

新しい地震動モニタのための 地震被害指標 DI 値と P 波警報指標 PI 値の提案

中村 豊

¹正会員 工博 株式会社システムアンドデータリサーチ (〒186-0003 東京都国立市富士見台 3-25-3)

地震動の持つ破壊能力を的確に評価できる簡便で的確な指標が見い出せれば、被害が生じるかも知れない地震動を的確に監視できるようになる。これにより、合理的な警報システムが実現できるのみならず、構造物の合理的な設計にも役立つと期待される。ここでは、筆者らが検討を進めている地盤や構造物の「地震による壊れやすさ指標」K 値群が被害とよく対応することにヒントを得た新しいリアルタイム地震動モニタリング指標を提案する。新指標をこれまでの地震動モニタリング指標である最大加速度や計測震度と比較するとともに、実際の地震被害との対比を行って新しい指標の妥当性を検証した。この指標を採用した新しい P 波警報システムについても報告する。

Key Words: *Real-time Earthquake Motion Monitoring, Damage Intensity, P-wave Index, DI-value, PI-value, P-wave Alarm, S-wave Alarm, Early Warning System, Compact UrEDAS*

1. はじめに

地震動を監視するための計測量として、これまで、加速度、速度、SI 値、計測震度などが用いられている。しかし、加速度や速度は被害との関係が明確ではなく、SI 値や計測震度は、被害との関連は強いと推測されるが、リアルタイムに正確な値を知ることが難しい。さらに、計測震度は、体感震度を機械計測できるようにした便宜的なもので、物理的な意味は明確でない。これまでの計測量は、いずれも、被害発生の可能性を的確に把握するための監視量としては的確ではないと考えられる。

地震動の持つ破壊能力を正確に評価できる簡便な指標があれば、地震動の的確な監視と警報に役立つのみならず、構造物を合理的に設計するのにも役立つものと期待される。

筆者らは、これまで、地震動を受ける側である地盤や構造物の地震による壊れやすさを常時微動を利用して評価することができる K 値群を提案してきた。ところで、地盤の壊れやすさをあらわす K_g 値が、木造住宅被害率や列車の脱線転覆などと整合することが見いだされている。この現象を検討した結果、 K_g 値が、応答加速度と応答速度の積、すなわち、単位時間に地震動がする仕事量（仕事率=Power）と密接な関係にあるためと推測された。Power の大小が被害程度と関係することは当然で理解しやすい。

ここでは、地震動の持つこの Power に着目し、新たなリアルタイム地震動モニタリング指標を提案する。提案指標と、最大加速度や計測震度との関係を調査し、新しい指標の妥当性を検証するとともに、これを用いた警報システムについて考察する。

2. 被害評価指標 DI 値と P 波警報指標 PI 値

(1) 地震動の被害評価指標 DI 値と計測震度

地震動のする仕事量が単に大きいだけではそれは被害とは結びつかない。地震被害は単位時間あたりに注入される仕事量、すなわち仕事率の大小と密接な関係があるものと推測される。

地上にある質量 m の物体の応答加速度ベクトルを $\mathbf{a}_r$ 、応答速度ベクトルを $\mathbf{v}_r$ とすれば、地震動がこの物体になす仕事率 p は、次のように両ベクトルの内積としてあらわされる。

$$p = m(\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{v}_r) = m \Sigma (\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{v}_r) \quad (1)$$

ここで、 Σ は 3 方向成分の和をあらわす。

地震学や工学の分野で常用されている単位（加速度は Gal 単位、速度は m/s 単位）を用いて仕事率を算定すれば、大きな数値になることが予想される。そこで、地震被害指標 DI を次のように定義する。

$$DI = \log |\mathbf{a}_r \cdot \mathbf{v}_r| \quad (2)$$

$\mathbf{a}_r$ を、ベクトル合成した地震動の最大加速度と考え、卓越周期を T とすれば、

$$\mathbf{v}_r = \mathbf{a}_r T / (2\pi)$$

とあらわされるから、DI の最大値である DI 値は、

$$DI \text{ 値} = 2 \log a_r + \log T - \log (2\pi) \quad (3)$$

と概略表現される。

具体的な DI の計算は、計測された地震動加速度波形を加工して (2) 式に基づいて行われることになるが、この時に使用するハイパスフィルター (HPF)、ローパスフィルター (LPF) によって、DI の値も変動する。ここでは、標準的な値として、0.2Hz の HPF、5Hz の LPF を用いた。また、時々刻々の波形振幅をそのまま使って定義式 (2) により DI を算定しても、値の変動が激しく実用的ではない。ここでは、指数平滑の手法を用い、DI を半減期 1 秒で平滑化し振幅の包絡線を実用的に算定している。

なお、関田 (1996) によれば、気象庁の計測震度 I_{jma} は次のようにして算定される。

$$I_{jma} = 2 \log a_o + 0.94 \quad (4)$$

ここで、 a_o は $f^{1/2}$ で傾斜させたバンドパスフィル

ター 0.5-10Hz を通過した加速度波形で、0.3 秒の累積時間に対応する加速度値である。これは、定義上リアルタイムには計測できない。

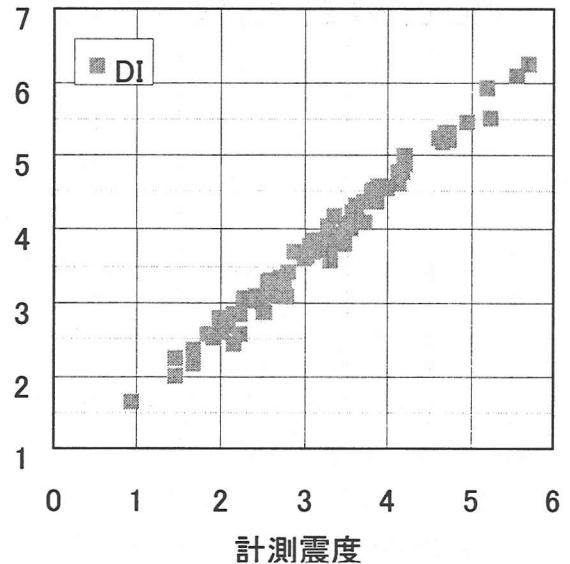


図1 DI 値と計測震度の関係

図1は、1997年3月26日の鹿児島県北西部の地震を多数の地点で観測した K-net データを用いて DI 値を算定し計測震度と比較したものである。この図によれば、DI 値は計測震度と非常によい相関がある。詳しくみると地点毎に両者の差は異なっているがその地点毎の差異は小さく、概ね 0.6 だけ値がずれている。

(2) P 波警報指標 PI 値

DI の P 波到来から t 秒間の P 波部分の最大値を PI 値と定義する (図2参照)。ここでは、 $t = 1$ として PI 値を算定した。図2には、DI 変動、PI 値、DI 値の概念的な関係を加速度波形とともに示した。これによると、DI は地震動 P 波の到来とともに急激に増大し、S 波が到来するとまた一段の増加が認められる。P 波識別機能と併用すると、PI 値を地震動到来とともに確定することができ、的確に P 波警報が出力できるものと期待される。

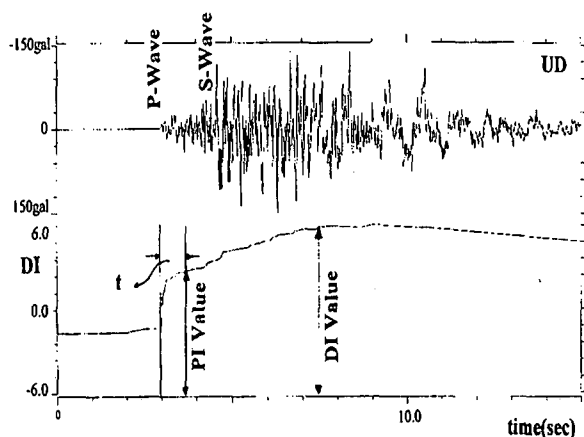


図2 DIの変動とDI値、PI値の関係

なお、 t 秒間の間に S 波が到来すればその直前の値を PI 値として確定する。

図3は上記の K-net 地点での DI 値と PI 値の関係を示したものである。両者の関係はばらつくものの概ね 2 程度の差であることがわかる。これは、地震動の最大振幅は初動振幅の概ね 10 倍であることを示している。

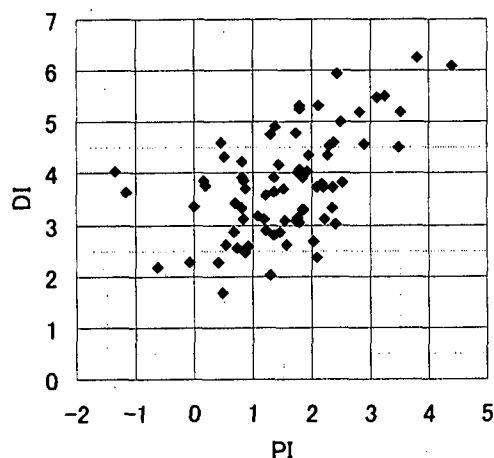


図3 DI 値と PI 値の関係

(3) PI 値警報を有効に利用するための方策

PI 値警報を有効に利用するためには、過敏警報を減らすとともに警報見逃しをできるだけ少なくする工夫が必要となる。できるだけ確な P 波警報が出せるように P 波検知能力を高めるのは当然であるが、さらに見逃した場合でも、振幅が大きくなった時点

で警報が出せるよう S 波警報を併用することを提案する。P 波の識別機能については文献 1) 参照。

P 波警報と S 波警報の組合せによる具体的な警報方法を以下に示す。

- PI 値が PI 警報レベルを超過すれば直ちに P 波警報を発報し、ベクトル合成加速度（従来手法）または DI（より被害と結びついた物理量を用いた新手法）が警報レベルを超えると S 波警報を発報する。
 - DI の変動を常時監視し、PI 警報レベルを超えれば、P 波 S 波の識別を行って P 波であれば P 波警報を発報する。次にベクトル合成加速度または DI が警報レベルを超えると S 波警報を発報する。
- いずれの S 波警報も、現実には S 波であることの判断はしていない。

3. PI 値警報レベルの設定法

これまでの警報との連続性を考慮して、PI 警報レベル値を決定するのが合理的であろう。その考え方は図4に示すとおりである。PI 値とこれまでの警報量との関係の上限を PIU、下限を PIL とする。

従来の警報方式で必要な最小の警報レベル CT' により警報を出す範囲は、 $TA+MA$ 、の部分となる。これに対する PI 値の設定範囲は、図中の $PI1$ から $PI2$ の間となる。平均的な PIT を選択し、P 波警報と S 波警報を併用したとすれば、警報を出す範囲に、新たに、P 波による警報部分 $FA+OA$ が加わることになる。もちろん TA 部分については P 波警報が発報されることになり警報が迅速化される。一方、現実の警報レベルは余裕を見込み CT となっている。この場合の警報範囲は、 $OA+HA+TA+MA$ 、となる。

従来警報レベル CT での警報回数と新しい PI 警報による警報回数は、それぞれ、 $OA+HA+TA+MA$ 、と、 $FA+OA+TA+MA$ 、に比例する。したがって、 FA が HA より小さくなるように設定できれば、警報回数を減らすことができる。これにより、必要な警報が迅速化される。また、万一危険な地震動を見逃したとしても、最大値警報により警報発報は多少遅れ

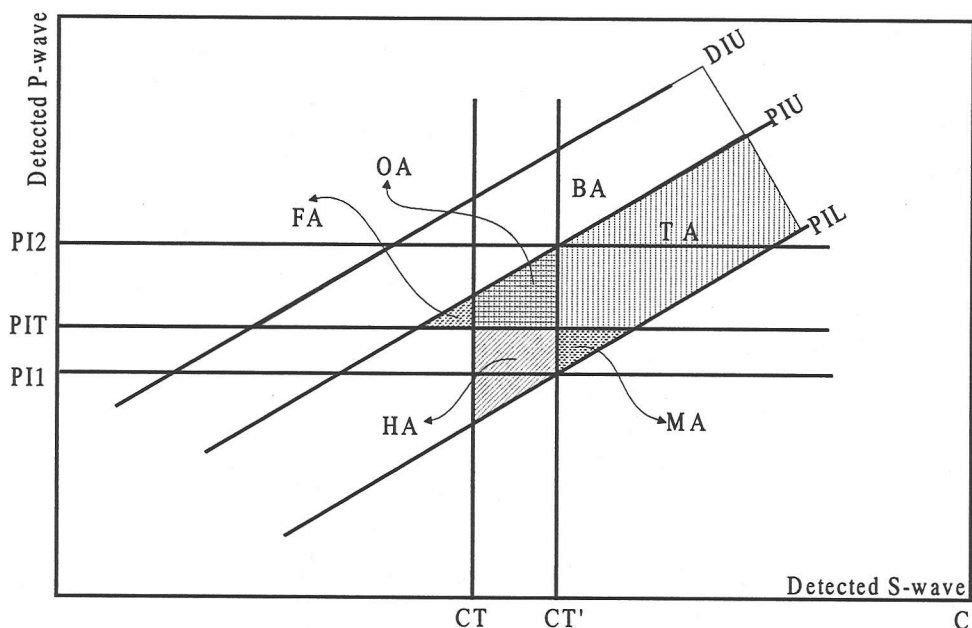


図4 PI 警報レベル設定の考え方

るものの確実に警報が発報されるようになる。

なお、横軸 C は S 波警報のための監視地震動を一般化して示している。つまり、C 軸として、加速度、速度、SI 値、計測震度さらには本論文で提案している DI のいずれでもよい。被害とのより密接な関連が期待される DI がもっとも適当と考えられる。

図 5 は最大加速度と DI 値ならびに PI 値の関係を例示したものである。

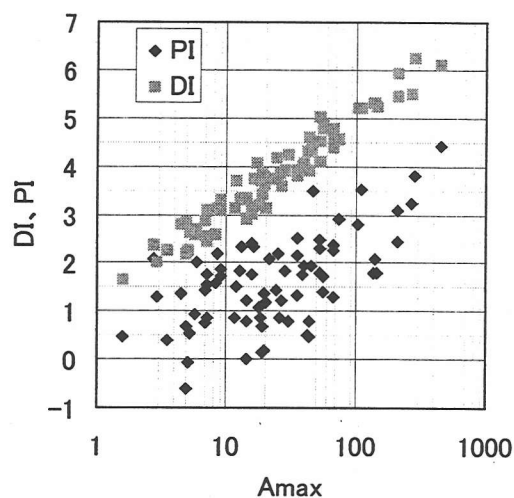


図5 最大加速度と DI 値ならびに PI 値の関係

PI 値を用いた P 波警報システムは、SDR により Compact UrEDAS として実用化されている（特許申請中）。これを用いて、1998 年 11 月から東日本旅客鉄道株式会社の新幹線で P 波警報機能が実際に運用されている。今後、JR をはじめとする数多くの防災分野で PI 警報が採用されるとともに、S 波警報用として DI 値が採用されることを期待したい。

謝辞：資料のとりまとめ、解析などにご協力いただいた（株）SDR の中山沢子女史ならびに齋田 淳氏に感謝します。

参考文献

- 1) 中村：総合地震防災システムの研究、土木学会論文集 I、No531/I-34、1996 年 1 月
- 2) NAKAMURA, Y.: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, Early Warning Conference 98, Potsdam, Germany, September 7-11, 1998
- 3) 関田：新しい気象庁震度階級について、日本地震工学会振興会ニュース No147、1996 年 3 月

4. Compact UrEDAS として PI 警報の実用化