

ジャイロセンサを用いた地震観測の有効性に関する考察

A study on effective use of gyro sensors for measuring rotational movement of structures in earthquake

鈴木崇伸*, 堀宗朗**, 壁谷澤寿海***

Takanobu Suzuki, Munao Hori and Toshimi Kabeyasawa

*博士(工学) 東洋大学教授, 工学部環境建設学科 (〒350-8585 埼玉県川越市鯨井 2100)

**Ph.D. 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 文京区弥生 1-1-1)

***工学博士 東京大学地震研究所教授 (〒113-0032 文京区弥生 1-1-1)

Summary: This paper presents new methodology for measuring rotational motion of structures in earthquake. A gyro-sensor is useful for measurement of structure's motion. The merits are realizing minimum observation points and obtaining detail information about movement. The authors have made proto-type gyro-sensors to measure the RC structure's motion in vibration test. Testing data from proto-type gyro-sensors indicate the possibility of effective use.

Key Words: gyro-sensor, health monitoring, observation system, rotational motion

キーワード: ジャイロセンサ, 健全性評価, 観測システム, 角運動

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 地震観測ネットワークの整備が進み, 地盤における地震観測点数は飛躍的に増加し, またデータの公開も進展した. 一方, 構造物の地震観測は, 構造物を所有する機関の負担となるために, 主に研究目的での観測に限られ, 数的にも十分なレベルとはいえない. 日本建築学会強震観測小委員会では, 「建物の強震観測に関する将来像 (案)」¹⁾を提言し, 現状の課題を分析している. 全国的な建物の観測ネットワークの強化を提言する一方で, 問題点として建物健全性の評価, いわゆるヘルスマニタリングに地震観測データが活用されていない点を上げている. その原因として, 実観測データの不足と, 多点観測システムの機能の不十分な点が指摘されている. 最近では, 耐震設計に不備がある構造物の存在が社会問題化しているが, これもまた性能検定する計測手法が不十分であることが影響していると考えられる.

筆者らを含む研究グループはこれまで, 地震計に演算機能を付与して加速度データ以外の出力を得られるよう工夫した新SIセンサーの開発²⁾を行ってきた. また建物の健全性に関しても, 前述の新SIセンサーを建物の振動計測に活用する研究³⁾や, ジャイロを用いて角運動を計測することで, 建物の剛体的な運動を少ない観測点数でより正確に捉える研究⁴⁾を行ってきた. 一連の研究から筆者らは, 構造物の健全性評価に必要となる計測項目を明確にして, 健全性評価に特化した地震計の開発が重要であると認識す

るに至った. すなわち, 加速度データを正確に記録する機能だけでなく, 変位や角変位など多様な出力が可能なハイブリッド地震計の研究開発に着手した.

前述のジャイロを用いた地震観測の研究では, 1 点のジャイロセンサの計測データを用いて偏心した構造物の横振れ運動の分析結果を報告しているが, 今回の報告は, 計測システム全体で見たときの, 観測点数の低減と構造物の剛体的な振動の把握という観点から, 計測した角運動データの分析を行っている. 並進運動と角運動, あるいは質点の運動と剛体としての挙動は, 観測対象に合わせて適宜組み合わせを行うことにより, 合理的な計測が可能になる. 計測に使用したジャイロセンサは 1/100deg ほどの検出性能であるが, 性能を向上させることにより, 構造物の地震観測を合理化できると考える.

2. 地震観測による健全性評価

現在, 地震を被災した建物では, 応急危険度判定あるいは被災度判定が行われる. 現地で構造物の被災程度を観察して被害状況を把握するのが基本である. 全体の被害状況を把握して技術者が本格的に対応を開始するのは, 被害規模にもよるが, 数日から 1 週間以降になる. しかし, 防災拠点では継続使用の可否の判断は地震直後にも要求され, 使用者他の臨機応変な判断に任されているのが現状である. 一方, 詳細な被災度や残余耐震性能の判定は, ひび

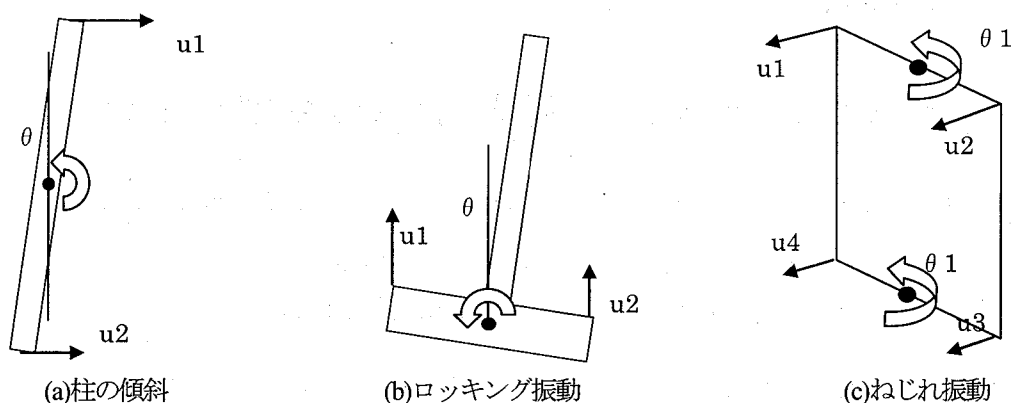


図-1 剛体的な角変位と並進運動の関係

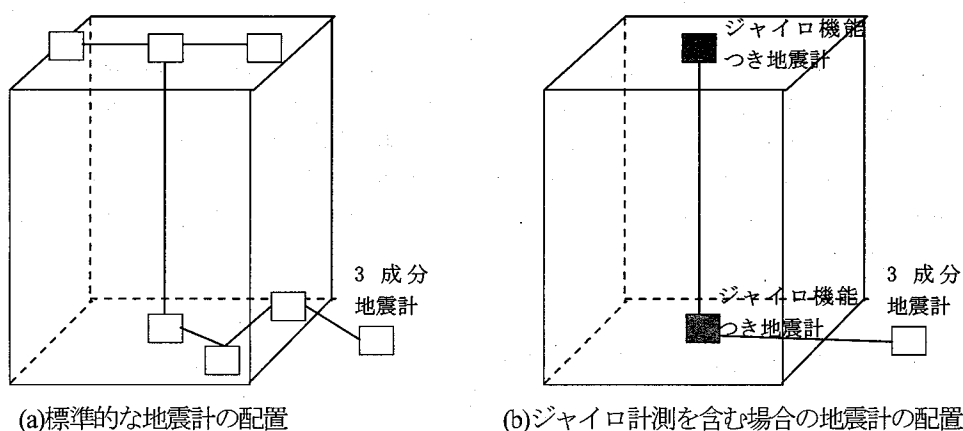


図-2 標準的な建物の地震計測とジャイロ機能付きの地震計による計測

割れや鉄筋の破断など観察可能な現象によってのみ判定されるため、専門家による判断でも経験にもとづいて極めて曖昧に推定されているのが現状である。

被災度や残余耐震性能を地震直後に、定量的に判定するためには、複数の地震計を構造物に展開し、加速度・速度・変位の応答の時刻歴を計測し、震動台実験と同様の計測ができることが望ましい。同時に、残余耐震性能の判定には、固有周期の変化の計測に留まらず、構造工学的により重要なモード変化等も計測できることも望ましい。震動台実験と同様の計測環境を実際の構造物の中で作ることとは決して容易な課題ではない。計測機は勿論、データの伝送・保存・分析に労力がかかるからである。しかし、現在の情報通信技術を使えば、廉価なセンサを開発し、しかも、ネットワーク化することは実現可能である。逆にこのような計測を前提とすれば、経験的な判定を下さざるを得ない応急被災度判定を高度化することが可能となる。すなわち、計測可能な指標を使って地震発生直後に、被災度や残余耐震性能を客観的に判定するのである。実在構造物でデータ取得して性能評価をする手間を考えると、加速度、速度、変位などが同時出力され、同期もとることができるセンサが有望と考えられる。

複雑な振動をする実在の構造物の健全性を評価するた

めには、できるだけ多くの観測点が望まれる。一方で観測点の増加に比例して、観測のコストも増大することになり、取得したい情報量とコストのトレードオフの課題が生じ、実用観測においては大きな問題となる。健全性の評価に必要な振動情報をいかに安く入手するかは、構造物の地震観測の普及に際して早急に解決すべき課題であり、計測システム全般で、要求される仕様を明確にして、機器、設置工事、運用のためのコストダウンを図る必要がある。

3. 回転成分の観測の有効性

構造物の振動解析において、質点ばねモデルが一般的に用いられている。3次元立体を適当な集中質量とばねに置き換えて計算する方法は、簡単であり、質点の変位応答からひずみや応力度が計算される。こうした質点系の運動は並進3成分の観測によって把握することができる。水平2軸、上下1軸の加速度センサが、現在の地震観測の主流になっているが、構造物の運動を精緻に計測するためには、非常に多くの観測点が必要とされる。

構造物の振動には複数の質点が同じような動き方をする剛体的な運動も含まれる。剛体の運動は並進3成分、回転3成分の6自由度となるが、構造物の剛体的挙動に注目する場合には、観測点数を大幅に低減することが可能である。いくつかの例を考えてみる。

図-1 は構造物の振動で問題となる剛体運動のイメージ



図-3 使用したジャイロ (CRS03-02, 外寸は29mm*29mm*18mm)

を示している。同図(a)は柱の傾斜の問題である。変形が小さい場合には、はり-柱モデルで近似できるが、変形が大きくなり、両端がヒンジ化するような場合には、柱の傾斜角が観測の主眼となる。傾斜角の測定には、柱の両端に観測点を設置して、相対変位を高さで割ることにより角度が求められる。一方ジャイロセンサを用いる場合には、1点の観測で角度の変化を計測できる。

同図(b)はロッキング運動のイメージ図である。基礎の回転運動は上部の構造全体に影響を及ぼし、変位応答を増大させる。ロッキング運動を計測するには水平面内で2点の観測点が必要とされる。2点の上下方向の相対変位を距離で割ることにより、基礎の傾斜角が計算できる。柱の例と同様にジャイロセンサを用いれば1点の計測で角度を算出できる。

同図(c)はねじれ振動のイメージ図である。1枚の板のねじれを計測するには、最低4点の変位が必要となる。上下の辺が剛体として変形すると考えると、2辺の回転角を計測すれば、ねじれ角が計測できる。

これらの例からわかるように、ジャイロセンサを用いれば観測点数を低減でき、観測コストを節約できる。

次に建物の観測を例に、ジャイロ観測の効果を考えてみる。日本建築学会強震観測小委員会⁷⁾では、建物の強震観測に関する将来像をまとめている。その中で動的相互作用に着目した強震観測のあり方として、杭支持構造物の地盤との相互作用、免震建物への上下動、ロッキング振動、ねじれ振動の影響、中低層建物のスウェイとロッキング振動の影響といった課題が挙げられている。また望ましい観測システムとして7箇所以上の観測点が必要であると指摘している。このイメージ図を図-2(a)に示しているが、地盤に1箇所、地上階に3箇所、上階に3箇所の構成となっている。

多点観測において観測データの同期は重要な課題とな

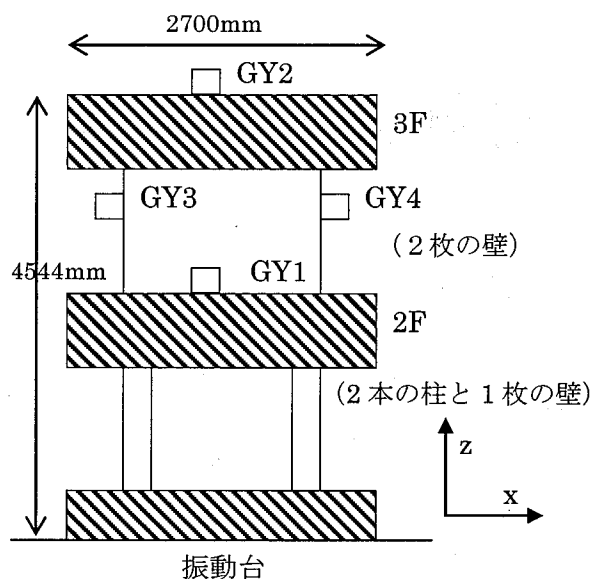


図-4 振動実験に用いた構造モデルと計器の配置

表-1 実験ケースと入力地震動

ケース名	ベース加速度 (Gal)	ベース速度 (cm/s)
ケース1	80.9	7.3
ケース2	182.2	15.3
ケース3	360.7	23.1
ケース4	663.6	34.3
ケース5	601.9	30.1

る。同期をとるために、通常は建物内に接続ケーブルを設置して、マスタースレーブ方式で、すべての機器を起動する方法が用いられている。観測点が増えるほどケーブル配線を多く必要とすることになり、センサのコストに加えて、配線工事のコストがかさむことになる。

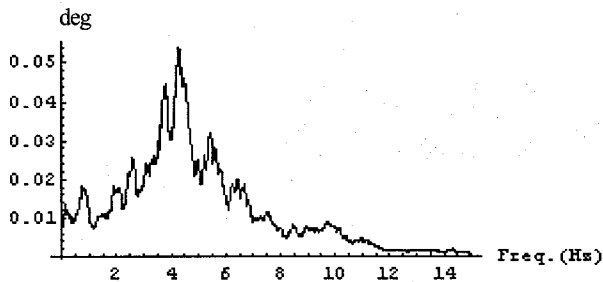
同図(b)はジャイロ機能付きの地震計を用いた場合のイメージ図である。当然、3成分のセンサに比べて高くはなるが、建物内は2点でロッキングとねじれを計測できる効果は大きい。また配線に関しても、(a)に示した観測では6本必要となるが、(b)では2本の接続ケーブルとなり、配線手間は格段にコストダウンができる。

著者らは、加速度と同時に変位出力も可能な「ハイブリッド地震計」を開発して、構造物の健全性評価に活用することを提案⁸⁾しているが、角運動の計測機能も追加することにより、より合理的な構造物の地震観測が実現できると考える。

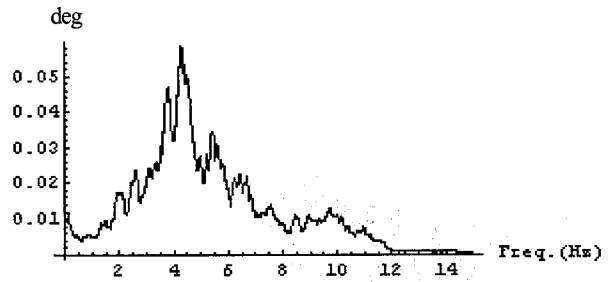
4. ジャイロセンサによる振動計測例

ジャイロセンサを用いた地震計測の有効性を考えるため、大型振動台実験の計測データを分析する。

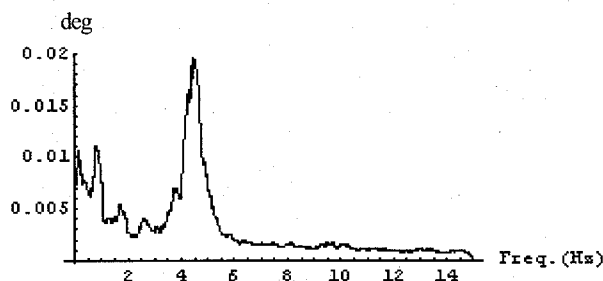
4.1 ジャイロセンサと振動実験の概要



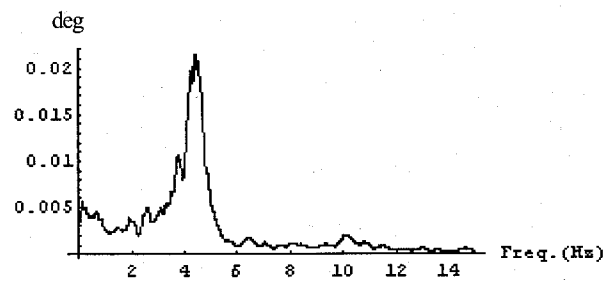
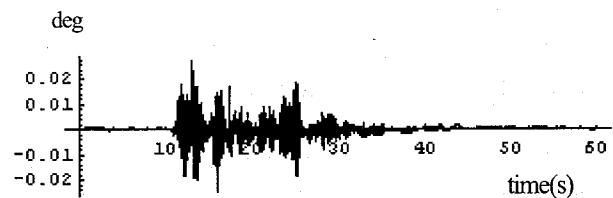
(a)ジャイロセンサによるz軸まわりの角変位



(b)サーボセンサによるz軸まわりの角変位



(c)ジャイロセンサによるx軸まわりの角変位



(d)サーボセンサによるx軸まわりの角変位

図5 ジャイロセンサの計測精度

ジャイロセンサは軍事目的が主であった時代は高価なセンサであったが、自動車の制動利用など民生利用が盛んになって価格も安くなってきた背景がある。最近ではカメラのブレ防止用のセンサとしても多く用いられている。いろいろな種類のジャイロセンサが開発されているが、振動ジャイロを用いた試作機を製作して、振動計測を行った。

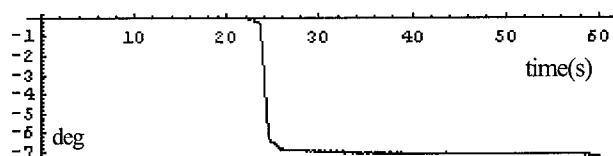
振動ジャイロは内部素子を振動させ、角速度が加わるとコリオリ効果で素子に発生する別の方向の振動を検知して角速度を検出するセンサである。音叉型振動子やビーム型振動子、リング型振動子を用いたものがあるが、外部からの衝撃やそれによる振動の影響を受けるため、角振動だけを検出できるセンサが望ましい。またノイズレベルが低く安定して角運動をとらえる性能が要求される。

試作機では、リングの振動を利用したシリコンセンシングシステムズ社製のジャイロセンサ (CRS03-02) を用いることとした。1軸の角速度を計測するセンサであり、最大振幅で 100deg/s まで計測可能な仕様となっている。図-3 に試作機に組み込んだジャイロセンサの写真を示してい

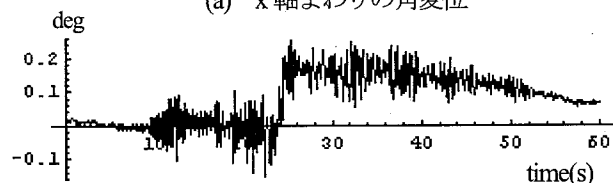
るが、きわめて小型のセンサであり、試作機には3個を組み込んで3軸の角運動を計測可能な仕様とした。

東京大学地震研究所と防災科学技術研究所が共同して行ったRC構造物の動的挙動に関する共同実験⁵⁶⁾⁷⁾に参加してジャイロを用いた計測を行った。その実験モデルのイメージ図を図4に示している。3枚のRC床を柱あるいは壁で結合した構造であり、1層目が壁と柱のピロティ構造となっている。実験の詳細は壁谷澤他⁶⁾、金他⁷⁾の論文に紹介されている。

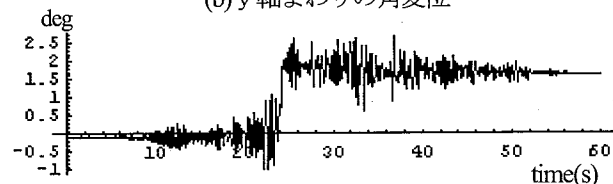
試作したジャイロセンサを4箇所に取り付けた。すなわち2Fと3Fの床にそれぞれ1箇所と、2層目の壁に2箇所とした。図4に示すように、センサ番号をGY1からGY4とする。ジャイロセンサのほかにも3成分のサーボ型加速度センサを8箇所取り付けて、ジャイロの計測データに対応できるように観測を行った。計測のサンプリングは100Hzとした。なお、3次元振動台の角運動の影響も考えられるが、今回の実験では振動台にジャイロセンサを取り付けてはいない。



(a) x 軸まわりの角変位



(b) y 軸まわりの角変位

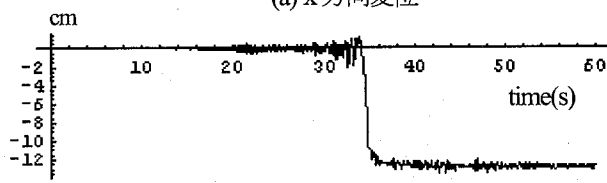


(c) z 軸まわりの角変位

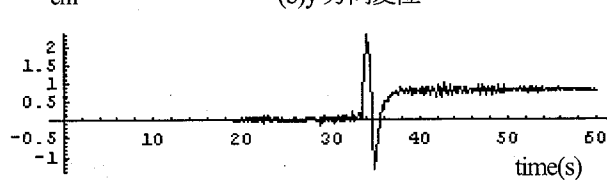
図-6 ケース5のGY1の計測結果



(a) x 方向変位



(b) y 方向変位



(c) z 方向変位

図-7 ケース5のサーボセンサの計測結果

表-2 成分ごとの最大角変位(単位はdeg)

		case2	case3	case4	case5
GY1	x	0.008	0.022	0.044	7.203
	y	0.013	0.057	0.109	0.251
	z	0.019	0.139	0.355	2.712
GY2	x	0.012	0.030	0.055	7.257
	y	0.016	0.061	0.119	0.156
	z	0.022	0.142	0.362	2.544
GY3	x	0.029	0.070	0.108	7.365
	y	0.015	0.076	0.146	0.321
	z	0.018	0.137	0.354	2.852
GY4	x	0.025	0.072	0.104	7.006
	y	0.016	0.072	0.139	0.240
	z	0.022	0.143	0.364	2.621

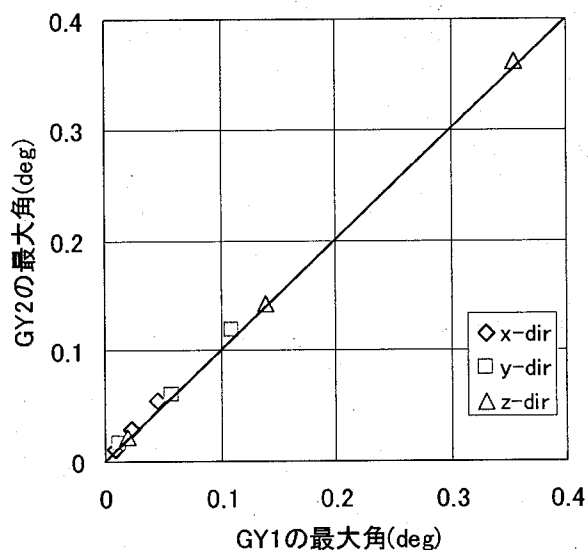


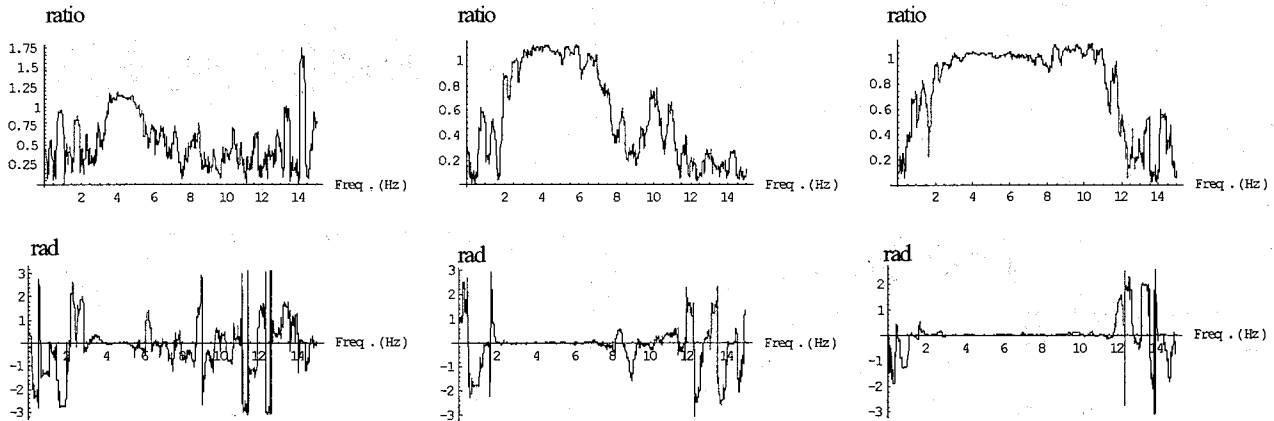
図-8 GY1 と GY2 の最大値の相関

座標軸は加振方向をx, 上下方向をz, 紙面に直角な方向をyとする。また回転運動の計測は図-4に示した座標軸に対して左ねじ方向を正としている。実験は5ケースの地震動を用いて同じ試験体に振動を加えているが、振動台に固定された床面で計測した加速度と速度の最大値を表1に示している。試験体の状態はケース3で小破, ケース4で中破, ケース5で大破となっている。

4.2 角運動の検出精度

ジャイロセンサによる地震観測は前例もあまりなく, 試作機がどの程度の計測性能を有しているかを分析する。2点のサーボ加速度計から相対変位を求め, 距離でわって角変位を計算した結果と, 角速度を積分して角変位にした結

果を比較する。図-5はケース3のGY2のz軸まわりとx軸まわりの角変位の計算結果を示している。(a)はジャイロセンサによる計測結果, (b)はサーボセンサによる計測結果である。2つの波形はよく一致しており, フーリエスペクトルもよく一致するのが確認できた。同図(c)と(d)はx軸まわりの計測結果であるが, z軸回りに比べて振幅が小さくなっている。その結果, サーボセンサから計算した結果に比べて, ノイズが大きいのがわかる。今回の試作機はノイズレベルが高く, 定常的に0.5deg/sほどのノイズが混入している。その結果, 最も入力小さいケース1では角運動を検出できない結果となり, 試作機の角度検出性能は10Hz程度の振動を対象にする場合1/100deg程度であることが確認された。



(a)x 軸まわり (b)y 軸まわり (c)z 軸まわり
図9 GY1 と GY2 の比較 (スペクトル比と位相差スペクトル)

次に角変位が大きい場合の分析を行う。表-2 は 4 箇所のジャイロセンサで計測した角変位の最大値を示している。前述のようにケース 1 はノイズとみわけがつかないために省略している。ケース 5 が最大となっているが、ケース 4 までに比べて格段に大きくなっている。観測データの中で最大の角変位振幅となったケース 5 の GY1 の観測波形を図 6 に示す。同図(a)は x 軸まわり、(b)は y 軸まわり、(c)は z 軸まわりの計測結果である。4 個のセンサとも同様の階段状の波形となっている。ケース 5 では柱が崩壊し、上階が大きく変形したが、x 軸まわりの約 7 度の角度は 1 階の柱が崩壊したあとの実測結果とおよそ一致している。

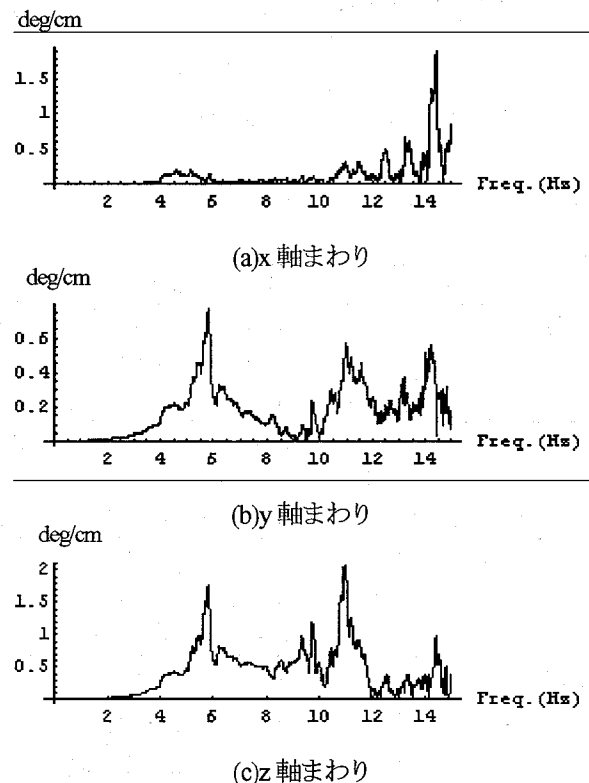
比較のために GY1 の近くに設置してあったサーボセンサの変位記録を図-7 に示す。この結果は、振動開始前の記録でゼロ線を補正したのち台形積分結果をローカット処理して求めている。1 層目の柱が破壊して大きく変形したことはサーボセンサを積分することによっても検出することはできる。しかしながら、加速度記録から変位を計算するには積分計算を 2 回行う必要があり、安定した計算結果を得るのに適切なフィルター処理が必要とされる。DC 成分まで計測できるサーボ型加速度計では崩壊による傾きの影響によりみかけの加速度が計測されるため、変位波形が乱れるが、図 7(c)では床面が上昇する結果となり、波形の乱れの影響を受けている。一方でジャイロセンサは角速度を計測する機構であり、角度の計算は積分計算 1 回ですむために、容易に剛体の永久変形角が計算できる利点があると考えられる。

4.3 角運動の分析

角運動の計測結果を用いて、実験モデルの運動を分析して、並進運動に加えて角運動を計測する有効性について考察する。

(1) 最大角変位の分析

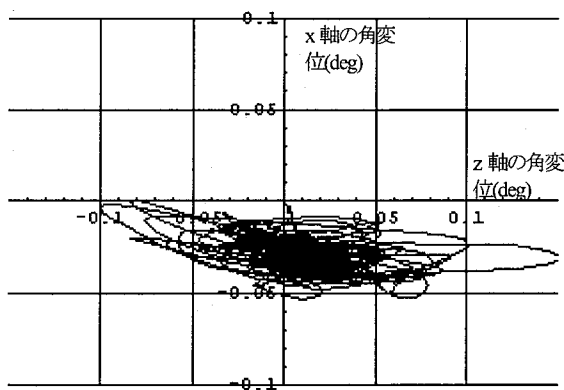
表-2 に示したように、4 つのジャイロセンサは成分ごとにおよそ同じ最大値となっている。しかしながら、角変位が 0.1deg 以下の場合には、ノイズの影響を受けて差異が生



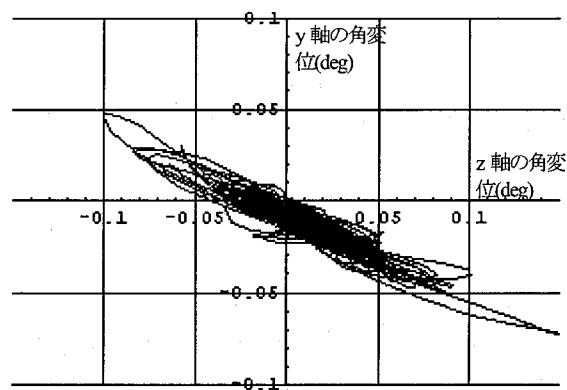
(a)x 軸まわり (b)y 軸まわり (c)z 軸まわり
図-10 角運動の周波数応答 (GY2)

じている。試作機の検出能力が 0.01deg 程度であることは前に述べたが、積分計算時の誤差累積も含めると、計測精度は 1/10deg 程度といえる。図 8 はケース 2、ケース 3、ケース 4 の GY1 と GY2 の最大値を成分ごとに分けてプロットした結果である。波形の代表値の比較となるが、多少のばらつきはあるものの、1:1 の線の上にのっている。GY3、GY4 についても同様である。2 層目は壁構造となっており、1 層目に比べて剛性が高く、2 層目がおよそ剛体的に挙動しているのがわかる。このように剛体として運動する部分では 1 点の並進運動と角運動の記録があれば、他所の運動が計算可能である。

図-8 では最大値のみに注目したが、2 点で計測した角運動がどれほど一致しているかを分析してみる。図-9 はケー

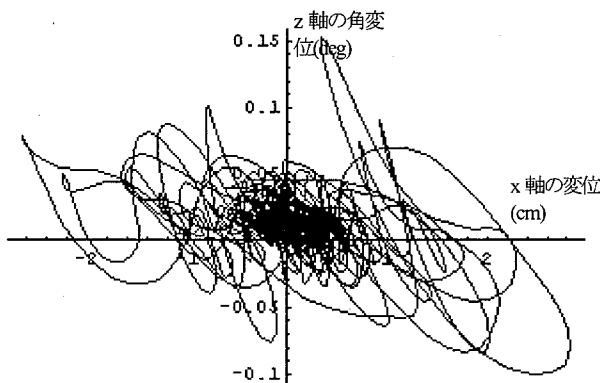


(a) z 軸と x 軸

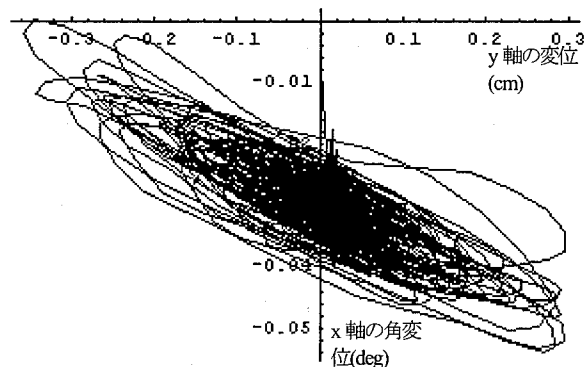


(b) z 軸と y 軸

図-11 角変位のヒステリシス (ケース 3, GY2)



(a) x 方向の変位と z 軸まわりの角変位



(b) y 方向の変位と x 軸まわりの角変位

図-12 並進運動と角運動のヒステリシス (ケース 3, GY2 と重心変位)

ス3におけるGY1とGY2のスペクトル比と位相差スペクトルを計算した結果である。最大値ではおよそ一致していたが、振動成分ごとにみると、一致する帯域と、一致しない帯域があるのがわかる。(c)に示したz軸まわりの運動はねじれ振動に相当するが、2Hzから10Hzの範囲で、スペクトル比は1となり、位相差は0となっている。(a)に示したx軸まわりと(b)に示したy軸まわりの角運動はロッキング運動に相当するが、一致する範囲がz軸に比べて狭くなっている。特にx軸まわりの運動は、図-5の(a)と(c)に示したフーリエスペクトルのピーク振動数付近では一致するが、それ以外では一致しない結果となっている。x軸まわりは、2層目におかれた壁に直交する方向であり、わずかなではあるが層間の変形が回転運動に影響を及ぼしたと考えられる。

最大角変位が観測場所によらず同じ値となるのは、構造の卓越振動数付近で2層目が剛体的に運動をしているためと考えられ、また周波数帯域によっては剛体的な運動ではないことが確認された。剛体運動を仮定できるかどうかは、構造物ごとに検討する必要がある。

(2) 入力地震動と角運動

次に角運動を詳しく調べてみる。角運動は振動台の1軸の地震動入力に対する応答であり、強められる成分と弱められる成分がある。ここではベース部分の変位波形のスペ

クトルと角変位のスペクトルの比から計算される周波数応答を計算する。

図-10はケース3の計測結果をもとに計算した、振動台の変位に対する3成分の角運動の周波数応答関数を示している。縦軸は1cmの変位振幅で励起される角変位(deg)の振幅を示している。x軸まわりの運動は最も小さく4~6Hzあたりでわずかに増幅されるのと、10Hz以上の特定の周波数での増幅があるのがわかる。同図(b)はロッキング運動であるy軸まわりの計算結果、(c)はねじれ振動であるz軸まわりの計算結果であるが両者はよく似たグラフとなる。z軸まわりが大きくなることは先に述べたが、y軸まわりはその1/2から1/3程度の増幅となっている。ピークの位置は同じであり、6Hzあたりと11Hzあたりとなっている。図5にケース3のGY2のz軸まわりの角運動のフーリエスペクトルを示しているが、4Hz付近のピークは入力地震動の影響と考えられ、6Hzのピークがねじれ振動による増幅に対応している。この結果に従えば振幅1cmで約6Hzの定常振動を加えればz軸まわりには約2degのz軸まわりの角変位が生じることになる。

図-10はケース3についての結果を示したが、ケース2もほぼ同様の計算結果となる。ケース4、ケース5と破壊が進行するにつれて、ピーク位置が低振動数側に移り、またピークが明瞭でなくなっていくことが確認された。健全度の評価に有用な指標になる可能性がある。

(3) 角運動と並進運動の連成

入力地震動と角運動の関係について分析した結果、ねじれ振動とロッキング振動が連成している可能性が判明した。次に連成の様子について分析を進める。図-10 に対応させてケース3の計測結果を用いて説明する。

図-11はGY2の成分ごとの角変位の時間変化をプロットした結果である。(a)はz軸とx軸まわりの角変位の変化であるが、x軸まわりの角変位は小さく、両者の対応ははっきりしない。一方、(b)はz軸とy軸まわりの角変位の変化を示している。2つの軸の角運動の大きさは比例関係にあり、連成振動となっていることがわかる。その比率は1:2となっており、y軸まわりの回転はz軸まわりのおよそ半分となっている。またy軸とx軸の関係は(a)で示したのと同じようなグラフとなる。

次に変位と角変位の連成について調べる。振動台の揺れ方に応じて実験体は複雑に振動するが、並進運動のある成分と角運動が連成して複雑な振動が生まれていくと考えられる。図-12は並進運動と角運動の成分の時間変化をプロットしたグラフである。角運動はケース3のGY2を使用し、並進運動は、3段目のRC床板の重心位置の変位を用いている。同図(a)は加振方向のx変位と最も大きな角変位を生じるz軸まわりの角変位の変化を示している。変位の1サイクルに対して、z軸まわりの角運動は数サイクルの運動が発生している。図-10に関連して、2つの卓越振動数があることを述べたが、z軸まわりの角運動は、水平変位のサイクルに対して複雑に角運動する成分が重なっていることがわかる。この運動は、y軸まわりの角運動でも同様である。

同図(b)はy方向の変位とx軸まわりの角変位の変化を示している。1層目が柱となっている側に変位が生じたときに、柱側が低くなるような傾きを生じているのがわかる。ジャイロによる角運動の計測は、並進運動の計測だけでは把握しにくい剛体的な運動を抽出するのに有効な計測であると考えられ、3章で述べた観測点数の低減による効果のほかに、複雑な剛体的な運動を計測するのに有効であると考えられる。

5. まとめと今後の課題

本研究はジャイロセンサを用いた構造物の振動計測の有効性に関する検討を行っている。構造物の健全性評価のためには多点計測が必要となるが、剛体的な運動に計測の主眼がおかれる場合には、ジャイロによる角運動を計測することにより、大幅に観測点数を減らせることが明らかになった。このとき、センサ個数が少なくなる利点とともに配線工事が少なくなる利点は実用観測において注視すべき要素である。

さらにRC構造物の大型振動台試験に参加して、ジャイロセンサの試作機で計測した結果の分析を行った。剛体的

な運動に対して、角運動の情報は有用であり、並進運動と角運動がどのように連成するのかを明確にすることが確認できた。今回の試作機はノイズレベルが高く、中小地震の観測には適さないことも明らかになったが、それにも増して角運動を計測する重要性が確認されたといえる。

著者らは構造物の健全性に関連する多様な出力が可能な「ハイブリッド地震計」の開発を目指しているが、速度や変位といった並進成分だけでなく、角運動に関する出力も可能なセンサについて研究開発を進めていく予定である。

謝辞

東京大学地震研究所ならびに防災科学技術研究所の実験にかかわった皆様には貴重な計測の機会を与えていただき、感謝いたします。また東京ガス(株)の小金丸氏、(株)山武の築田氏、古川氏には、センサの試作、現地での計測でお世話になり、感謝いたします。今回の研究は(財)地震予知研究総合振興会に設立した研究会で進めてきた成果であり、池田潤一氏をはじめとするメンバー各位にあわせて謝意を表します。

参考文献

- 1)日本建築学会強震観測小委員会、建物の強震観測に関する将来像(案)、日本建築学会ホームページ http://www.eqgmo.ajj.arch.metro-u.ac.jp/eqgmo/Prpsl_Aa.pdf.
- 2)T.Yanada et al., Earthquake Sensor, Sensors Update Volume 11, Sensors Technology- Applications-Markets, WILEY-VCH, 2002, pp.159-216
- 3)庄松涛, 他: 偏心ピロティ構造の震動実験その4 地震計による相対変位モニタリング, 平成14年日本建築学会全国大会, 2002
- 4)鈴木崇伸, 堀宗朗, 壁谷澤寿海, ジャイロセンサーによる構造物の耐震性能モニタリング, 応用力学論文集 Vol.6, pp.747-754, 2003
- 5)壁谷澤寿海: 鉄筋コンクリート造建築物の限界状態と地震動, 強震動予測シンポジウム, 2003
- 6)壁谷澤寿海, 他: 鉄筋コンクリート造偏心ピロティ建物の震動実験(その1), 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp.165-170, 2002
- 7)金裕錫, 他: 鉄筋コンクリート造偏心ピロティ建物の震動実験(その2), 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp.171-176, 2002

(2006年4月13日 受付)