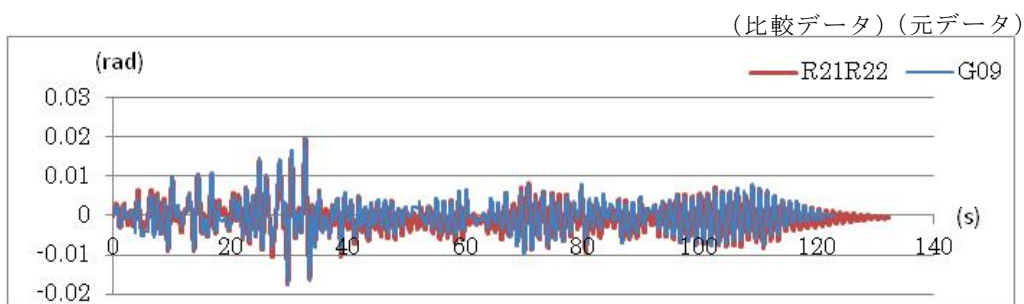


図 8.3-26 層間変形角の比較 (G09, 南海 150%)

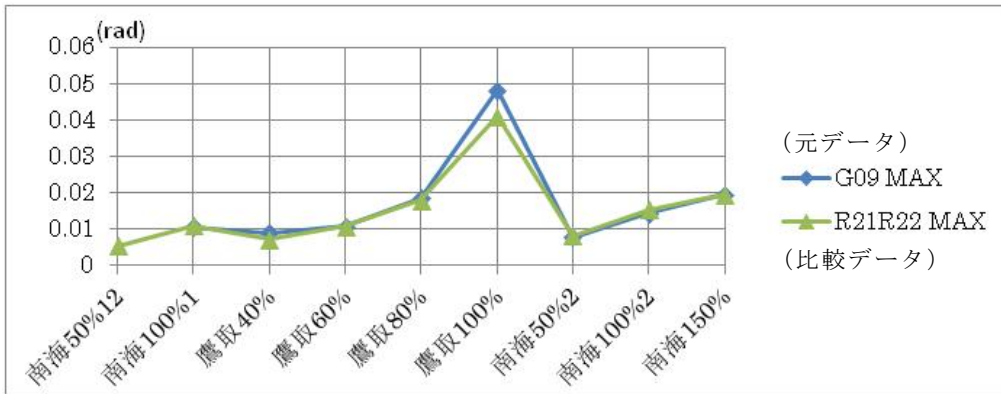


図 8.3-27 層間変形角最大値の比較 (G09)

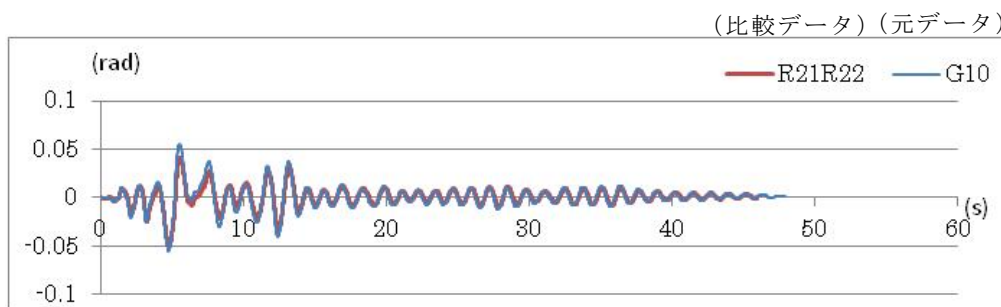


図 8.3-28 層間変形角の比較 (G10, 鷹取 100%)

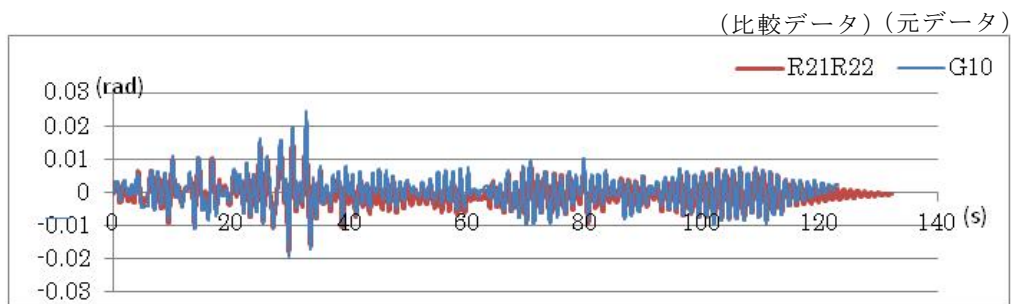


図 8.3-29 層間変形角の比較 (G10, 南海 150%)

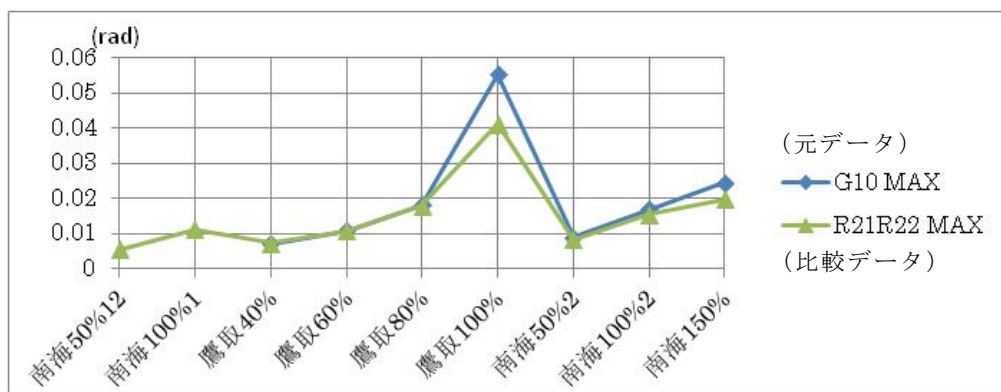


図 8.3-30 層間変形角最大値の比較 (G10)

結果より，位相，振幅ともに比較的良い対応を示した。層間変形角の時刻歴波形を見ると，継続時間の短い鷹取波の方が良く合っており，継続時間の長い南海波では振幅のずれが目立つ結果となった。振幅の誤差については，角度が小さい範囲では誤差も小さいが，鷹取 100%加振時には，G09 で約 10%，G10 では約 30%と大きい誤差となった。誤差の原因としては，計測位置，計測対象が異なることが大きな要因であると考えられる。

8.4 まとめ

本章では、地震作用時の構造物の応答を、簡易かつ容易に検出する手法として、比較的安価で入手可能なオープンソースハードウェア (Arduino) とセンサを用いてモニタリングシステムを構築し、実大構造物の振動実験に適用してシステムの有効性の検証及び応答値と損傷の確認を行った結果、以下の知見を得た。

- ①無線通信によるデータ取得については、障害物や受信位置などの影響による通信の非確立もあったが、平均すると76%程度の割合で通信は成功した。
- ②SDカードへの計測データ記録については、トリガーに関するプログラム修正後は9割以上の確率で成功した。速報としての最大値送信だけではなく、詳細データの活用という観点からもSDカードへの記録は有効であった。
- ③各階床に設置した加速度センサについては、Arduinoで計測した時刻歴波形は、防災科研加速度計で計測したものと比較的良い対応を示した。また、計測値をFFT解析することで精度よく固有周期を算出可能であった。さらに、加振ごとの固有周期の変化を観察することにより、建物の損傷進展状況を推定可能であり、ランニングスペクトルを求めることにより、建物に大きな損傷が生じた時刻を判断可能であった。
- ④梁端に設置した角速度センサによる梁破断検出については、計測した角速度及びその変化量を指標として検証を行ったが、明確な閾値を設定して梁破断を判断することは困難であった。しかし、階ごとに計測データを比較すると、破断や亀裂などの損傷が生じた梁では、同じ階の他の梁のデータと比較すると大きな変化を示しており、要注意と判断できる部材の特定には有効である。また、角速度を積分することにより角度を算出して精度の検証を行ったが、位相は比較的良く対応したが、振幅には大きな誤差が見られた。
- ⑤柱表面に設置した角速度センサによる層間変形角の算出については、位相、振幅ともに比較的良い対応を示した。柱表面に角速度センサを貼付するという簡易な手法で計測したデータであり、さらに改善の余地はあるが、層間変形角の計測に活用可能であると考ええる。

最後に今後の課題としては、マルチホップ通信（センサノード同士が無線通信を中継すること）の導入による通信精度の向上、SDカードへの記録速度の向上によるサンプリング間隔の短縮、梁端回転角の計測方法の改善、角度算出時の補正方法の自動化などがある。

参考文献

- 1) 熊谷仁志、岡田敬一：層間変位モニタリングによる地震後の建物健全性診断、日本コンクリート工学協会、コンクリート工学、Vol145、No. 4、pp. 10-15、2007. 4
- 2) 楠浩一、勅使川原正臣：リアルタイム残余耐震性能判定装置の開発のための加速度積分法、日本建築学会、日本建築学会構造系論文集、No. 569、pp. 119-126、2003. 7
- 3) 飯場正紀、阿部秋男、花井勉、皆川隆之：低コスト・小型地震計の性能確認と戸建て住宅の地震時挙動観測への適用、日本地震工学会論文集、第7巻、第2号(特集号－震度計と強震計データの利活用－)、pp. 57-67、2007. 3.

- 4) 宇賀治元樹、谷明勲、山邊友一郎：センサ付き RFID を用いた建築構造性能モニタリングシステムに関する研究、—その 3 周波数解析による構造性能モニタリング—、日本建築学会第 31 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、報告、pp. 207-210、2008. 12.
- 5) 梁琪、谷明勲、山邊友一郎：センサを用いた建築構造モニタリングに関する研究—ジャイロセンサによる変位計測法の提案と精度の検証、第 34 回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集、論文、pp. 91-96、2011. 12.

第9章 むすび

本研究は、新耐震基準により設計された鉄骨造建築物において、兵庫県南部地震の際に確認された梁端溶接接合部の破断現象を対象として、「複数回の強震動に対する建物の耐震安全性」と「被災建物の構造健全性の推定技術」の2つの観点から、実大3層鉄骨造試験体をEディフェンスで加振実験を実施するもので、①複数回の強震動による累積損傷に対する鉄骨造建物の耐震安全性、②振動特性計測に基づく鉄骨造建物の随時型構造健全度評価に関する基礎検討、③オープンソースハードウェアとセンサを用いて新たに構築した常時構造性能モニタリングシステムの適用の3点を目的としている。

実験結果より、各課題に対して下記のことが明らかになった。

① 複数回の強震動による累積損傷に対する鉄骨造建物の耐震安全性

- 1) 内閣府が起り得る最大級の地震として想定した南海トラフ巨大地震モデルにより、神戸市役所所在地の表層地盤で想定された地震動（想定南海トラフ波と呼ぶ）が、本研究で構築した兵庫県南部当時の構造仕様による3層実大鉄骨造試験体に入力された場合の最大応答は、層間変形角応答が、 $1/111\sim 1/78\text{rad}$ で、ベースシア係数が0.49であった。この際、試験体の柱脚に軽微なアンカーボルトの残留伸びとスラブのひび割れが確認されたが、層せん断力-層間変形角関係には、若干の塑性化が確認された程度であった。
- 2) 兵庫県南部地震の際にJR鷹取駅で観測されたNS方向の地震動（鷹取波と呼ぶ）の加速度の入力レベルを80%とした加振では、試験体の2階側柱の梁端部の曲げ挙動に関する応答が、先行して実施した柱梁部分架構実験結果と良く一致し、概ね部分架構実験の終局状態に達していた。このことより、当該、梁端部の残存塑性変形能力はかなり低下したと考えられる。
- 3) 鷹取波100%加振時には、2階側柱の梁端溶接接合部が加振開始後の早い段階で破断に至った。これは、鷹取波80%の際に受けた梁端溶接接合部の損傷の影響であると考えられる。その結果、最大層間変形角応答は、 $1/47\sim 1/13\text{rad}$ と極めて大きい値を示した。
- 4) 鷹取波100%加振時の2階側柱の梁端溶接接合部が破断に至った後の層せん断力-層間変形角関係において、弾性剛性の低下および耐力の低下が認められたものの、複数回の履歴エネルギー吸収が確認されている。これは、2階側柱の梁端溶接接合部が破断した以降に、他の部位で地震入力エネルギーに抵抗していたことを表しており、本試験体は耐震安全冗長性を有していたと言える。
- 5) 鷹取波の加振により兵庫県南部地震で確認された梁端溶接接合部の破断および顕著な亀裂が計4カ所生じた試験体を想定南海トラフ波で加振した結果、倒壊や新たな主要構造部の顕著な損傷の進展は見られなかったものの、健全状態の試験体に比べて1.9~2.6倍の層間変形角応答が生じた。想定南海波100%-2の加振では、最大層間変形角応答は1層で $1/41\text{rad}$ に達しており、外装材の損傷等の被害が生じると考えられ、大地震が発生した際には損傷状況を把握する必要性が高いことが確認された。

② 振動特性計測に基づく鉄骨造建物の随時型構造健全度評価に関する基礎検討

- 1) 鷹取波100%加振により、梁端溶接部が破断した際には、有意な固有振動数の低下が生じる

ことが確認された。

- 2) 固有モード形状を、著しい損傷が発生する前後で比較することが出来れば、顕著な損傷の有無の評価支援材料をえることができる。
- 3) センサを常設しない随時型の健全度推定法の推定精度を向上するためには、評価対象とする震災前後の振動特性値の比較が有効であり、震災に備えて事前に初期値を計測する意義は高いと言える。

③オープンソースハードウェアとセンサを用いた常時構造性能モニタリングシステムの適用

- 1) 無線通信によるデータ取得については、障害物や受信位置などの影響による通信の非確立もあったが、平均すると76%程度の割合で通信は成功した。
- 2) SDカードへの計測データ記録については、トリガーに関するプログラム修正後は9割以上の確率で成功した。速報としての最大値送信だけではなく、詳細データの活用という観点からもSDカードへの記録は有効であった。
- 3) 各階床に設置した加速度センサについては、Arduinoで計測した時刻歴波形は、防災科研加速度計で計測したものと比較的良い対応を示した。また、計測値をFFT解析することで精度よく固有周期を算出可能であった。さらに、加振ごとの固有周期の変化を観察することにより、建物の損傷進展状況を推定可能であり、ランニングスペクトルを求めることにより、建物に大きな損傷が生じた時刻を判断可能であった。
- 4) 梁端に設置した角速度センサによる梁破断検出については、計測した角速度及びその変化量を指標として検証を行ったが、明確な閾値を設定して梁破断を判断することは困難であった。しかし、階ごとに計測データを比較すると、破断や亀裂などの損傷が生じた梁では、同じ階の他の梁のデータと比較すると大きな変化を示しており、要注意と判断できる部材の特定には有効である。また、角速度を積分することにより角度を算出して精度の検証を行ったが、位相は比較的良く対応したが、振幅には大きな誤差が見られた。
- 5) 柱表面に設置した角速度センサによる層間変形角の算出については、位相、振幅ともに比較的良い対応を示した。柱表面に角速度センサを貼付するという簡易な手法で計測したデータであり、さらに改善の余地はあるが、層間変形角の計測に活用可能であると考えられる。

第10章 層剛性の時刻歴変動を用いた建物の健全性の検討

- 提案する同定手法の実験データへの適用例 -

10.1 背景

Eーディフェンスには、建設の目的である構造物の破壊メカニズム解明のために、同時計測点数を約900点とする計測機器が整備されている。これにより、実大あるいは大規模な試験体を加振することで、構造物の動的応答の過程を捉えることができる膨大なデータを取得してきた。すべての計測データは同期しており、そのサンプリングも1秒間に1000回の緻密なデータとして取得している実験も多い。平成25年度末までに66課題の実験を完遂し、その多くは一定期間を経て公開している。

どうしたらこれらの膨大なデータを、実験後にも防災の現場や研究開発にて活用できるだろうか。大学、官民研究機関の学生や有識者による研究開発と地方自治体の防災関係者のニーズに基づく活用につなげるための方策はないだろうか。活用に向けた新たな研究ネットワークを構築できないだろうか等々の願望から、防災科研は、構造物の同定アルゴリズムを研究している有識者とともに、これら膨大なデータを活用する解析手法の検討を進めてきた。ここではその1つとなるが、防災科研が提案した同定手法(略称:DISP)について、兵庫県共同研究のデータに適用し、構造物を同定する可能性を検討した。

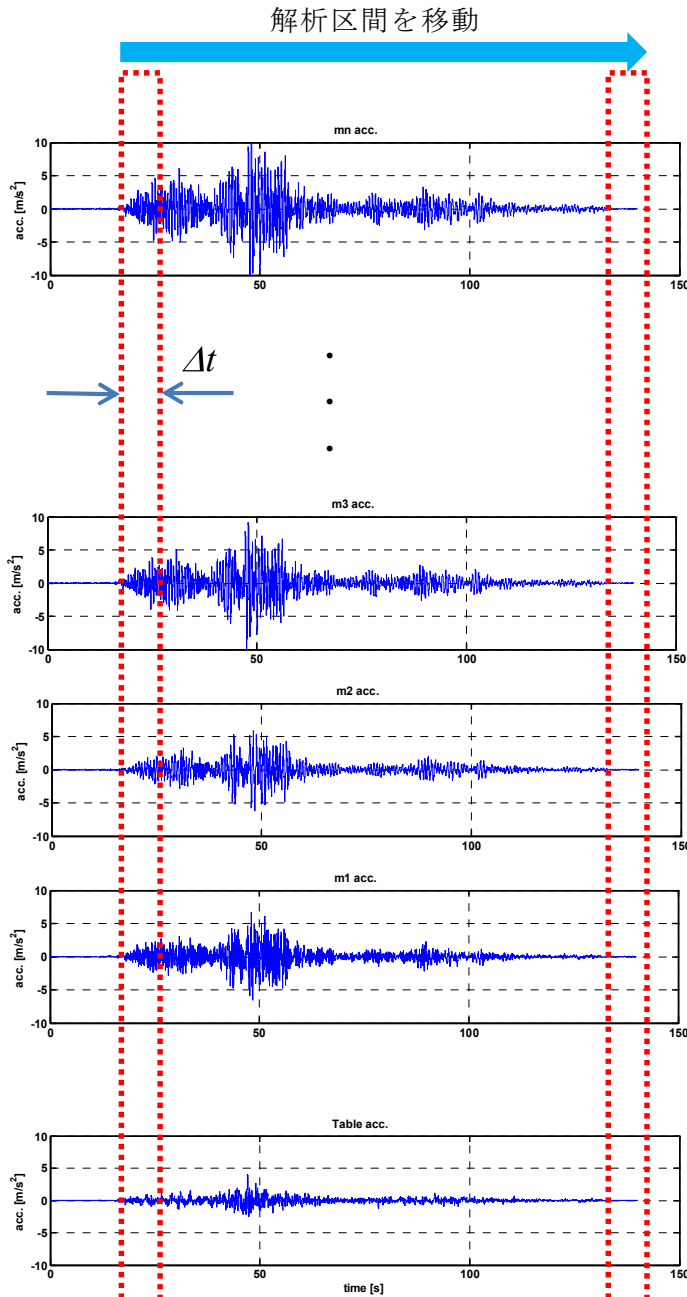
10.2 目的

構造物のモニタリングに一般的に設置される加速度計のデータを用いて、比較的簡便な計算手順に基づき、構造物の動特性を評価するDISP手法の適用性を検討した。具体的には、Eーディフェンスの実験にて得られた各層の加速度データを解析に用い、試験体の動特性の変化として、各層の剛性と減衰の変化を時刻歴で同定する手法である。

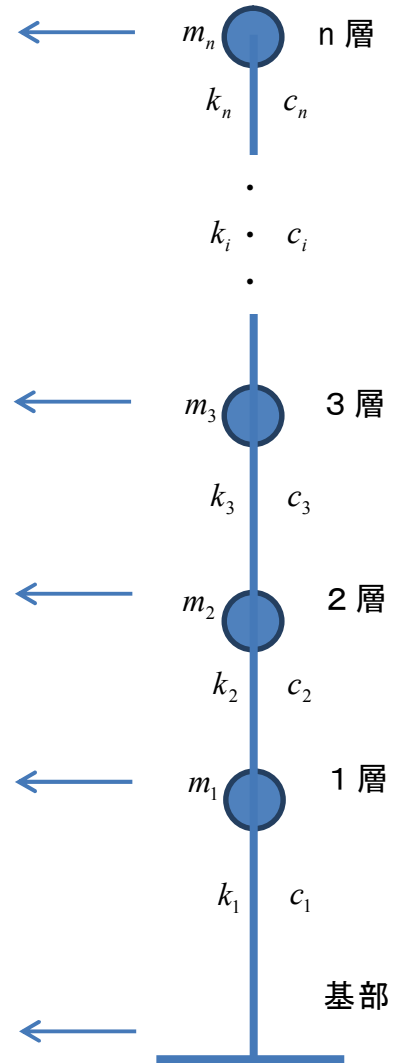
地震による構造物の損傷は、構造物の荷重に対する応答特性に変化をもたらす。このため、動的な載荷実験においても、試験体の健全性を調べる際には、加振と応答から求められる周波数伝達特性に着目する研究が多い。加振波形を測定する箇所と応答波形を測定する箇所(点と点の間)の時系列データから、加振前後の試験体の固有値変動を定量的に捉えて損傷の様相を推定する方法である。一般にこれらの方法は、固有値変動を多数の計測点間で調べ、総合的に試験体の剛性変動を捉え、層や部材レベルの損傷を推定しようとするものである。DISP手法は、これらとは全く異なるものである。

10.3 解析モデルと試験体同定について

ここでは一般的な中小規模の建物をイメージし、各層に設置した加速度計から取得したデータを同定に用いることを前提とする。建物の解析モデルは、層レベルの剛性と減衰の変化を時刻歴で調べることを目的とするため、単純な質点系モデルとした。解析では、入力と各層の応答データを同時に用いる。計測データの解析への適用イメージを図10.1に示す。



(a) 基部と各層の加速度時刻歴波形



(b) 試験体モデル

図 10.1 計測データの解析への適用のイメージ

解析のアルゴリズムは単純である。取得した全てのデータが、各瞬間において運動方程式を満たしていることを前提とし、剛性 k_i と減衰 c_i (i は $1 \sim n$) を未知数として連立方程式を解くものである。その際、解析区間 Δt を短時間に設定し、この間における構成関係は線形（剛性 k_i と減衰 c_i は一定値）と仮定して、解析区間を少しずつ移動する。ただし、その区間の計測点数が未知数とする剛性 k_i と減衰 c_i の個数より多く存在することが必要となるが、密な計測データによりその心配はない。解析では、計測により得られた基部の入力加速度と各層の応答加速度を積分して得られる速度、変位も必要となる。

10.4 解析方法

単純な n 質点系の運動方程式を式 (1) に示す。

ここで、 m_i を各質点の質量、 k_i を各層の剛性、 c_i を各層の減衰定数とする。ここで i は、1 から n である。また、 x_i は i 層の相対変位、 \dot{x}_i は i 層の相対速度、 \ddot{x}_i は i 層の相対加速度、 x_0 は基部の変位、 \dot{x}_0 は基部の速度、 \ddot{x}_0 は基部の加速度である。

$$\begin{aligned}
 m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_0) &= -c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 + c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) + k_2(x_2 - x_1) \\
 m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_0) &= -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) + c_3(\dot{x}_3 - \dot{x}_2) + k_3(x_3 - x_2) \\
 &\dots = \dots \\
 m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0) &= -c_{n-1}(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) - k_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) + c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) + k_n(x_n - x_{n-1}) \\
 m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_0) &= -c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n(x_n - x_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

上記の式では、未知数とする k_i と c_i を上手く分離できないので、下記のように工夫し変形する。

$$\begin{aligned}
 m_1(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_0) + m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_0) + \dots + m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0) + m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_0) &= -c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 \\
 m_2(\ddot{x}_2 + \ddot{x}_0) + \dots + m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0) + m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_0) &= -c_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) - k_2(x_2 - x_1) \\
 &\dots = \dots \\
 m_{n-1}(\ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0) + m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_0) &= -c_{n-1}(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) - k_{n-1}(x_{n-1} - x_{n-2}) \\
 m_n(\ddot{x}_n + \ddot{x}_0) &= -c_n(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) - k_n(x_n - x_{n-1})
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

これにより、式 (2) の運動方程式は、以下に表現できる。

$$P = QD \tag{3}$$

ここで、式中の P 、 Q と D は以下である。

$$P \equiv \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 + \ddot{x}_0 & \ddot{x}_2 + \ddot{x}_0 & \dots & \ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0 & \ddot{x}_n + \ddot{x}_0 \\ 0 & \ddot{x}_2 + \ddot{x}_0 & \dots & \ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0 & \ddot{x}_n + \ddot{x}_0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \ddot{x}_{n-1} + \ddot{x}_0 & \ddot{x}_n + \ddot{x}_0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \ddot{x}_n + \ddot{x}_0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_{n-1} \\ m_n \end{Bmatrix} \tag{4}$$

$$Q \equiv \begin{bmatrix} -\dot{x}_1 & -x_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) & -(x_2 - x_1) & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & -(\dot{x}_{n-1} - \dot{x}_{n-2}) & -(x_{n-1} - x_{n-2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & -(\dot{x}_n - \dot{x}_{n-1}) & -(x_n - x_{n-1}) \end{bmatrix} \quad \dots (5)$$

$$D \equiv \begin{Bmatrix} c_1 \\ k_1 \\ c_2 \\ k_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ k_{n-1} \\ c_n \\ k_n \end{Bmatrix} \quad \dots (6)$$

式(3)の表記で注意しなくてはならないことは、 P と Q に含まれる0と各項が解析区間 Δt に存在する l 個のデータの列ベクトルになっていることである。解析区間 Δt のデータ数 l は、未知数とする k_i と c_i の個数より十分大きく取り、式(3)に最小二乗法を適用する。

$$(Q^T Q)^{-1} Q^T P = (Q^T Q)^{-1} Q^T Q D \quad \dots (7)$$

式(7)より式(8)導かれ、 k_i と c_i が求められる。解析区間を移動することにより k_i と c_i は時刻歴のデータとなる。

$$D = \begin{Bmatrix} c_1 \\ k_1 \\ c_2 \\ k_2 \\ \vdots \\ c_{n-1} \\ k_{n-1} \\ c_n \\ k_n \end{Bmatrix} = (Q^T Q)^{-1} Q^T P \quad \dots (8)$$

本手法については、加振の入出力データから直接に構造物のパラメータを同定する方法となるので、DISP (Direct Identification Method of Structural Parameters) で表記する。

10.5 解析区間のウインドについて

式(8)により求められる k_i と c_i は、解析区間 Δt の平均値となる。そこで、解析区間の最初のデータから徐々に重みを低減するウインド関数の適用を検討した(図 10.2 を参照)。これについての詳細は、別に執筆中の論文としたい。

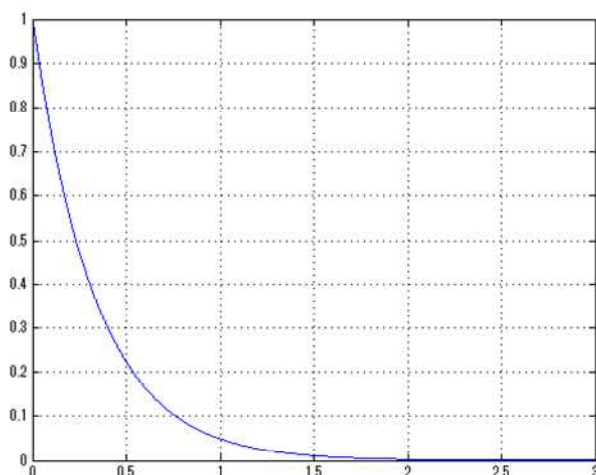


図 10.2 解析区間の重み関数の例 (縦軸：重み、横軸：時間 t (s))

10.6 実験データへの適用について

共同実験の 3 層の試験体に基づき解析モデルは 3 質点系とした。既知となる情報は、各層の質量 m_i と各加振ケースにおける入力と各層の応答加速度である。また、解析で必要となる速度と変位は計測された加速度を積分して求めた。なお、各層の質量については、初期の研究打合せで紹介された値を用いたため、この報告書に記された諸元と異なっている。執筆中の論文にて、新たに解析を行った結果を提示するため、ここでは、解析における諸条件の説明は割愛し、最初に得た質量データに基づく解析結果を示す。

実験データのサンプリング周波数は 1000Hz である。ここでの解析では、200Hz に間引きしたデータを用いた。ここでは紹介しないが、サンプリング周波数の比較検討より、データが単位時間に密にあるほど、解析過程に最小二乗法が含まれることで k_i と c_i の時刻歴変動が精緻に表現されると考えている。

以下で紹介する解析例は、試験体の 1 層と 2 層に梁端破断が生じる加振となった、1995 年兵庫県南部地震の際に JR 鷹取駅で観測された地震動を 100% で入力したケースと、それ以前の実験ケースで行った同地震の 40% 入力の場合についてである。この間には、60%、80% のケースについても加振したが、詳細な検討を含めたく別の報告としたい。

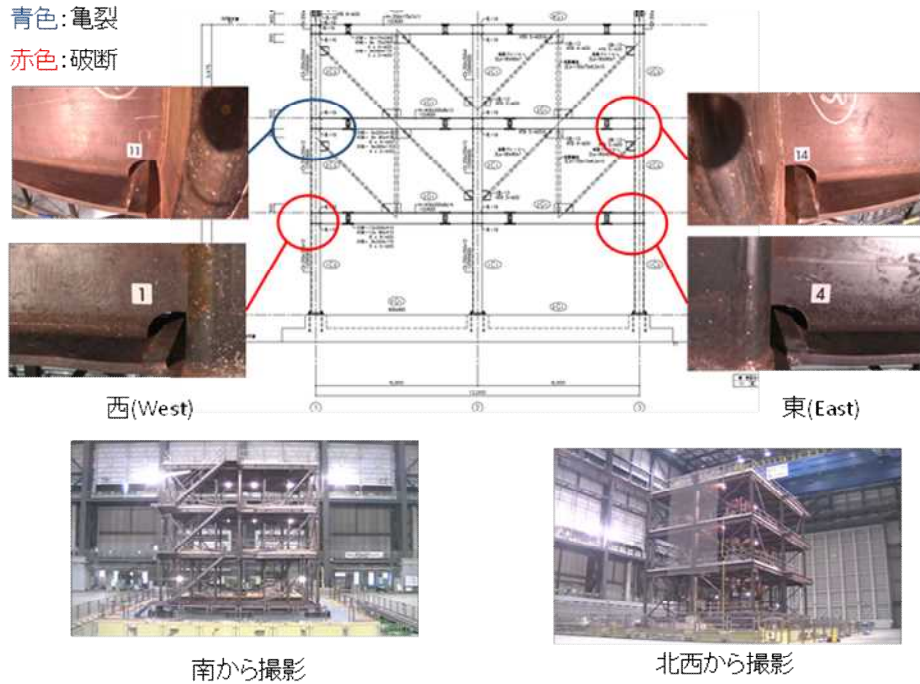


図 10.3 JR 鷹取波 100%加振における試験体の梁端破断箇所

図 10.3 に、JR 鷹取で観測された波形 100%の加振による試験体の破断箇所を示す。ビデオ観察からもわかるが、ここで表記する時刻歴波の 10 秒以降で 1 層の東側と西側で梁端破断が生じ、その後に 2 層の東側で梁端破断が生じた。そこでまずは、この加振で得られたデータを用いて、図 10.4 に各層の荷重-変位曲線を示す。図より、各層の剛性低下は覗えるが、各層の剛性の時刻歴での変化については考察しにくい。

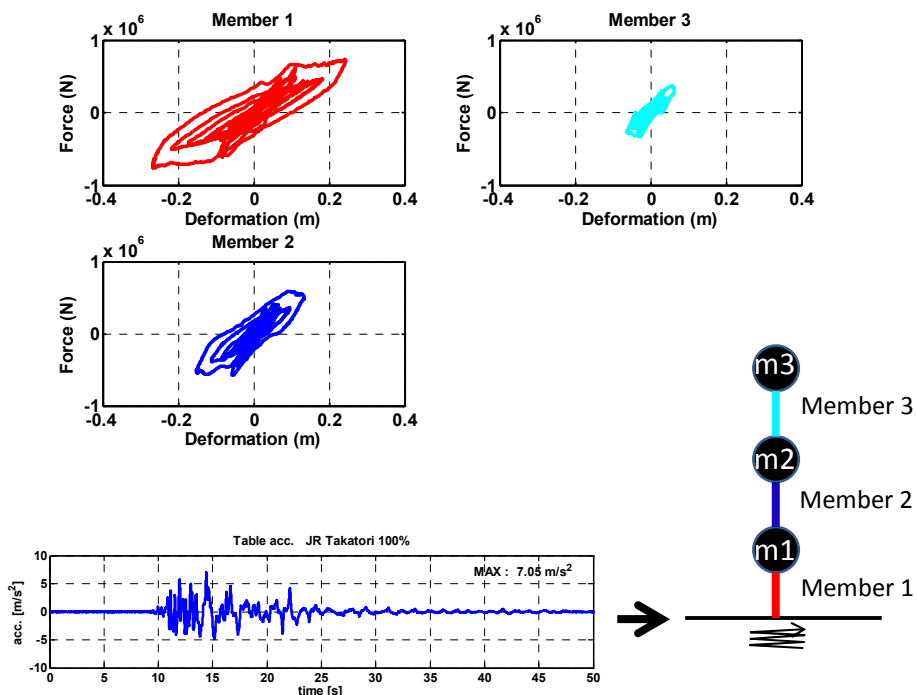


図 10.4 JR 鷹取波 100%加振における各層の荷重-変位曲線

次に、図 10.5 に DISP による各層の剛性の時刻歴を示す。概ね 10 秒から 40 秒の部分を表示する。それ以外の部分は、入出力のデータが微小のため解析結果が不安定になったため割愛した。

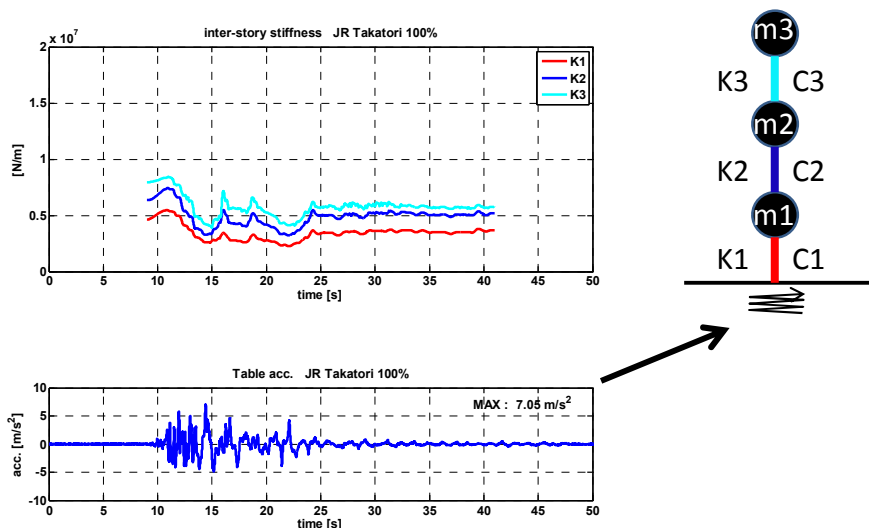


図 10.5 JR 鷹取波 100%加振における層剛性 k_i の時刻歴変動

次に、DISP によって同時に得られる減衰定数の時刻歴データについて図 10.6 に示す。

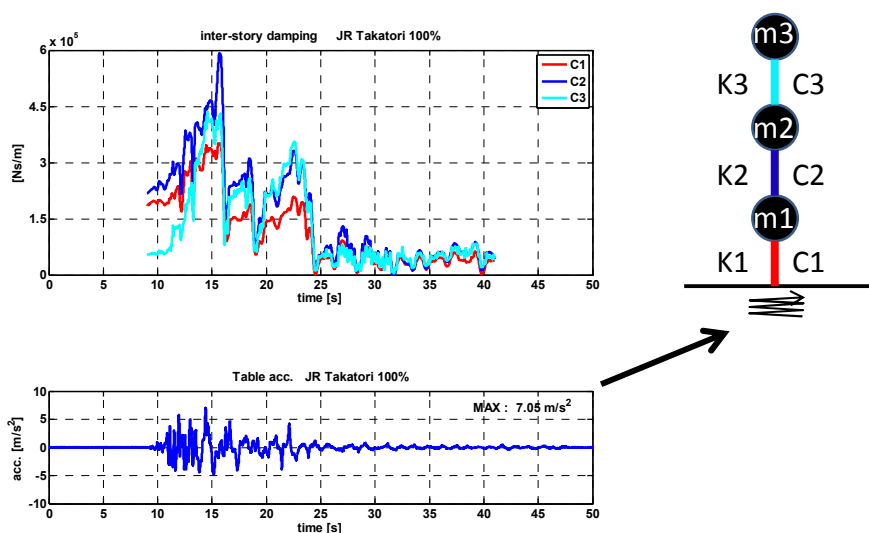


図 10.6 JR 鷹取波 100%加振における層減衰 c_i の時刻歴変動

剛性では、14 秒、18 秒、22 秒近傍で値の低下が確認できる。減衰では、16 秒、18 秒、23 秒近傍の各時刻の直前で値が大きくなり、その後は急激に降下している。検討のために、図 10.7 に JR 鷹取駅での観測波 40% の入力による各層の荷重-変位曲線を示す。

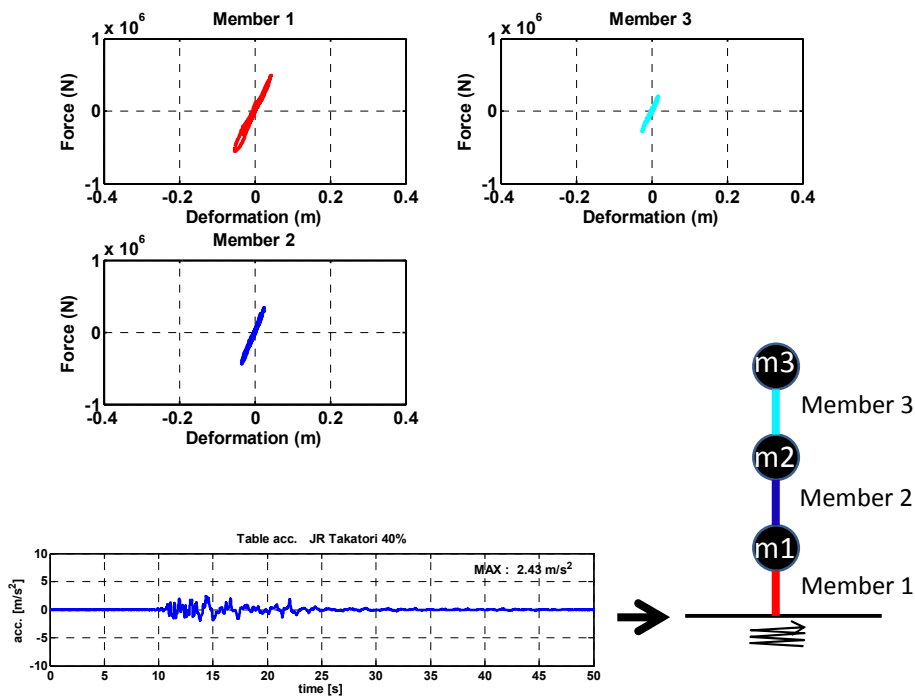


図 10.7 JR 鷹取波 40%加振における各層の荷重-変位曲線

加えて、図 10.8 に 40%加振における層剛性の時刻歴変動を示す。図 10.5 と比較すると、100%加振時点での 1 層と 2 層の剛性低下が著しく、3 層との大小関係も逆転していることがわかる。図 10.9 に 40%加振における各層の減衰定数の時刻歴変動を示す。図 10.6 と比較すると、100%加振時の 10 秒から 25 秒間の減衰値が著しく大きい。これらデータの様相が、試験体の損傷と関連していることを調べるため、梁端のワイヤ変位計によるデータを調べた。

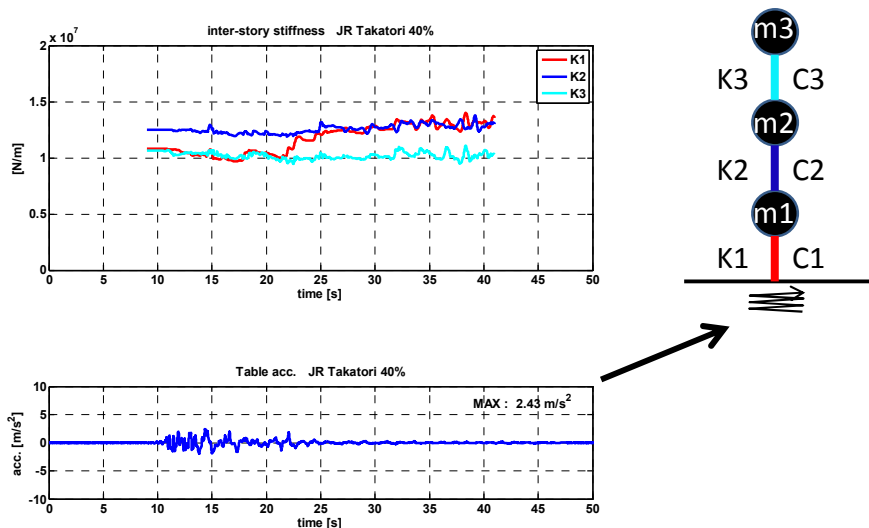


図 10.8 JR 鷹取波 40%加振における層剛性 k_i の時刻歴変動

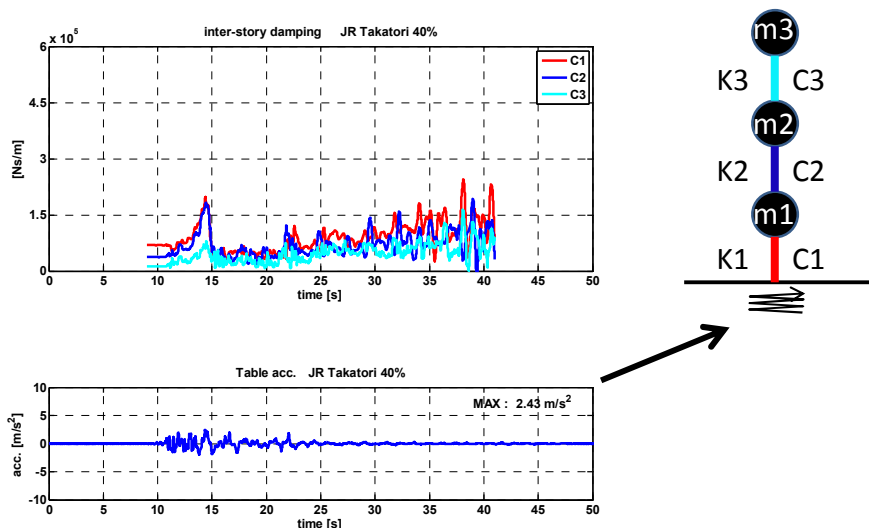
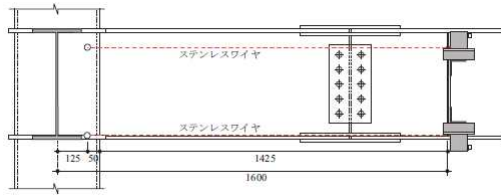


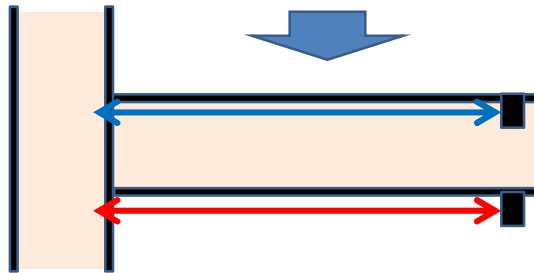
図 10.9 JR 鷹取波 40%加振における層減衰 c_i の時刻歴変動

10.7 ワイヤ変位計データによる梁端破断の時刻推定

DISP による解析結果から損傷を推定するための知見を得るため、どこの部位がどの時刻で破断したかについて、ワイヤ変位計による梁・柱接合部の回転を調査するためのデータを調べた。ワイヤの設置は図 10.10 に示す通りである。この設置状態にて、フランジ下部の梁端破断が発生しない限り、梁の接合部の回転中心はこの 2 本のワイヤ間にあると考えられる。しかし、梁端破断が発生し、フランジ上部でピン接合のような状況となった場合は、回転中心はそこになり、設置したワイヤの変位挙動は同相になると考えられる。



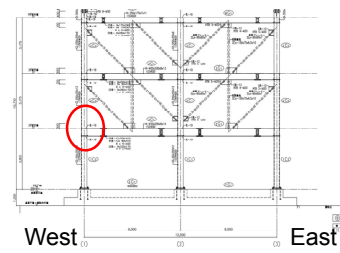
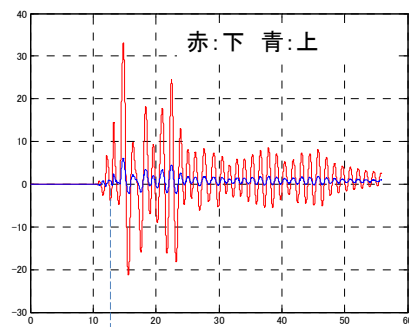
梁端回転角計測詳細図



梁端回転角計測略図

図 10.10 ワイヤ変位計の設置状態を示す詳細図と概略図

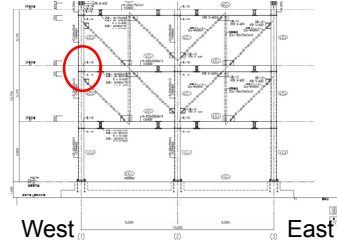
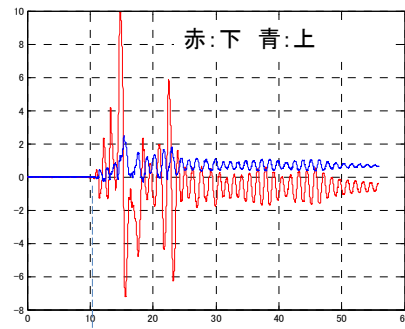
JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位



ここから同位相の波形(破断と推定)

図 10.11 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴 (1層西側の梁端上下)

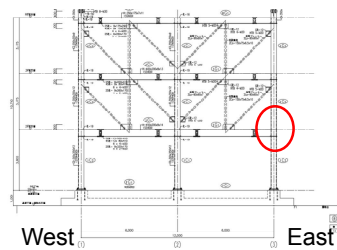
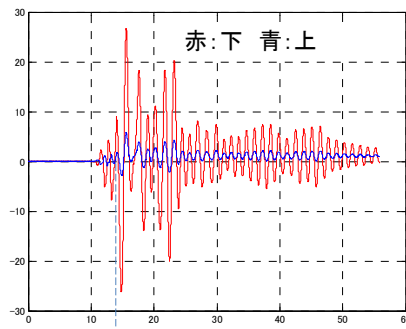
JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位



すべて逆位相の波形(破断まで至っていないと推定)

図 10.12 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴 (2層西側の梁端上下)

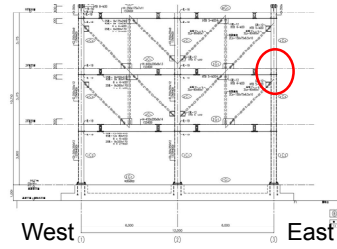
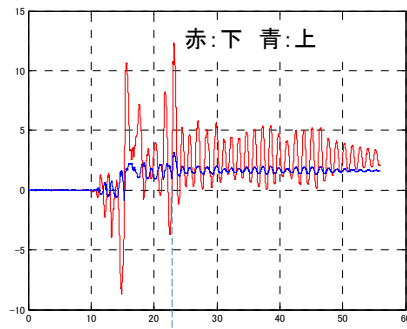
JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位



ここから同位相の波形(破断と推定)

図 10.13 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴 (1層東側の梁端上下)

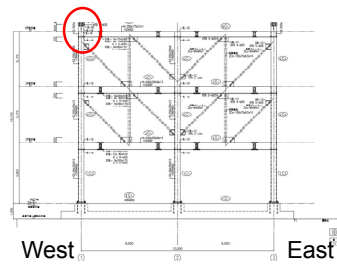
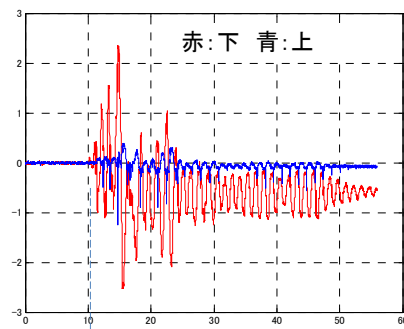
JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位



ここから同位相の波形(破断と推定)

図 10.14 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴 (2層東側の梁端上下)

JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位



すべて逆位相の波形

図 10.15 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴 (3層西側の梁端上下)

JR鷹取 100%入力による梁端上下の変位

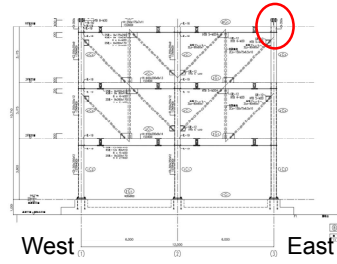
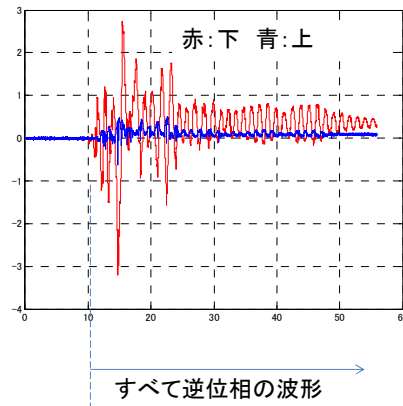


図 10.16 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴（3 層東側の梁端上下）

図 10.11 と図 10.13 の上下ワイヤ変位の位相より、1 層の東西梁端の破断は、約 12 秒から 13 秒に発生したこと推定できる。また、図 10.14 の 2 層の東側梁端の破断は、上下ワイヤ変位計の位相が同相となる 22 秒近傍で発生したと推定される。ビデオ映像では、1 層天井の東西の梁柱接合部が、加振後に 10 数秒で破断し、その後、2 層天井の東側の柱梁接合部が、加振後 20 数秒で破断していることから、時間も概ね一致する。

以下は、参考までに基部に取り付けた左右変位計の伸縮を示したものである。縦軸の単位は μm であり、入力は JR 鷹取駅で観測された波形 100%を入力した際のデータである。

JR鷹取 100%入力による柱基部左右の伸縮

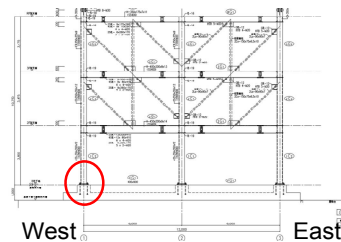
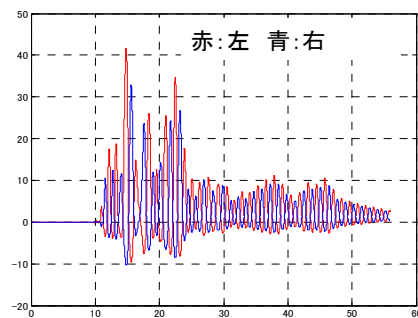


図 10.17 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴（東側柱の基部左右）

JR鷹取 100%入力による柱基部左右の伸縮

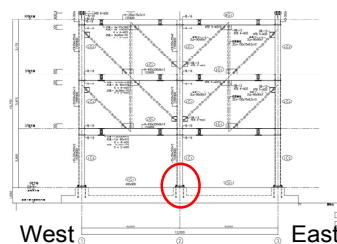
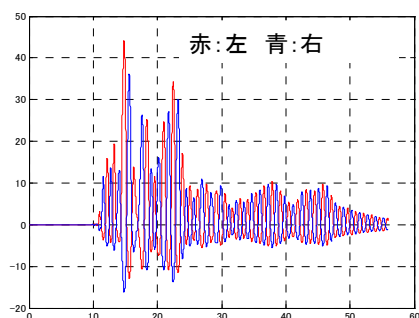


図 10.18 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴（中央柱の基部左右）

JR鷹取 100%入力による柱基部左右の伸縮

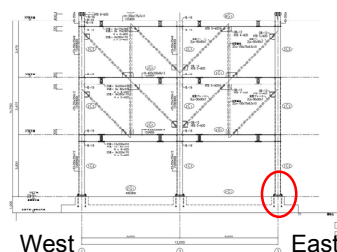
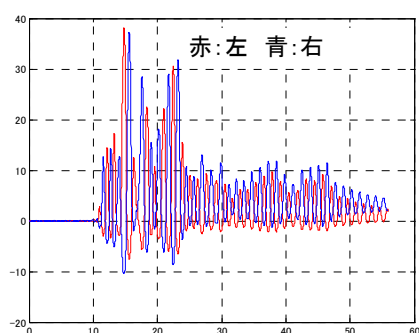


図 10.19 JR 鷹取波 100%加振におけるワイヤ変位時刻歴（西側柱の基部左右）

10.8 まとめ

ここでは、動の実験データによる試験体の変形特性の同定手法として、減衰項を含む一般の運動方程式に基づく **DISP** を提案し、逐次の剛性と減衰の変動を時系列として、実験で得られた加速度データから求められることを示した。これにより、各層の加振による剛性の低下、各層剛性の大小関係の逆転など、損傷に結び付くと考えられる情報をデータから推定できる見通しを得た。

なお、本実験では、加振による各層スラブのクラックの進展が、試験体の動特性に影響を与えていることも当然推定される。それについては他章を参照されたい。

謝辞：

兵庫県が主催する「Eーディフェンスを活用した減災対策推進委員会」では、岡田委員長より「新しいことに思い切って挑戦」の激励と、委員よりは、「周波数解析以外で何か」のご意見をいただき、本章で紹介した手法の検討と解析の実施に至った。ここに岡田委員長と各委員のご指導に厚くお礼を申し上げる。

備考：

防災科研と東京農工大は共同研究を締結し実験データを活用した構造物のパラメータ推定方法の研究を進めている。その手法の名称は、ここで紹介した構造物のパラメータの直接的な同定手法（仮称 **DISP: Direct Identification Method of Structural Parameters**）である。この中で、防災科研は、計測された加速度の時刻歴に最小二乗法を適用し剛性と減衰の時刻歴を求める研究を、東京農工大では、リアルタイムに計測しながら剛性と減衰を求める逐次計算アルゴリズムの研究をフィードバック制御のアルゴリズムをベースに行っている。現在、両者の論文を幾つかの試験体による実験データを用いて執筆中である。

第 11 章 数値震動台(E-Simulator)の開発

11.1 はじめに

独立行政法人防災科学技術研究所では、E-ディフェンス実験のデータを活用して建築・土木・地盤構造物の破壊に至る挙動を高精度に再現するシミュレーション（数値震動台，E-Simulator）の開発を進めている．建築構造物の解析例として，図 11.1-1 に示すように，4 層鉄骨建物の完全崩壊実験の再現解析を実施し，崩壊の引き金となった 1 層柱の局部座屈の再現に成功している．

阪神・淡路大震災では，鉄骨建物において構造上最も重要な柱梁接合部で破断が発生した被害事例が見られた．大地震を経験した建物を継続的に使用していくためには被害状況の把握や残存耐震性能の評価が重要であり，柱梁接合部の破断現象を再現できるシミュレーション技術の構築が望まれる．数値震動台開発プロジェクトでは，阪神・淡路大震災での鉄骨建物の被害状況を再現した加振実験結果や，損傷を受けた鉄骨建物の想定南海トラフ巨大地震動による加振実験結果等を活用し，鉄骨建物の破断および破断後の応答を再現する大規模非線形有限要素解析技術の構築を目指す．



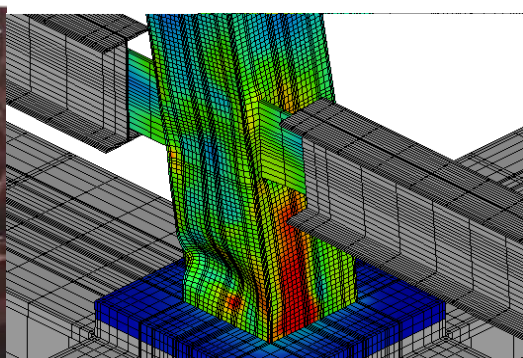
(a) 4 層鉄骨建物の試験体



(b) 解析モデル



(c) 1 層中柱の局部座屈



(d) 局部座屈の再現

図 11.1-1 数値震動台を用いた E-ディフェンス実験の再現解析例

11.2 要素実験の試解析

11.2.1 解析概要

梁破断モデルの検証のために、E-ディフェンスでの実験に先立ち神戸大学難波研究室で実施された合成梁の要素実験の再現解析を実施する。図 11.2-1 に試験体の図面を示す。図 11.2-2 に解析モデルを示す。赤矢印は重力の方向を示している。黄緑の領域は MPC(Multi-point constraints)を表しており、柱上下端、梁端断面が変形しない設定となっている。図 11.2-3 に要素実験の解析メッシュを示す。柱、梁、スラブ、ワイヤーメッシュ、スタッドボルトの全てを 6 面体要素でメッシュ分割している。総要素数は 590834、総節点数は 685300、総自由度数 2055900 である。境界条件として柱、梁上下端は固定とし、梁端に水平方向（図 11.2-2 の上下方向が水平方向）の強制変位を課し、準静的繰り返し解析を行う。

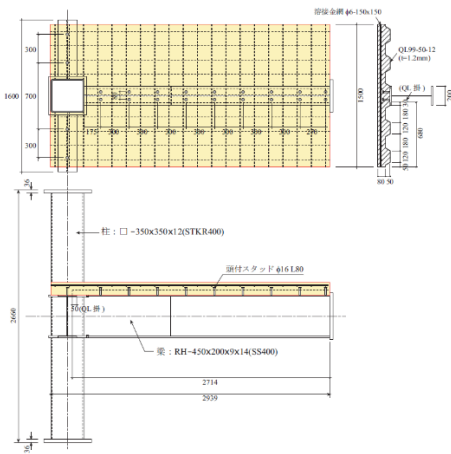


図 11.2-1 試験体

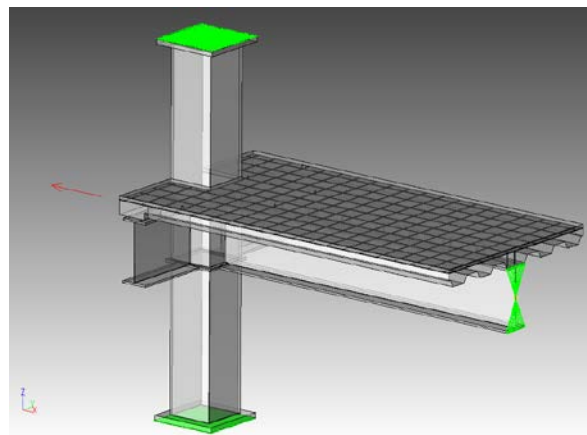


図 11.2-2 解析モデル

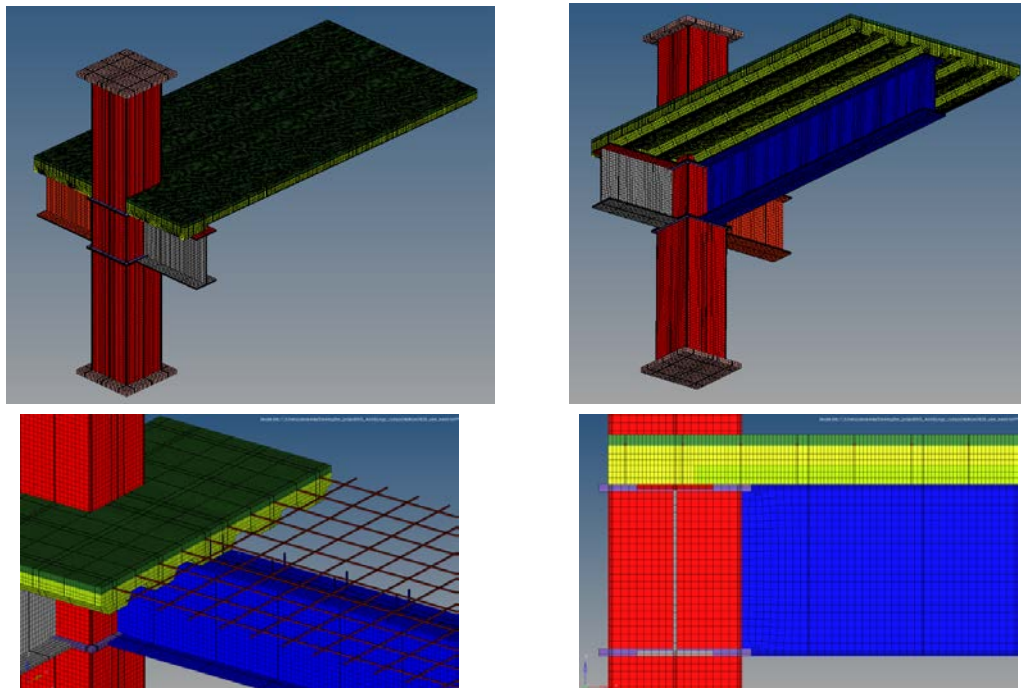


図 11.2-3 要素実験の解析メッシュ

11.2.2 解析結果

試解析として、破断考慮なしで2サイクル終了まで解析を実施した。図 11.2-4 に梁材端モーメント-部材角関係を示す。表 11.2-1 に実験結果と解析結果の比較を示す。なお、表中の梁部材角、梁材端モーメントは各サイクル正曲げ、負曲げの最大変形時の値である。解析の部材変形角は、同じ強制変位量にもかかわらず、実験値よりも大きくなっている。そのため、解析での梁材端モーメントも実験値より大きくなっている。解析モデルの改善として、強制変位を部材角で制御する等境界条件の変更を検討する。2 サイクル目において、スラブの影響により、正曲げでの梁材端モーメントが負曲げの梁材端モーメントより大きくなっている。図 11.2-5 に各サイクルでの最大変形時の相当応力のコンターを示す。正曲げ、負曲げとも柱梁接合部の梁下側周辺の応力が大きくなっており、接合部パネル部での応力も大きくなっている。また、2 サイクル目正曲げにおいて、スラブの接触により柱に大きな応力が発生している。解析条件の修正後、数値震動台で開発した破断プログラムを用いて解析を実施し、解析の妥当性の確認を行う。

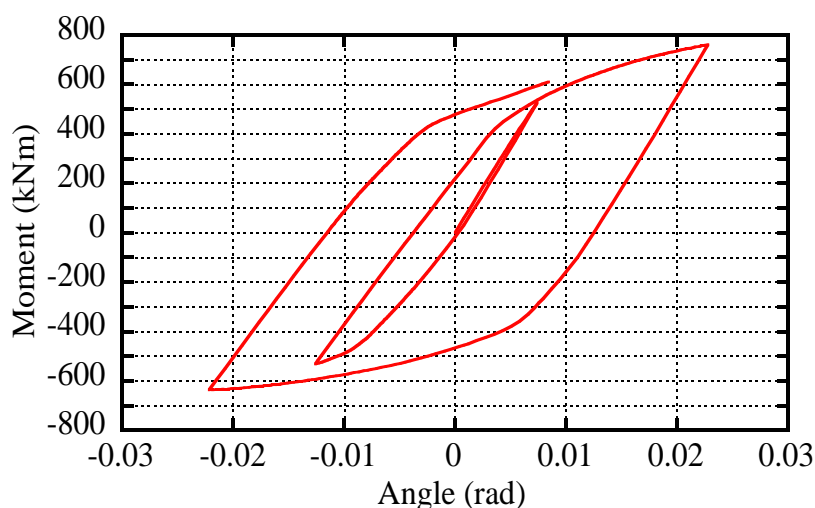
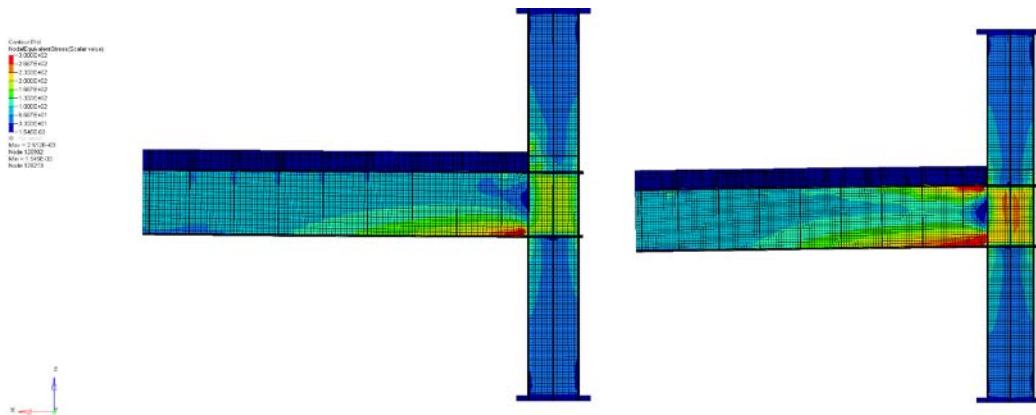


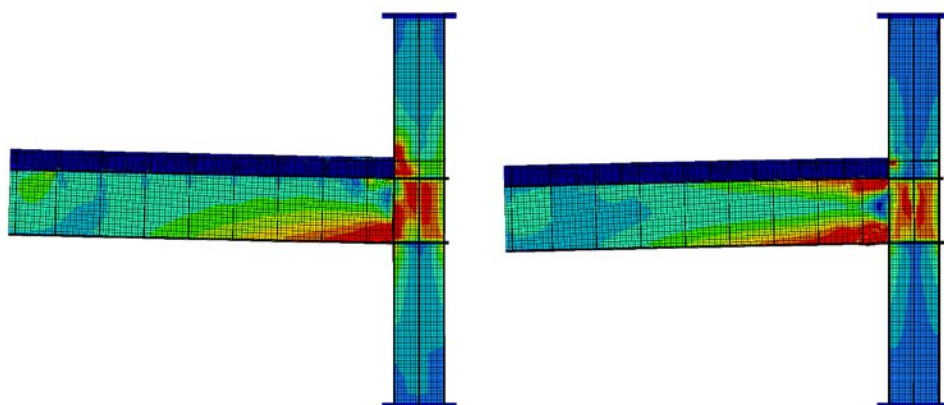
図 11.2-4 梁材端モーメント-部材角関係

表 11.2-1 要素実験と解析との比較

	梁端変位 [mm]	梁部材角 [rad]		梁材端モーメント [kNm]	
		実験	解析	実験	解析
1 サイクル目正曲げ	19.39	0.004	0.0074	400	526
1 サイクル目負曲げ	-32.85	-0.008	-0.0126	-434	-531
2 サイクル目正曲げ	59.11	0.016	0.0228	655	761
2 サイクル目負曲げ	-57.60	-0.016	-0.0222	-535	-636



(a) 1 サイクル目 (左：正曲げ最大時，右：負曲げ最大時)



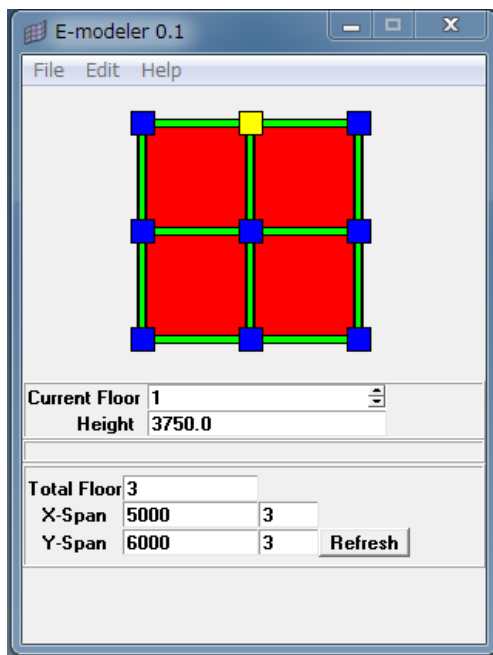
(b) 2 サイクル目 (左：正曲げ最大時，右：負曲げ最大時)

図 11.2-5 各サイクルでの最大変形 (コンターは相当応力)

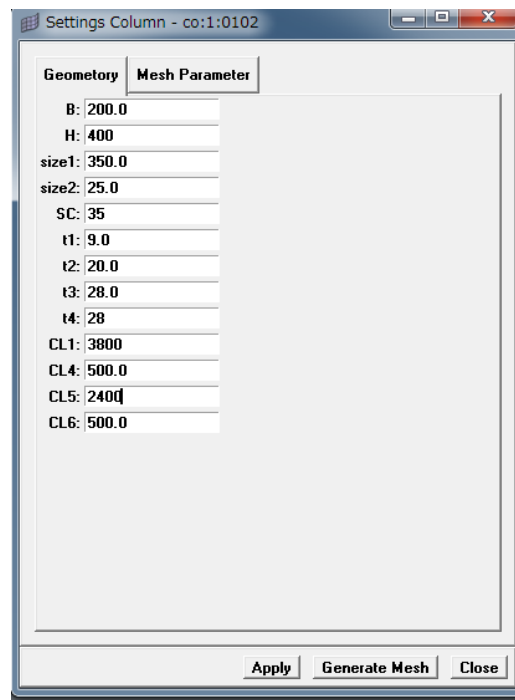
11.3 E-Defense 実験の詳細有限要素モデルの構築

11.3-1 建築骨組のソリッドモデル構築プログラムの簡易入力 UI の開発

数値震動台においては、構造物の損傷、破壊を再現するために解析モデルとしてソリッド要素による詳細有限要素モデルを採用している。複雑で部材数が多い建築骨組をソリッド要素でモデル化するためには熟練した CAE 技術者でも多大な時間を要する。そのため、高精度なシミュレーションを実現するだけでは、設計や施策への活用といった社会への普及は難しい。そこで、数値震動台では簡易入力でソリッドモデルを構築できるユーザーインターフェース (UI) の開発を進めている。図 11.3-1 に簡易入力 UI を示す。配置情報入力ウィンドウで、x 方向、y 方向の軸の数やスパン、各階の階高を入力すると各階の伏図ができる。伏図の柱、梁、スラブを選択して、部材形状入力ウィンドウを開き、部材寸法を入力して、「Generate Mesh」ボタンを押すと、所定の位置に部材のメッシュを作成する。全部材について、同様の操作を行うことによって、難しいメッシュソフトの操作を必要とせず、建築構造物モデルを構築することが可能となる。また、ここでは示していないが Mesh Parameter タブから、メッシュサイズについても設定可能である。



(a) 配置情報入力ウィンドウ



(b) 部材寸法入力ウィンドウ

図 11.3-1 建築骨組ソリッドモデル構築プログラムの簡易入力 UI

11.3-2 E-ディフェンス実験試験体の解析モデル構築

11.3-1 で説明した簡易入力 UI を用いて E-ディフェンス実験の試験体の解析モデルを作成した。図 11.3-2 に解析モデル形状を示す。図 11.3-3 に解析メッシュを示す。ボックス柱，H 型鋼梁，スラブについては部材自動生成モジュールを作成しているが，H 型鋼柱についてはモジュールが未完成のため H 型鋼柱のメッシュは作成していない。H 型鋼梁については，スカラップもモデル化できるようにしている。作成した解析モデルの総節点数は 2046881，総要素数は 1129210 である。

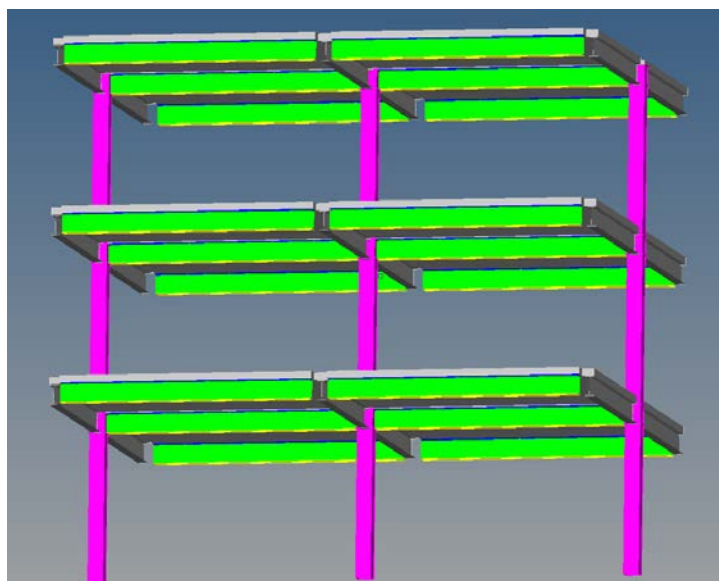


図 11.3-2 E-ディフェンス実験の試験体の解析モデル形状

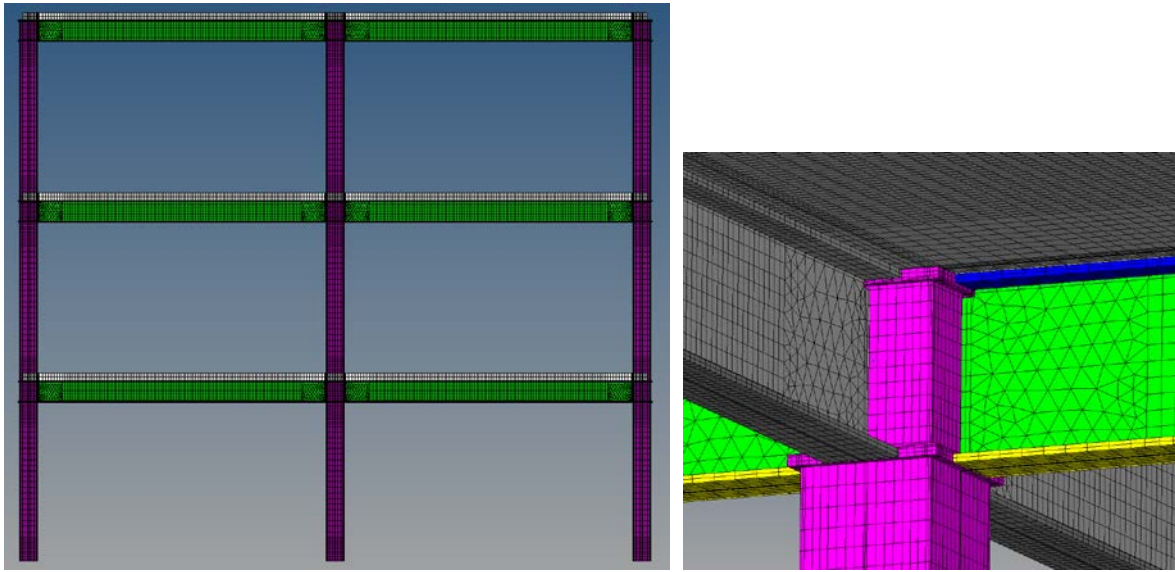


図 11.3-3 E-ディフュゼンス実験の試験体の解析メッシュ（左：全体，右：柱梁接合部周辺）

11.4 おわりに

要素実験モデルの試解析を実施し，破断プログラム検証のための解析準備を整えた．また，鉄骨骨組のソリッド要素による詳細有限要素モデル構築プログラムの簡易入力ユーザーインターフェースのプロトタイプを開発し，E-ディフュゼンス実験モデルを容易に作成できることを示した．今後，本実験研究で得られた貴重な実験データを活用し，数値震動台による柱梁接合部での梁の破断現象の再現および梁が破断した建物の巨大地震時の挙動の再現を試みる．また，引き続き，ソリッド要素による解析モデル構築プログラムのユーザーインターフェースの開発を進め，数値震動台の設計や施策への活用といった社会への普及を目指す．

第 12 章 非接触変位場計測装置による梁柱接合部の変形状況の観察

12.1 変位場計測装置の詳細

12.1.1 計測装置の原理

対象物の表面変位を計測するために、対象の表面に設けた標点を移動前後で撮影し、その移動量を画像解析により取得する。対象物が大型化するほど画像 1 画素に対応する範囲が広くなり、精度が低下していくという問題がある。この問題点を解消するため、ミラーと高解像度のデジタルカメラを用いて高速で分割撮影をすることにより変位・ひずみ場の計測を行うシステムを開発中である。このシステムは望遠の光学系を用いて計測対象の一部を拡大して撮影し、ミラーを用いてその撮影範囲を移動させ、スキャンしていくことで広範囲のひずみ場の測定が可能となる。ミラーを用いる際には、対象までの光路長の変化による画像のひずみや焦点の移動が問題となるが、光路の途中に平行光路部を設けて、その部分にミラーを置くことで問題の解消を図ることが可能となる。今回の計測では、開発途上のミラー部の利用は割愛し、平行光路部を持つ光学系による撮影を行い、変位場の取得を行った。

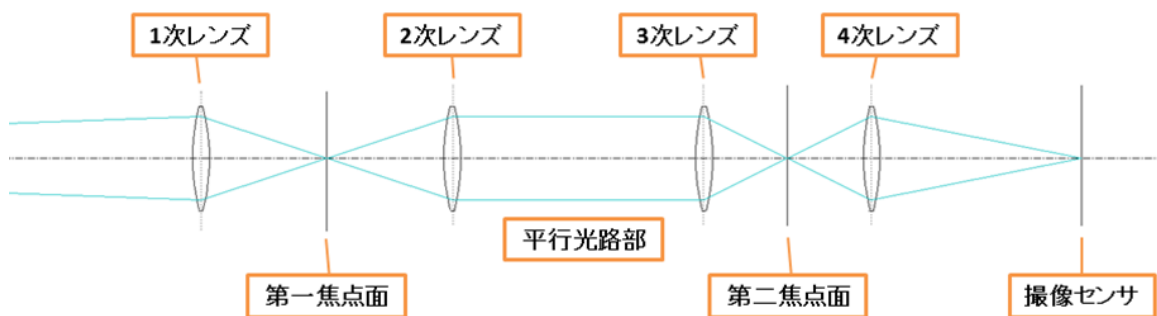


図 12.1-1 平行光路部を含むレンズ構成

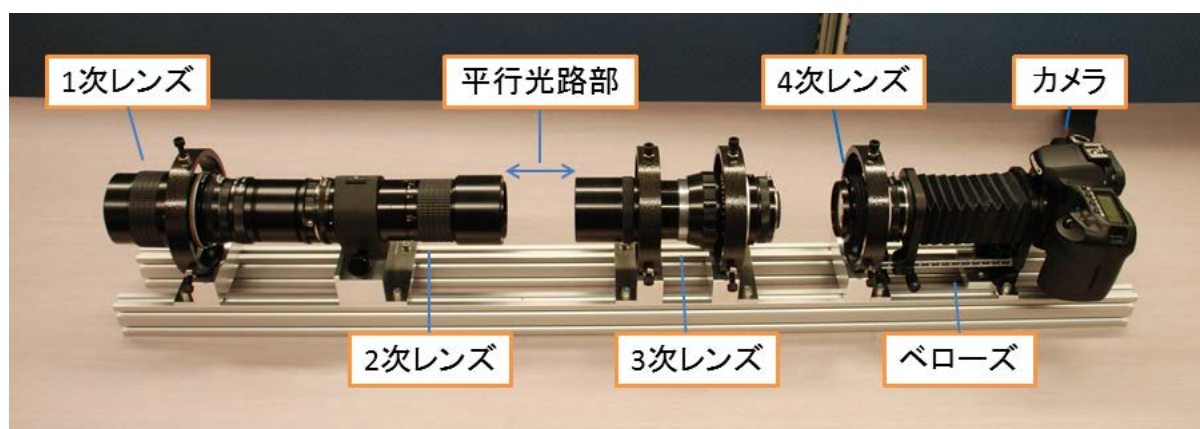


図 12.1-2 計測装置

表 12.1-1 レンズ構成

	レンズ	焦点距離	開放 F 値
1 次レンズ	Nikon nikkor135mm F2.8	135mm	2.8
2 次レンズ	Nikon Ai Micro Nikkor 200mm F4S(IF)	200mm	4
3 次レンズ	Nikon Auto Nikkor 20cm (200mm) F4	200mm	4
4 次レンズ	Nikon nikkor 35mm F1.8	35mm	1.8

12.1.2 画像解析手法

撮影された標点の座標を精度良く抽出するために、以下の方法を用いる。

- ① 同じ対象を複数回撮影して重ね合わせを行い、画像ノイズを低減する。
- ② 白黒化してコントラストを高める。
- ③ 輝度補正により背景の明るさを均一にして、標点の抽出を容易にする。
- ④ 輝度補正により、計測点を強調する。
- ⑤ 輝度重心の算出により、標点の位置を定める。

12.1.3 精度検証

微動ステージにドットを描いたマーカーを貼り、微動ステージを用いてその間隔を 0.01mm ずつずらして撮影を行い、ドットの移動量を画像から計測した。対象から 2m の距離で検証実験を行った。実際に撮影した画像を図 12.1-3 に示す。実験で取得した画像からドットの重心をサブピクセル単位で取得する。

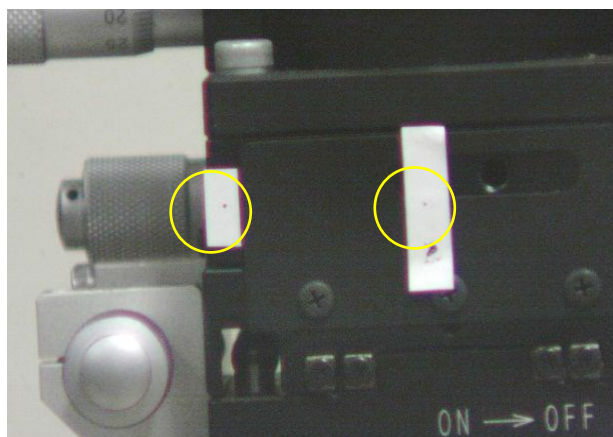


図 12.1-3 微動ステージと標点

撮影した画像から解析したデータを図 12.1-4 に示す。実際のドットの移動距離と画像から求めたドット間の距離は非常に良い線形関係を示しており、誤差は画像上において ± 0.4 pixel ほどである。これは実際の距離に直した場合の約 $\pm 7.6 \mu\text{m}$ に相当する。これは距離 5m における $\pm 19 \mu\text{m}$ の誤差に相当する。

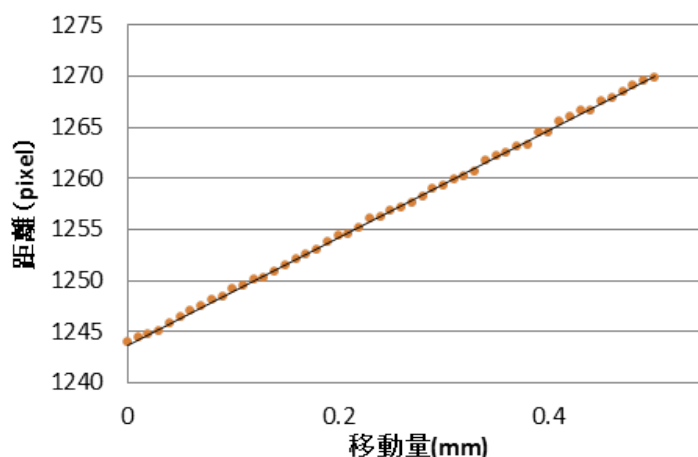


図 12.1-4 実際の移動量と画像解析結果の比較

12.2 実大構造物梁柱接合部の計測

12.2.1 計測対象

2013年10月7日から15日にかけて兵庫県三木市にある(独)防災科学技術研究所兵庫耐震工学実験センターの実大三次元震動破壊実験施設(以下、E-ディフェンス)において、開発した計測装置のプロトタイプを検証実験を行った。計測においてはあらかじめ梁に描いた点群の画像を加振の合間の損傷観察の際に取得した。この加振の前後での画像を比較することで静的なひずみ場を算出した。加振中、計測装置は供試体から取り外しておき、加振の合間の損傷観察の際に毎回供試体内に持ち込んで計測を行った。

計測対象箇所を図12.2-1、図12.2-2に示す。本実験では3階中央柱梁接合部の下フランジの溶接箇所周辺のひずみ分布を計測した。梁の下フランジ下面に計測用の点群を描き、加振の前後においてその移動量を比較することでひずみ分布の計測を行う。点群は梁のウェブを挟んで左右に1種類ずつ計2種類用意した。1つは伸縮性の高いカッティングシートにレーザー加工機によって定期的に0.3mm程度の小さい穴をあけ、それを直接貼り付けたもの(図12.2-3)、もう一つはそのカッティングシートをマスクパターンとして利用し、直接塗料で点を塗装したもの(図12.2-4)である。各点の間隔はすべて5mmである。どちらも事前にグラインダーを用いて黒皮を剥がした後に貼付、あるいは塗装を行い、計測の間隔が1日を超える際には防錆用のオイルを塗布した。また、点群を観測する梁の下フランジの裏面には検証のためにひずみゲージを貼付した。図12.2-5、図12.2-6に各グリッドの位置及び計測範囲、図12.2-7にひずみゲージの位置を示す。各図は計測点を下から見上げた状態で描いている。

今回は毎回装置を設置しなおしていることから計測点との位置関係のずれによる歪の補正が必要と考えられたため、マグネットを用いて基準となる正方形の頂点を計測前に対象部に貼り付け、補正用の基準データを取得した(図12.2-8)。この基準の正方形の1辺は20mmである。

下フランジの溶接箇所周辺のひずみ分布を計測する。検証のために歪ゲージによる計測データも取得する。

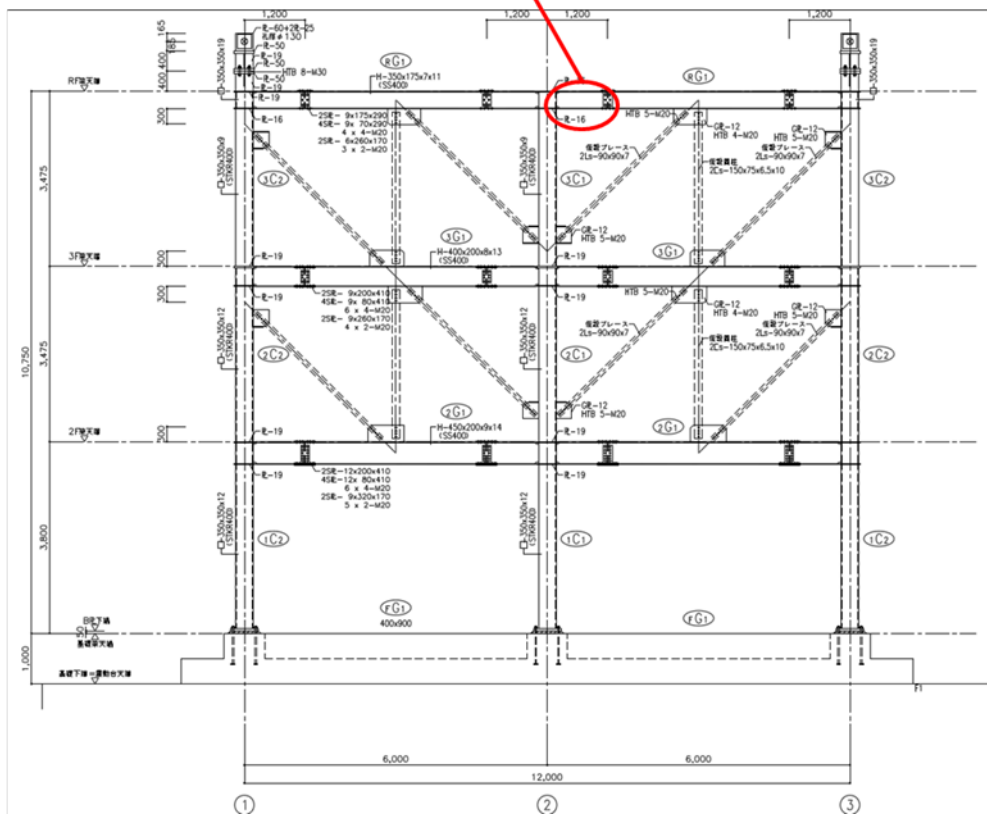


図 12.2-1 計測箇所

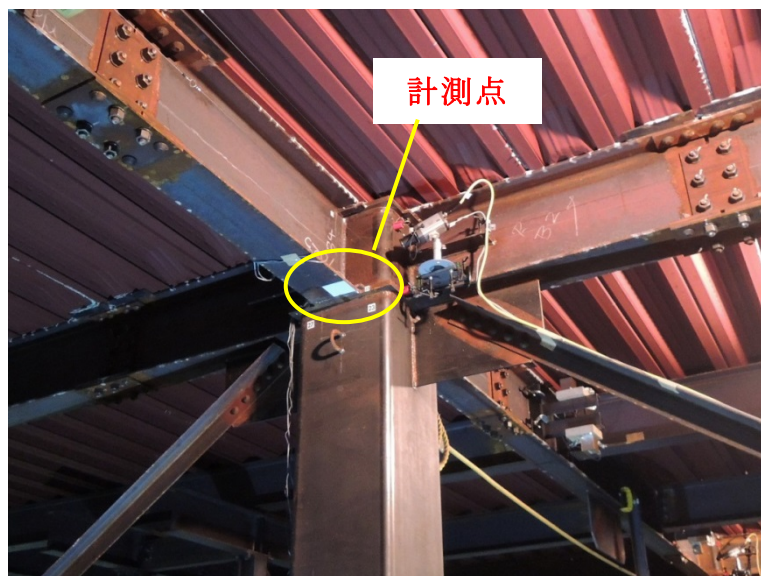


図 12.2-2 計測点

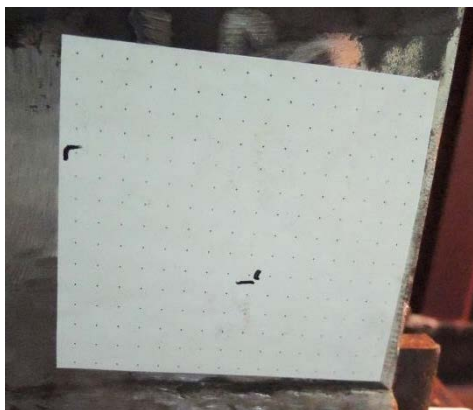


図 12.2-3 カuttingシートを貼付



図 12.2-4 塗料を塗布

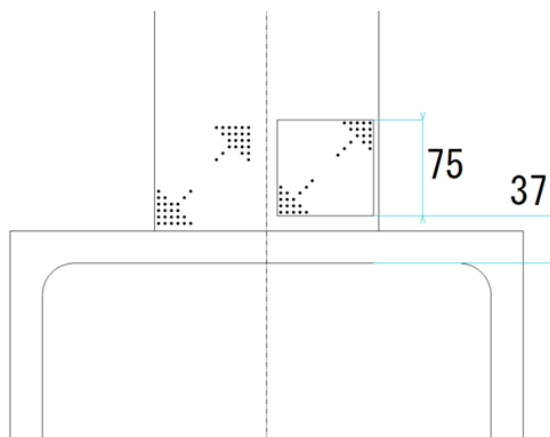


図 12.2-5 グリッド位置

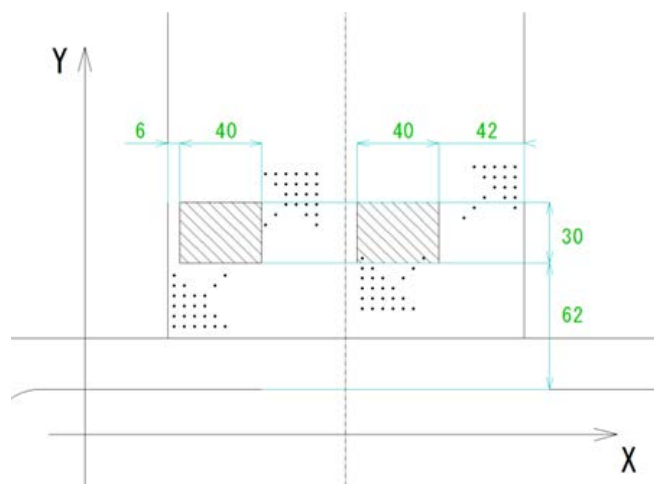


図 12.2-6 計測範囲

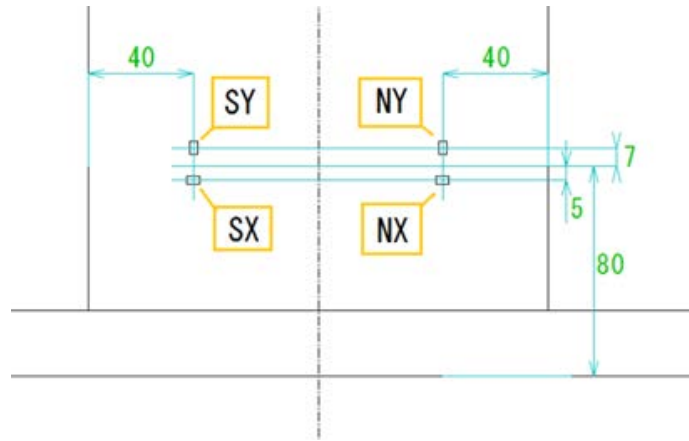


図 12.2-7 ひずみゲージ貼付位置

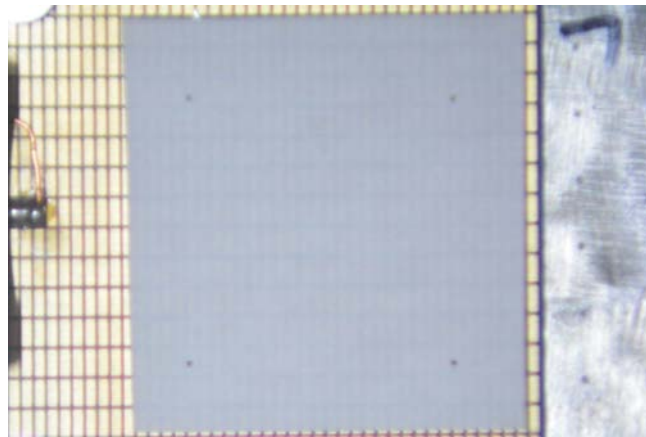


図 12.2-8 補正用標点

12.2.2 計測方法

加振前および各加振後の損傷観察の際に計測を行った。

計測装置はアルミフレームとクランプを用いてガセットプレート補強リブに固定した (図 12.2-9)。計測対象である点群とレンズ端面までの距離は約 700mm であった。

計測場所は薄暗く、十分な光量が得られなかったため撮影の際には LED ライトを光源として照射した。カメラの設定はすべての撮影で同じとし、感度は ISO3200、シャッタースピードは 1/10 で撮影を行った。



図 12.2-9 現場での撮影方法

各画像に対する解析は以下のようなプロセスで行った。

- ① それぞれのデータに対して連続で撮影した 4 枚を加算平均で重ね合わせ、高感度ノイズの影響を軽減する。
- ② 画像を白黒反転し、グレースケール化する。
- ③ バックグラウンドの明るさがフラットになるよう周辺減光等を補正する。
- ④ 画像の輝度レベル、トーンカーブを調整して計測点を強調する。
- ⑤ 中心の点の列がほぼ水平になるようにそれぞれ回転させる。
- ⑥ 各計測点に対して輝度重心の座標を求める。
- ⑦ 輝度重心の座標変化から加振前後のそれぞれの点の変位を求める。

今回の計測では光学系が暗いこと、計測場所が薄暗いことから高感度での撮影を行った。そのためセンサの高感度ノイズが大きくなったため、その補正として複数枚画像の加算平均を行った。これは同じものを複数回撮影したものを加算平均して重ね合わせることでノイズを減らし S/N 比を向上させるものである。図 12.2-10 にコンポジット（加算平均）前後の比較画像を示す。加算平均によってノイズが減少して S/N 比が向上していることが画像からも確認できる。

塗装による計測パターンは表面の凹凸の影響を受け、バックグラウンドの輝度差が大きくなり簡便な輝度重心の取得が困難であったので、比較的容易に輝度重心が取得できたシート貼付による計測方法で得られた結果に関して解析を行った。

今回の解析は大きな変形が発生したと考えられる JR 鷹取波 100% 加振の前後のデータを用いて行った。

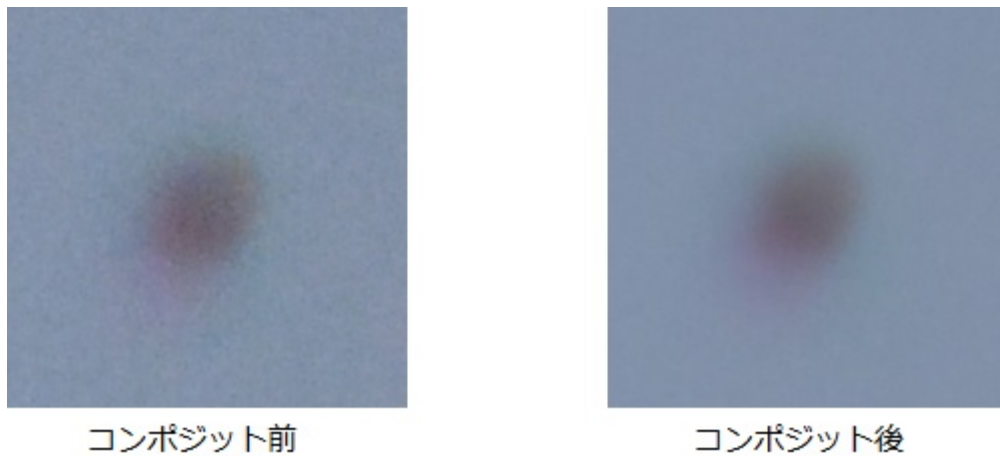


図 12.2-10 コンポジット（画像加算平均）前後の比較

12.3 実大構造物柱梁接合部の計測結果

12.3.3 ひずみゲージによる計測結果

図 12.3-1 にひずみゲージによる計測結果を示す。引張が正である。JR 鷹取波 100%加振の前後である計測 8 と 9 の間に大きなひずみが確認できる。表 12.2-1 にそれぞれの x 方向, y 方向の大きさを示す。軸方向 (x 方向) に対しては圧縮となり, 横方向 (y 方向) では引張となっていることが確認できる。

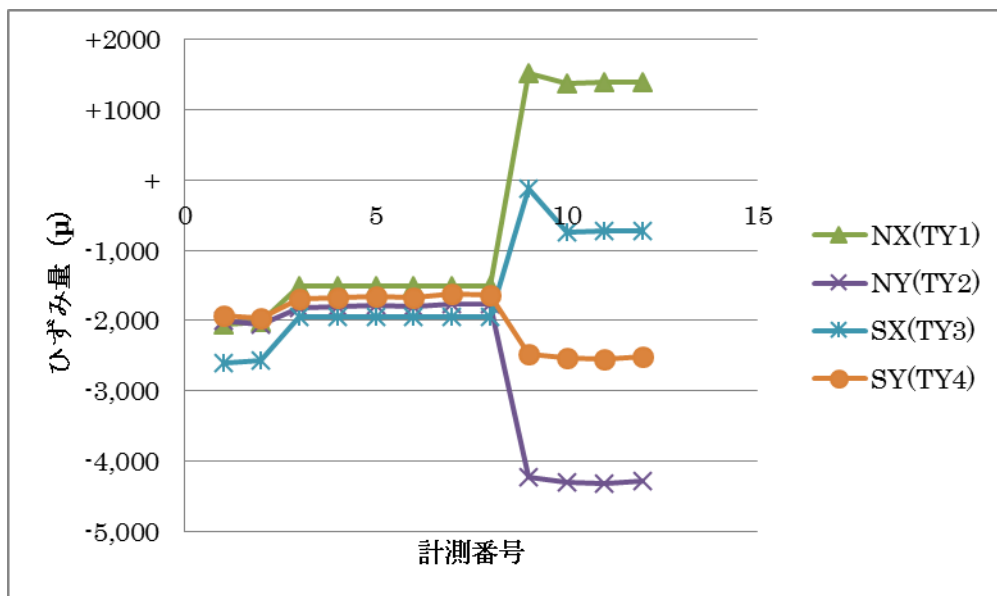


図 12.3-1 ひずみゲージによる計測結果

表 12.3-1 JR 鷹取波 100%加振の前後でのひずみ変化

NX(TY1)	NY(TY2)	SX(TY3)	SY(TY4)
+3029	-2,460	+1821	-838

[単位 : μ]

今回取得した画像を図 12.3-2 に、解析のために画像処理した画像を図 12.3-3 に示す。また、解析においては図の赤丸の点を基準点とした。



図 12.3-2 取得画像

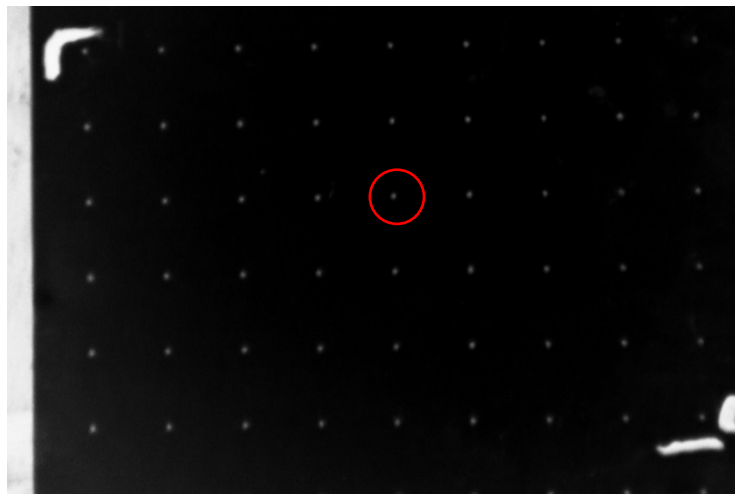


図 12.3-3 画像処理後の画像

基準点に対する移動方向と移動量を変位ベクトルで示したものを図 12.3-4 に示す。単位は画像上のピクセル数である。また、x 方向および y 方向それぞれに対して求めた直ひずみ場を図 12.3-5、図 12.3-6 に、せん断ひずみ場を図 12.3-7 に示す。隣接する 4 点に関して形状関数を用いてひずみを求め、それら 4 点の重心のひずみ量を代表値として色で示したものである。

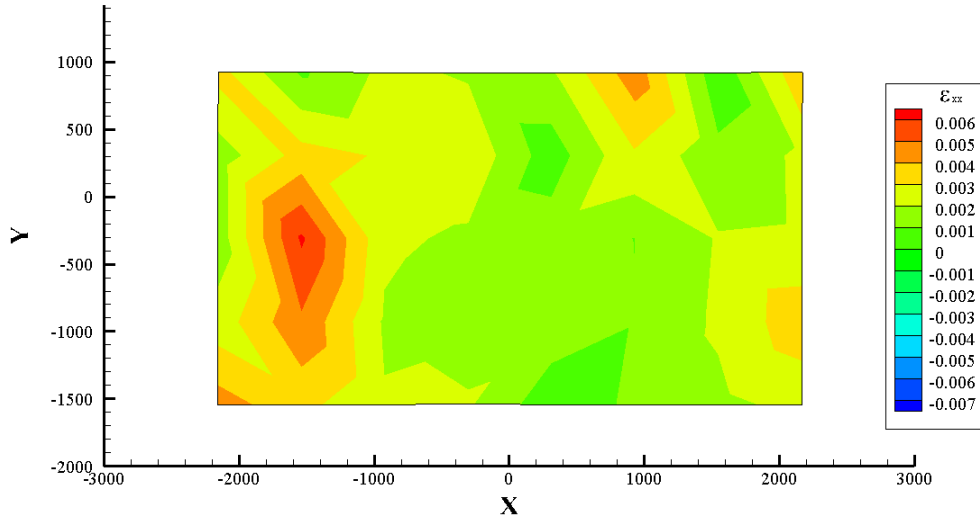


図 12.3-4 変位場ベクトル [単位:pixel]

図 12.3-5 ε_{xx} 分布

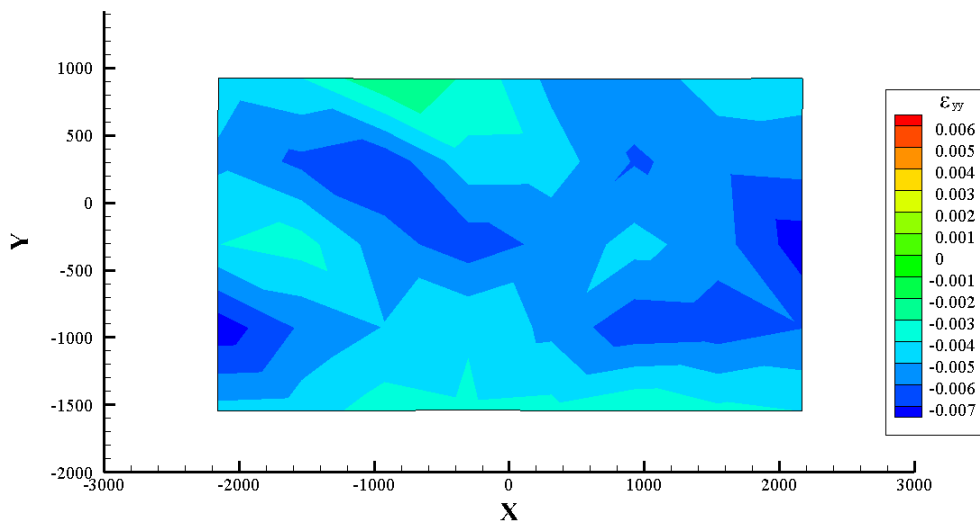


図 12.3-6 ε_{yy} 分布

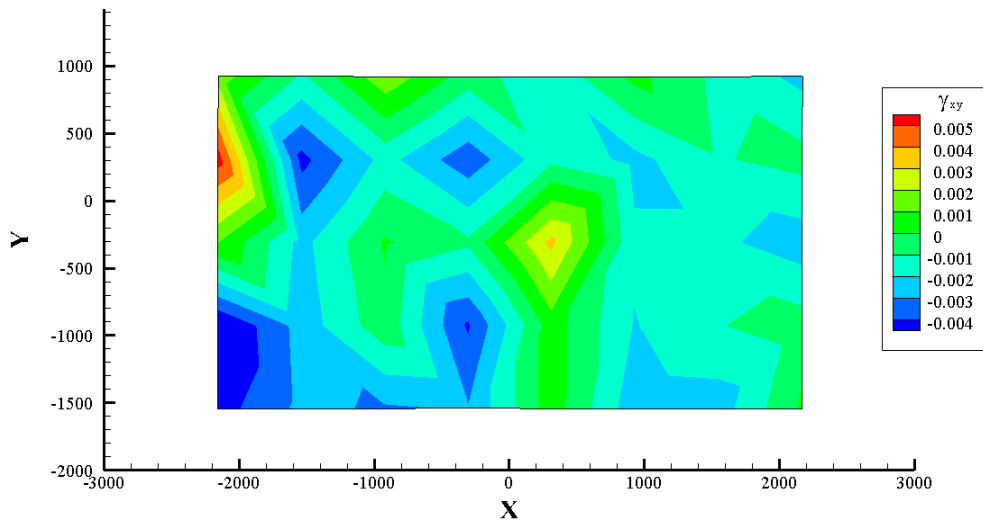


図 12.3-7 γ_{xy} 分布

局所的にひずみが集中する状況が観察された。ひずみゲージの計測結果とひずみの方向が一致し（X方向で引張，Y方向で圧縮），大きさについても 3000μ 程度とひずみゲージと概ね一致が確認された。