

(27) 新しい制御用地震センサーの開発と試作

東京大学生産技術研究所	○ 佐藤 暢彦
東京大学生産技術研究所	片山 恒雄
東京大学生産技術研究所	大保 直人
東京大学工学部土木工学科	川崎 勝幸

1. まえがき

現在、地震にともなう2次災害を最小限にとどめるために、産業施設など多くの設備に制御用地震センサーが用いられているが、その多くは地震動の加速度レベルを判断して制御するものである。しかし、加速度レベルで判断していると、地震による被害がほとんど皆無にもかかわらず制御してしまう場合も少なくない。もちろん制御からの復帰が容易なシステムにおいては、これで十分目的を達しているわけであるが、復帰が複雑なシステムにおいては、不必要な制御は多大な損失をもたらす。そこで、地震被害の程度に結びつくような制御判断を取り入れた地震センサーの開発が必要である。

1961年にG.W. Housnerは、構造物の終局的破壊に寄与するのは地震時に構造物のもつ振動エネルギーであるとし、地震の強さを表す尺度としてSI値(Spectral Intensity)の概念を発表している¹⁾。一方、岡本はこのSI値が40cm/s以上から震度5以上の被害が生じ、20cm/s前後から震度4の強い方の程度の被害が生じるとしている²⁾。本研究では、SI値の概念を用いた地震センサーの開発を目的とし、過去の地震記録のSI値を収集する一方、SI値を判断基準にした地震センサーの基本回路の試作と試験を行い、実用的なSI地震センサーの構成を提案する。

2. SI値に注目した強震計記録の特性解析

G.W. Housnerの提案したSI値は、減衰定数20%をもつ1自由度振動系の速度応答スペクトルにおいて、周期0.1sから2.5sの範囲におけるスペクトル値の平均として定義されている。すなわち、

$$SI = \frac{1}{2.4} \int_{0.1}^{2.5} Sv(T, h=0.2) dT \quad \dots \dots \dots (1)$$

で表される。ここで、 Sv は速度応答スペクトル、 T は固有周期、 h は減衰定数である。

日米両国の強震計記録の中から、基本的に最大加速度が100cm/s²を超えるものを解析の対象として選び、これらの地震記録について、(1)式によってSI値を求めた。解析の対象とした記録は合計37地震による170成分である。

解析した170成分の地震記録のSI値と最大加速度の関係を図-1に示す。同じ程度の最大加速度に対してSI値の分布は広い幅を持っているが、分布の上限は、およそ、

$$SI = 0.2 \cdot A \quad \dots \dots \dots (2)$$

で押えられる。ここに、 A は最大加速度(cm/s²)である。

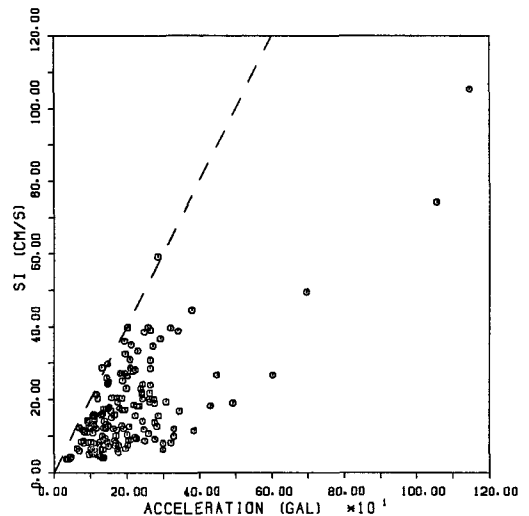


図-1 SI値と最大加速度の関係

1地震による1観測点の記録は通常3成分存在するが、図-1においては、これらを独立に示している。そこで、1観測点の3成分に対する最大加速度とSI値の中から、それぞれ最大値を選びだして示したものが図-2である。さらに、図-2では地震による被害が観測点近くであったと判断されるものを区別して示している。SI値がおよそ25cm/sを超えると被害が生じるということがわかる。つまり、SI値を判断基準にした地震センサーの1つの制御レベルが与えられたことになる。ここで、被害があるかないかの判断は、大変多岐にわたる情報によっており、例えば、1968年十勝沖地震において、青森、八戸、室蘭で被害があり、宮古では被害がないという程度のものである。

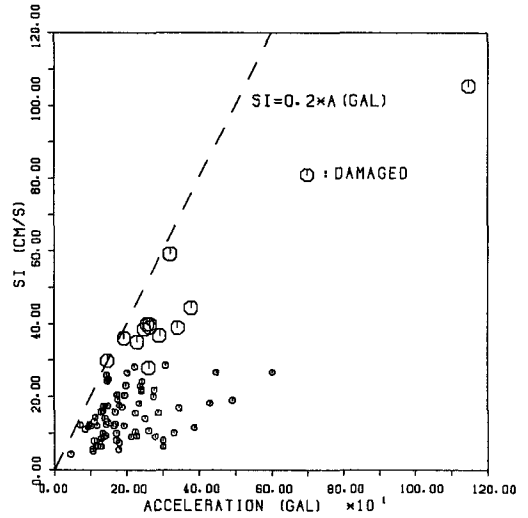


図-2 SI値と被害の関係

3. 簡略的なSI値の求め方

SI値を指標にした地震センサーを製作するためには、リアル・タイム、または、それに近い速さで、0.1sから2.5sまでの範囲の多くの固有周期に対する速度応答を求めなくてはならない。しかし、これを実現するためには、かなり大がかりな装置が必要となり、実用的でない。そこで、2つの固有周期に対する速度応答値からSI値を推定することを試みた。すなわち、スペクトルの形を図-3のように簡略化する。コーナーにおける縦軸の値としては、固有周期1.5sおよび2.5sのスペクトル値の大きい方を採り、SI値の概略値を次式で推定する。

$$SI_E = 0.73 \cdot (T=1.5s \text{ および } 2.5s \text{ の } S_v \text{ の大きい方の値}) \dots \dots \dots (3)$$

図-4は厳密に計算したSI値と(3)式より概算で求めたSI_E値を比較したものである。両者の相関はきわめて高く、実用上、簡略な推定式(3)によってSI値を計算してよいものと判断される。

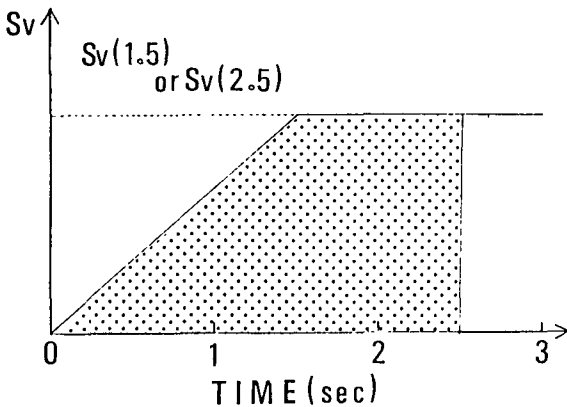


図-3 速度応答スペクトルの簡略化

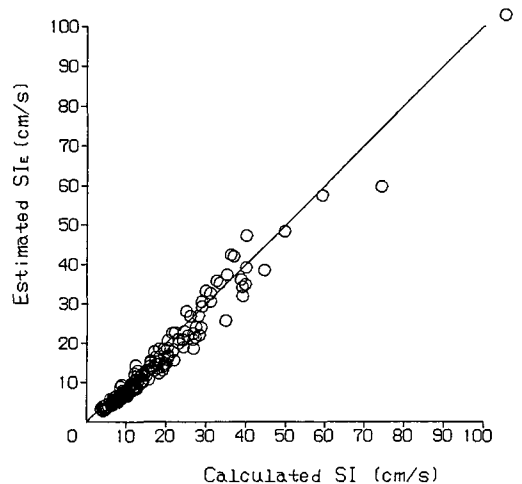


図-4 厳密法と簡略法によるSI値の比較

4. 1自由度系の速度応答を求める回路

SI値の算定に必要な速度応答をリアル・タイムで求める回路は、図-5のように簡単な構成で作ることができる（以下では、速度応答計算回路とよぶ）。図-5中に示す1自由度系の運動方程式は、図の中央の加算回路で満足されている。そして、乗算回路の定数を調節することにより、必要とする固有周期と減衰定数を設定できる。

これに、基づいて速度応答計算回路を試作した。試作したものはダイヤルで固有周期や減衰定数を任意に設定できるようになっている。この回路の入出力特性を正弦波入力と地震波入力によって検定した。その結果の一部をそれぞれ図-6と図-7に示す。設計値（計算値）と測定値はよく一致し、1自由度系としての所要の入出力特性を十分シミュレートしていることが確認され、SI値による地震センサーへの組込みが可能であることがわかった。

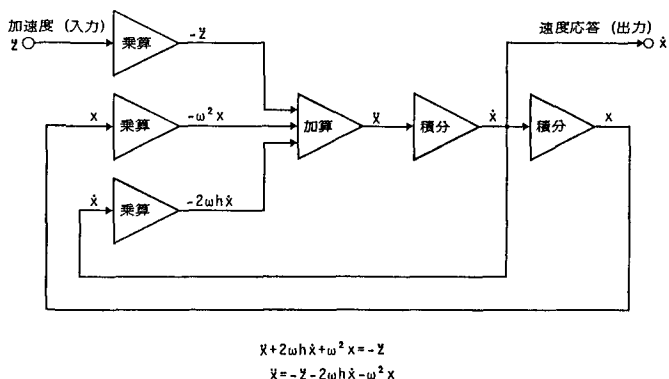


図-5 速度応答計算回路のしくみ

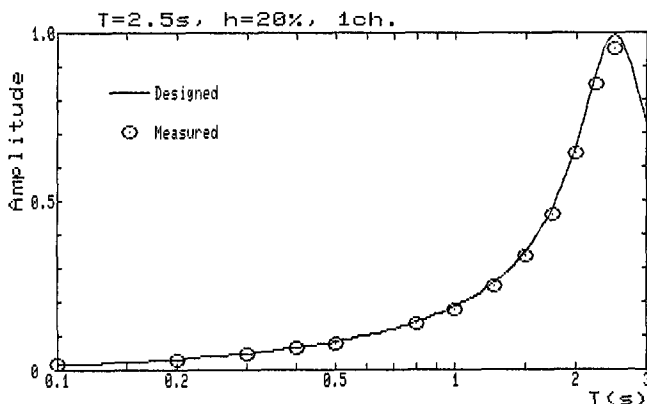


図-6 正弦波入力による速度応答計算回路の検定結果

5. SI値を用いた地震センサー

速度応答スペクトル S_v の大きさは速度応答振幅の最大値であるから、SI値の大きさがある値を超すか超さないかを判断するということは、(3)式からわかるように、固有周期1.5sと2.5sに対する速度応答の時々刻々の振幅の大きさを判断することと同等である。このような考え方に基づいて、図-8に示すように地震センサーを構成できる。

図-8のセンサーの制御領域は、

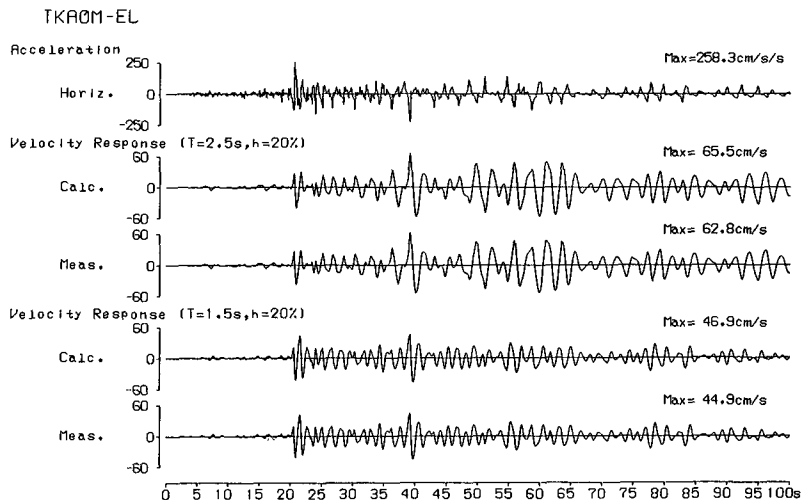


図-7 地震波入力による速度応答計算回路の検定結果

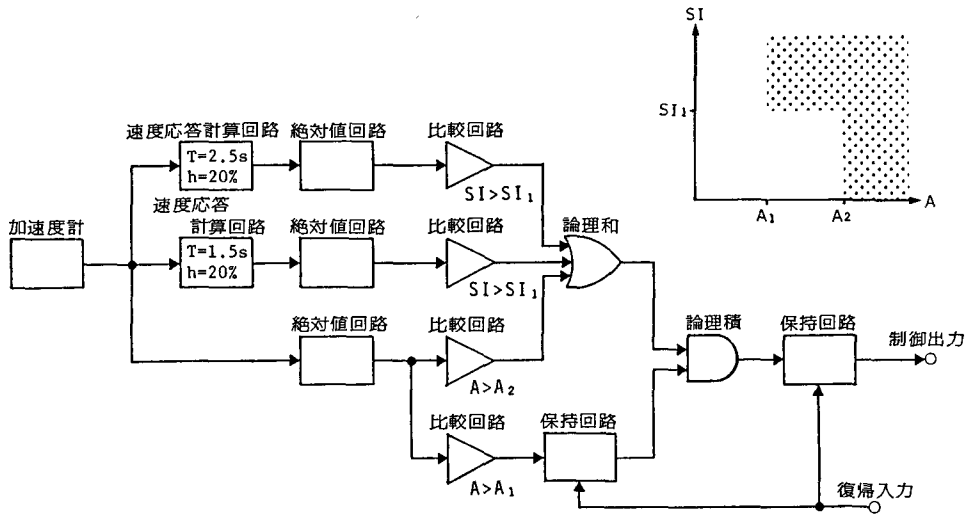


図-8 SI値を指標にした地震センサーの構成

$A > A_2$ なら制御出力

$A_2 \geq A > A_1$ のときは $SI > SI_1$ なら制御出力

とした場合のものである。これらの値については、今後の綿密な研究・調査によって決められるべきであるが、一応の目安として値を提案すれば、2項で述べたように SI_1 を25cm/s、 A_2 は激震に相当する400cm/s²、 A_1 は強震以上に相当する80cm/s²という値が考えられる。

もちろん、制御領域の設定を変えれば、判断回路の設計は異なってくる。最近の電子技術の発展はめざましく、複雑な制御条件に対して、コンパクトでしかも安定性の良い地震センサーを製作することは、比較的容易である。

6. あとがき

新しい制御用地震センサーの開発を目的として調査研究を進めてきた結果、システム制御に用いる地震動レベルの設定には詳細な検討を残すものの、SI値を指標とする地震センサーを提案することができた。センサーの信頼性をさらに向上させるためには、今後、以下の調査研究が必要と思われる。

- (1) 地震被害とSI値との相関関係を明らかにする。
- (2) 地盤環境を考慮に入れた制御条件を適切に設定する。
- (3) 水平動1方向のSI値だけではなく、例えば、水平2方向（さらに上下動）も含めた地震動強度による制御を考える。
- (4) SI値に限らず、地震動の強さをさらによく表現する指標を見出し、その制御用センサーへの応用を工夫する。

7. 参考文献

- 1) G.W.Housner : "Vibration of Structures Induced by Seismic Waves" (Shock and Vibration Handbook by C.M.Harris & C.E.Crede), 1961, pp.50. 10~32
- 2) 岡本舜三著 「耐震工学」(オーム社) pp.22~24