

地震計について

株式会社 プラント耐震設計システムズ
池 田 雅 俊

1. まえがき

新潟県中越地震や福岡県西方沖地震のような予測されなかった直下型の地震は日本全国どこで発生してもおかしくないといわれている。耐震設計基準等の規制基準で規定されている地震動の強さは最低限の要求値であり事業所の立地する地域の地体構造や局所的な地盤の特徴は考慮されていない。地震の揺れの大きさや範囲は、地震発生メカニズムや地盤や地形の影響を受ける。平成 17 年 7 月の千葉県北西部地震で、足立区は、古い利根川などの洪水によってできた軟弱地盤の地域で、震度 5 強となった発表された。この地震での震度分布では、震源に近い場所よりも、遠くの軟弱地盤で揺れが大きくなっている場所がいくつかある。サイトの揺れやすさを把握するには地震波形を計測して地盤の特徴及び表層地盤における地震波の増幅の様子を評価するのが有効な方法の 1 つである。

地震防災や耐震対策を検討するとき、自分の事業所でどんな地震が来襲するかを予測することが第 1 歩である。

大型の危険物質を貯蔵するタンク、巨大な橋梁、超高層ビルなどに大きな影響を与えるといわれる長周期地震動は、従来対象としてきた短周期地震動とは地震波の伝播の様子が違い、震源を発生した地震動は遠方までしかも不均一な伝わり方をし、また、サイトの深い地盤（深地下構造）の影響を受けるといわれている。震源とサイトの組み合わせを考慮した長周期地震動予測が欠かせないといわれている。的確な地震防災対策のために、サイトでの地震波形を収集して、その特徴を把握することが重要である。

近年の地震発生状況を考慮して、公的な機関や地方公共団体あるいは各企業が独自に地震計を設置して予測した局所的な地震動に対してきめ細かく地震防災対策を実施するところが多くなってきている。

地震観測装置は地震計（狭義）とも呼ばれている。発電所、LNG タンク、石炭サイロ、超高層ビル等、大型建造物の地震観測や、地震の常時微動観測、あるいは地震波収録や地震応答波形をコンピューターで解析するためのデータ収録を行う装置である。

一方で、火災や爆発などの地震の二次災害を防止するため、地震発生時に機械設備の緊急制御・遮断や、新幹線など鉄道の緊急停止、工場全域・地域への広報活動を行うために、感震器とも呼ばれている地震監視装置を設けることもよく行われている。

今回は地震防災を確実にを行うために必要な地震計に関して説明する。

2. 地震計の利用

広義の地震計は、発生地震動に関する力学的な情報を計測する地震動モニタリング装置である。地震計（広義）はその利用形態や、利用目的或いは得られるデータの種類によりいろいろな名称が使われている。

加速度、速度、変位などの地震波形を出力する狭義の地震計、地震があったことを知らせる感震器、その外、地震の強さを表す震度階や SI 値を出力する震度計、SI 計などがある。

地震動モニタリングの進め方は、定常観測と臨時観測の 2 つの形態がある。前者は、長期間にわたる一定レベルの観測を継続して地震活動の時間変化を追跡するものであり、後者は、大地震発生後の余震観測や特定地域のテクトニクス解明などを目的として短期間実施されるものである。臨時観測は、陸上だけでなく海域でも行われることがあり、地震計とデータ収録装置とバッテリーを耐圧容器に収納した自己浮上式海底地震計などが使用されている。

2.1. 地震計

地震計とは、地震による振動波形を記録する装置である。

使用目的により測定範囲は、周期に関して 0.01 秒以下のものから、1 時間以上に及ぶ周期の地震波の計測が行なわれている。振幅に関していえば、人間にまったく感じない微小地震クラスでは振幅が 0.001 ミクロン(μm)レベルのものから、巨大地震による地震動では振幅が 2~3m ものにまで達する。

このように、地震動の振幅および周波数の範囲はきわめて広いため、観測対象に応じて、目的（防災、設計、研究等）に合った性質の地震計が使用される。その種類としては、強震計、高感度地震計、広帯域地震計の 3 種に大きく分けられる。

2.1.1. 強震計

SMAC 型強震計のような強震計は非常に強い揺れまで記録する。地盤構造や耐震設計など、主に工学的な研究に用いられる。多くは加速度地震計であるが、変位或いは速度地震計の特性を持つものもある。気象庁の観測網では 1 倍型の変位型強震計が用いられている。

たとえば、公共土木施設の地震防災研究を進めるために建設省が

表 1 のような強震観測を行っている。波形記録は土木研究所で補正処理を行い、応答スペクトル等の解析結果と併せて彙報として毎年とりまとめ発刊されている。

表 1 一般強震観測の観測点数と強震計型式

対象設備	設置数	強震計型		
		SMAC型	電磁式	普及型
		設置数(台)	設置数(成分数)	設置数(台)
道路施設	181	94(181)	22(189)	65(351)
河川施設	53	18(33)	9(63)	26(69)
ダム施設	121	15(30)	56(614)	50(129)
下水道施設	6	6(13)	0(0)	0(0)
合計	361	133(257)	87(866)	141(549)

また、科学技術庁防災科学技術研究所により全国 1000 地点（現在 1001 地点）で、気象庁震度で 3 以上を記録した地震に関して、全ての観測点のデータは一切の制限を加えることなく K-NET(<http://www.k-net.bosai.go.jp/>)において公開されている。地震後 2 週間以内（実際には数時間—数日）に最大加速度コンターマップおよびデジタル波形データが公開されるとともに、波形データは ftp（<ftp.k-net.bosai.go.jp> の /pub/soildata および /pub/strongmotiondata ）でも公開される。

地表と地下がセットになった強震観測網には KiK-net（<http://www.kik.bosai.go.jp/kik/>）という名称がつけられている。地表における強震波形と較べることにより、地盤の強震動に対する応答を調べる重要な手がかりを提供するものである。

2.1.2. 高感度地震計

高感度地震計は小さな地震まで敏感に検知し、主に局地的な地震の震源決定や発震機構解決等々に用いられる。小さな地震は数多く発生しているため、短期間のデータでも、地下のプレート構造や地殻構造、および各地の地震活動度等を精度よく推定することができる。

防災科学技術研究所により、全国的な高感度地震観測網（Hi-net）の整備を進められている。防災科学技術研究所、大学、気象庁において設置された約 1,100 箇所もの高感度地震計の連続波形データが Hi-net ホームページ（<http://www.hinet.bosai.go.jp/>）にて公開され、広く研究者や防災関係機関が利用できるようになっている。

2.1.3. 広帯域地震計

広帯域地震計は大地震や遠方の地震による非常にゆっくりとした揺れまでを検知し、地震メカニズムの推定や地球深部構造の研究等に用いられている。

防災科学技術研究所と大学を中心として、全体で約 90 点が稼働している。これらの観測データはテレメータによって防災科研へ常時伝送され、波形の自動解析や蓄積、およびデータは F-NET ホームページ（<http://www.fnet.bosai.go.jp/>）で公開されている。

2.2. 感震器

地震計のように地震動の波形を記録するのではなく、単に地震動があったことを知らせたり、その時刻や振幅などを記録する装置である。現在の感震器の多くは、地震計のように振り子を利用したもので、その振幅が予め設定された値以上になると電気信号を出すよう

にしている。これにより、大地震のときに設備の緊急停止、列車の運行、電気、ガスや水道の供給制御を行なうなど、防災の面で重要な役割を果たしている。

2.3. 震度計

震度を測定する装置である。震度というのは、正確には震度階と言われるもので、もともと人間の感覚や木造建築物の被害の状況に基づく揺れの強さを分類したもので、長さや重さなどのようにはっきりとした定義はなく、機械で正確に測定するものではなかった(気象庁旧震度階)が、兵庫県南部地震の後に明確に定義(平成8年気象庁告示第四号による震度階)された。リアルタイムで震度情報を知らせることを目的として、地震波形をデータ処理して得られる計測震度から旧震度階と整合するように震度階を定義している。

計測震度を出力する装置を震度計という。

表2には、加速度、計測震度、震度階、旧震度階との関連を示す。加速度と計測震度は1対1には対応しないが固有周期1秒の構造物の場合について示している。

多くの地震対応マニュアルにおいて、「震度5」が、初動対応の閾値になっている。内閣府の情報対策室設置も「震度5強」で設置されることになっている。

表2 震度階「新旧対比」概略早見表

加速度基準(計測震度換算)

加速度 (Gal)	計測震度 (T=1.0 s)	震度階	旧震度階 (体感)
0.6	0.5	0	0
0.8	0.75	1	1
1	0.94		
2	1.55	2	2
2.5	1.75		
5	2.34	3	3
8	2.75		
15	3.3	4	4
20	3.55		
25	3.74	5弱	5
50	4.34		
60	4.5	5強	5
80	4.75		
100	4.94	6弱	6
110	5.03		
180	5.45	6強	6
190	5.5		
250	5.74	7	7
320	5.95		
340	6.01	7	7
380	6.1		
400	6.15	7	7
580	6.47		
600	6.5	7	7
1000	6.94	7	7

破壊現象から事後判定

2.4. SI 計

SI 値を出力する装置を SI 計という。

SI 値とはアメリカのハウスナー(G. W. Housner) によって 1961 年に提唱された。地震によって一般的な建物にどの程度被害が生じるかを数値化したものである。

地震動による建造物の破壊等の被害は、地震発生時の建造物の振動エネルギーが関連している。そこで、建造物の振動エネルギーと直接関連する応答速度に関して、固有周期が 0.1 から 2.5 秒の建造物に対して平均した値を SI (Spectral Intensity) と定義した。単位は通常、cm/s でカイン (kine) としている。SI 値と計測震度はよい相関性があるといわれている。

ガス業界や交通業界などリアルタイムに設備の運転に対する対応が必要なインフラ企業などでは、SI 値を基準に運転停止、供給停止等の判断を行っている。

2.5. 複合地震計

地震波形を計測する地震計に、データ収録装置やコンピュータを備え、地震波形処理専用アプリケーションを備え、アナログ出力、ON/OFF 出力と通信端子を標準装備し、PLC などのシステム機器や現場表示器との接続を 1 台で可能とするような安価なシステムも開発され、的確な緊急処置を可能としている。

たとえば、次のような出力又はデータ収録が行われている。

(1) アナログ信号

- ・計測された加速度信号のベクトル値の最大値
- ・計測された加速度信号から求めた SI 値の最大値
- ・SI 値
- ・計測震度

(2) ON/OFF 出力信号

- ・合成加速度値、SI 値、計測震度相当値が設定された値を越えた場合感震出力
- ・液状化判定が発生した場合の各種の条件を演算結果により感震出力

(3) アナログ出力

地震計から出力されるローカット、バイアス等のユーザー調整出力

(4) 地震波形を長時間記録

自動波形記録機能として、計測された値をトリガ条件として波形記録

3. 地震計の原理

振り子は地震で大地とは異なる運動をする。この振り子の運動を利用して、地震計は大地の揺れを測定する。これは「振り子の原理」を利用している。

「振り子の原理」を説明する。図 1(A)のように大地に錘を糸あるいはばねで吊り下げる。(B)のように大地が左右に早く動くとき錘はほとんど動かず空間に静止し、大地と錘の間には大

地の動きと等しい変位差が生じる。一方、(C)図のように大地がゆっくり左右に動いても錘は大地と一緒に動き、大地と錘の間には変位差が生じない。ような特性を「振子の原理」という。

このように、振り子の錘の重さ、糸の長さあるいはばねの強さ（言い換えれば振り子の固有振動数）を調整することによって、大地の動きに対してさまざまな特性を持たせることができる。地震計は、この大地と錘の間の相対変位を記録して大地の動きを知るものである。このことは、振り子の固有振動数より早い動きは計測できるが、ゆっくりした動きは相対変位が生じないので計測することはできないといえる。

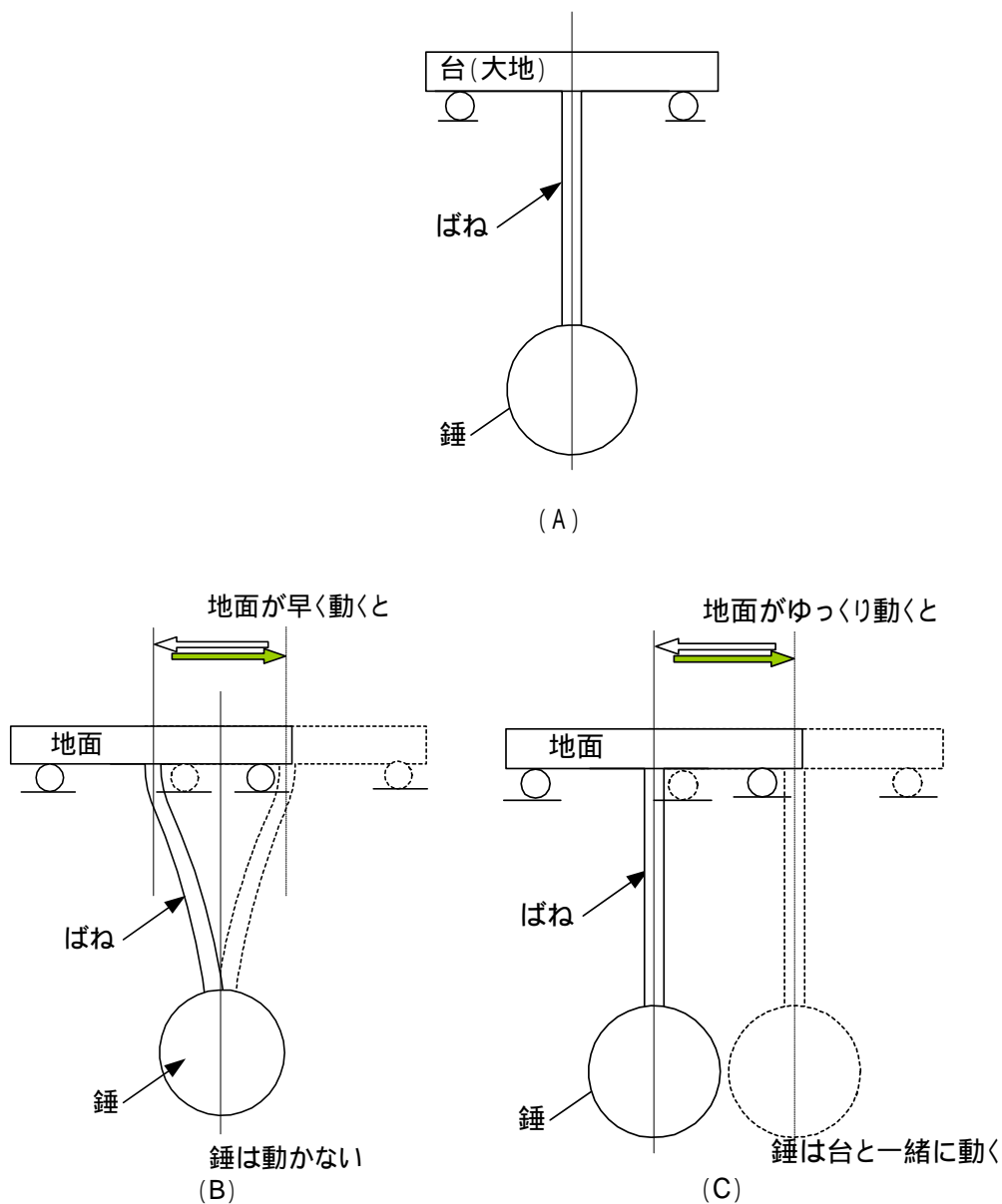


図 1 地震計の原理

地震には、小刻みな早い揺れから大きなゆっくりした揺れまでいろいろな種類の揺れが混じっていて、一種類の地震計で全てのタイプの振動を記録することはできない。そのため、計測の目的に応じて、適切な特性を持つ地震計を使うことになる。

4. 地震計の分類

地震計は、いろいろな種類があり、利用目的に応じて選択することになる。構造的分類、信号センサーによる分類及び出力特性により地震計を分類すると表 3 示すようになる。

表 3 地震動の分類

		構造的分類	信号センサーによる分類	出力特性による分類
広義地震計	感震器	機械式	落球式感震器	加速度計
			倒立棒式感震器	
			水銀式感震器	
			摩擦式感震器	
			その他	
		非接触電気式	光学式振動センサ	変位計
		渦電流式センサ		
		容量型センサ		
		その他		
	狭義地震計	機械式	ウィーヘルト式地震計	加速度計
			機械式SMAC型強震計	
			その他	
電気式		動電型センサ	加速度計 速度計 変位計	
		サーボ型センサ		
		ひずみ型センサ		
	容量型センサ			
	差動トランス型センサ			
	その他			

4.1. 構造的分類

(1) 機械式地震計

振り子の動きをてこで機械的に又は光学的に拡大して、ペン（描針）により紙の上に記録する。大森式、ウィルヘルト式、ミルン式、ウッド・アンダーソン式などの地震計がある。特にウィルヘルト式地震計は 1950 年代まで気象台や測候所で使われたが、現在では強震計として以外では使われていない。

(2) 電気式地震計

振り子の動きを電流の変化に変換して、

検流計により感光紙に記録する

増幅器を通してペン書き検流計で紙に記録する。

電気信号のまま磁気テープなどにアナログデータ又はデジタルデータとして記録する。

直接コンピュータ処理して、結果をプリンター、ディスプレイに表示する。

ロシアのガルチン式地震計が最初でベオニオフ式地震計（短周期）プレ・スーイ

ング式地震計（長周期）が有名であるが、近年の地震計は、ほとんどこの方式のもので開発者の名前を付け、式など言われることはない。

電気回路、コンピュータを通してさまざまな目的のデータを得ることが行われている。

4.2. 信号センサーによる分類

地震動信号センサーは各種あるが代表的なものとして下記がある。

(1) 振り子式

錘をばねで支えて、地震動による錘の変位を検出して出力する。地震計はほとんどこの方式である。サイズモ方式ともいう。

変位検出方法は機械式、電気式など各種あるが、圧電式センサーが小型、堅牢、広レンジなどの特性から利用されることが多い。

(2) サーボ式

錘が変位しようとする反対方向に電氣的力（磁場 + コイル電流）を加える。このときの電流によりその変位量を検知する。錘は実際には動かず、すべて電氣的処理であるため、精度・分解能が高い。

(3) 落球式

鋼球がボール受け上であり、一定以上の地震加速度により落下する。それにより電気スイッチが入り警報を出す。感震器として利用される。

(4) 水銀式

くぼみに水銀を置き、一定以上の加速度により水銀が転がり始める。それにより電気スイッチが入り警報を出す。感震器として利用される。

4.3. 出力特性による分類

地震計は振り子の固有振動数 f_n と測定振動数 f との関係で次の 3 種類に分類される

(1) 変位地震計

固有振動数より高い振動数を測定範囲として、振り子の変位が地震動の変位に比例（比例定数を感度係数という。）する。感度特性は図 2 となる。

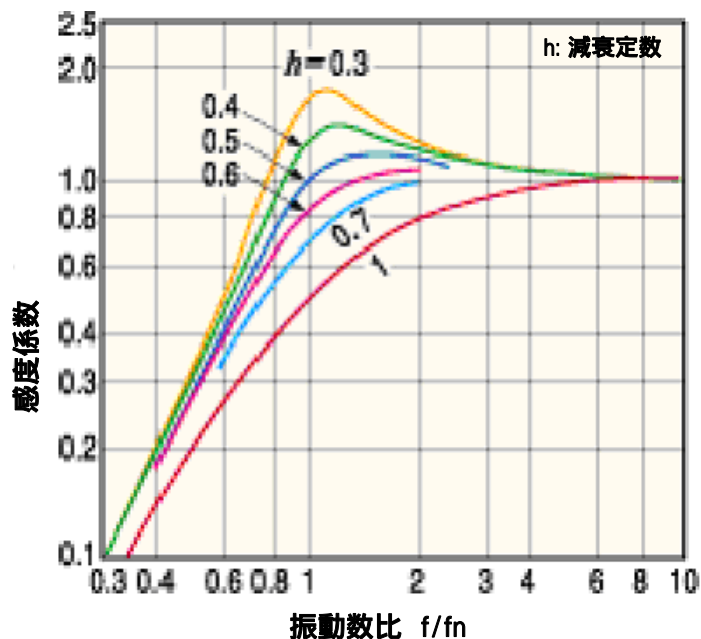


図 2 変位地震計 ($u > 1.0$)

(2) 速度地震計

振り子の減衰を大きく取り固有振動数付近を測定範囲として、振り子の変位が地震動の速度に比例（比例定数を倍率係数という。）する。感度特性は図 3 となる。

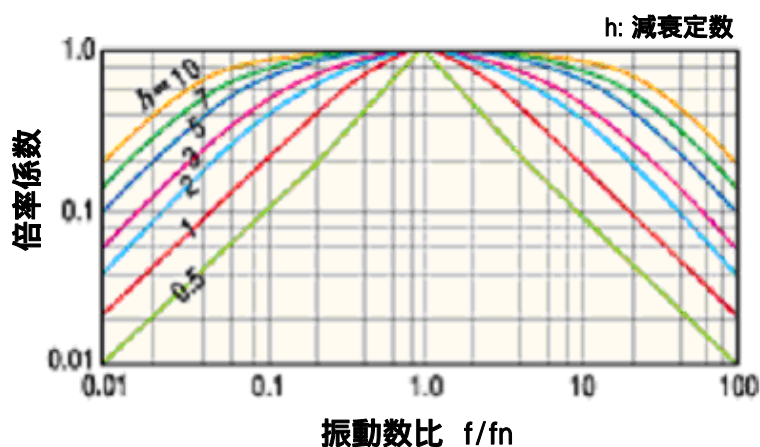


図 3 速度地震計 (測定範囲 $u = 1.0$)

(3) 加速度地震計

固有振動数より低振動数を測定範囲として、振り子の変位が地震動の加速度に比例（比例定数を感度係数という。）する。感度特性は図 4 となる。

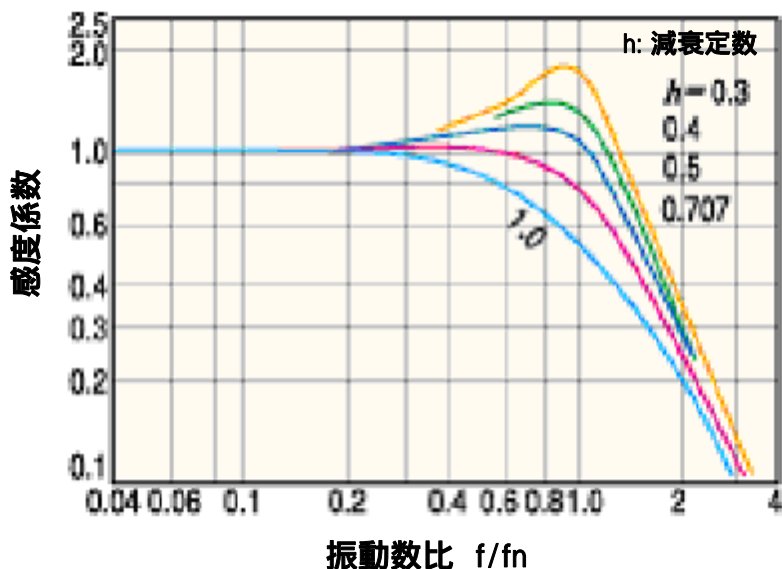


図 4 加速度地震計（測定範囲 $u < 1.0$ ）

5. あとがき

耐震対策や地震防災を行なう上で基本となる地震動に関するデータを計測するために必要な地震計に関して説明した。

耐震設計に関しては、設計地震動の強さは法規で決められているが、平均的に設定されている値であり、事業所近傍の地域特性、地盤特性などは考慮されていない。地震計により自然地震波形を収集して地震動の地域特性、地盤特性を考慮してより信頼度の高い耐震設計を行なうことが好ましい。

また、地震が到来した時に設備を緊急停止するなどの防災処置を的確に行なうためにも地震動の計測し有効に利用することが好ましい。

地震計にはいろいろの種類があり、その目的に応じた適切な特性の地震計を選択することが重要である。今回は、地震計の原理とその種類及びその特徴を説明し、さらに実地震波形データの公的な入手先などを示したので、耐震対策や地震防災に役立てて欲しい。

なお、地震計の設置例や注意事項、今後、地震防災上も重要度が増してくると思われる「リアルタイム地震情報システム」などは、紙面の都合で省略した。