



地震動指標間および被害との関係

中村 豊

正会員 (株)システムアンドデータリサーチ(SDR)代表、東工大大学院・総合理工・人間環境システム専攻・連携教授、工博
e-mail: yutaka@sdr.co.jp

要 約

地震動指標として、最大加速度、最大速度、計測震度、SI値およびリアルタイム震度(RI値)をとりあげ、比較検討した。最大加速度は監視する上限周波数の違いにより大きく異なるので、上限周波数を明確にして議論する必要がある。上限周波数を5Hzに制限した最大加速度5HzPGAは、計測震度との関係でみれば、被害との相関性が高いとされるSI値と大きな違いはない。計測震度やSI値は、地震動のパワーを基に定義されたRI値とほぼ一対一に対応し、被害との相関性の高さを裏付けている。地震後にしか算定できない計測震度や比較的長周期の応答を算定しなければならないSI値は、リアルタイム性に乏しく、警報には不向きである。これに対して、RIは、その最大値(RI値)がほぼ計測震度に一致するのみならず、P波に対して敏感に反応するのでもっとも迅速で的確な警報が実現できる。RIの被害との関連性は物理的に保証されており、今後、各方面で有効に利用されるものと期待される。

キーワード: 最大加速度, PGA, 5HzPGA, PGV, SI値, リアルタイム震度, RI値, 計測震度, 警報

1. 研究の目的と背景

地震防災を考える上で、入力である地震動とそれを受ける施設や構造物の耐震性能、さらにはそれらが持つ機能の耐震性能を知ることは基本的に重要な事柄である。孫子の兵法にいう「彼を知り己を知れば百戦殆(あや)うからず」である。

地震の後、どのような地震動であったのかを知るためには、地震動を適切に観測し記録すればよい。被害を受けた場合には、この記録が特に重要になる。しかし、いつ来るかわからない地震、しかも、前もってわからない被災場所の地震動を確実に観測し記録することはそれほど簡単ではない。これまで、構造物が被災した地点での地震動記録はほとんどないのが現状である。このため、被害状況から地震動を推定し、推定された地震動で被害分析を行うような堂々巡りの議論に陥ることが少なくない。

こうした事態を改善するには、強震観測地点数を飛躍的に増大させることが必要で、誰もが強震観測したいと思わせるような、強震観測の大衆化が不可欠となる。強震観測を大衆化するには、強震観測機器を簡単に取り扱えるようにして低価格にすることも重要だが、それだけでは十分ではない。観測を実施している人にとって明示的に役立つことが必要である。地震計でできる一般大衆にとって役立つこととして、地震発生時の警報や、地震動の大きさをわかりやすく表示することが考えられる。表示される地震動の大きさは被害がある程度推測できるようなものであることが望ましい。被害が出るような地震に対していち早く警報し、地震時の対応をすばやく合理的に行なうことで災害を

減少させ得ることが実証できれば、より多くの場所で強震観測が行われるようになるのではなからうか。

ところで、地震動の指標はあくまでも地震動の大きさを表現するものである。したがって、被害との対応関係が変化したからといって変更すべきものではなく、被害分析の基礎となるべき不変の物理量であるべきである。現在、地震動の強さを表す指標として、最大加速度をはじめ、最大速度、計測震度、SI値などさまざまなものが使われている。

ここでは、警報にも使えることを考慮して、リアルタイムに算定でき、物理的に意味のある地震動指標について検討する。計測震度はこの条件を満たしていないが、現状では日本における地震動指標の標準となっているのでとりあげる。物理的に意味があり、実用的に計測震度に代わり得るリアルタイム震度(RI値)を中心に、実用されている地震動指標相互の関係について検討するとともに、被災地点での記録や当該構造物の客観的な耐震性能評価結果がない状況で地震動指標と被害との対応関係を検討することの危険性を例示する。さらに、強震計の実用価値を高める地震警報機能に絡んで、各指標算定の迅速性などについても言及する。

2. 検討する地震動指標群

実用されている地震動指標として、最大加速度PGA、最大速度PGV、SI値、計測震度(Ijma)およびリアルタイム震度(RI値)を取り上げる。以下、各指標について概説するが、リアルタイム震度については項を改めて解説する。

地震の規模は、地震動の大きさ(最大加速度など)のみならず、地震動の卓越周期と継続時間にも関係する。加速度は力に関係するが、その継続時間も破壊には大きく影響するので、最大加速度だけでは被害との相関性は低いといわざるを得ない。しかし、ある大きさ以上の力がなければ変形しないので、破壊の必要条件ではある。そして、地震毎にみれば、地震動の主要部分の卓越周期や継続時間は多少の変動はあるものの概ね同じと考えてよいので、最大加速度の大小は被害の大小に関係していると考えてよい。すなわち、地震毎にみれば、大きな最大加速度ほど大きな被害に対応していると考えても大過ないと思われる。ただし、異なる地震による各地の最大加速度を単純に比較するのは問題である。最大加速度は計測対象とする上限周波数によって大きく値が変わるので、上限周波数を規定して議論する必要がある。ここでは、特に上限周波数を規定せずに計測されたいわゆるPGAのほか、0.1Hzから5Hzまでを対象にして計測される最大加速度 5HzPGA¹⁾²⁾も合わせて検討する。5HzPGAは1985年以来、旧国鉄、JRを通じて警報用の加速度として使われているもので、東京メトロなどでも使われている。

加速度観測技術の向上とともに測定周波数の上限が次第に高くなっており、それに伴って観測される最大加速度も大きくなっている。このため、最大加速度と被害の相関性がますます低くなっている。そこで、地震動のもつ運動エネルギーに関係する最大速度PGVが被害との関連で注目され、地震動指標として計測されることがある³⁾。

最初にHousner博士により提案されたSI値⁴⁾は、その後、さまざまな強震記録に対して研究され、広範な構造物の被害との相関性が高い指標として、地震終了後の被害推定のために計測されることが多い。しかし、対象とする周波数帯域(0.1~2.5秒)や応答算定時の減衰定数(20%)については概ね定まっているものの、実際の地震動に対して、具体的な算定周期や応答計算方法、平均化の有無など、定まっていないものも多く、算定機関や機器により異なる値となっている可能性がある。ここではSIセンサーとして実績のある東京ガスの定義(8方向に再構成された地震波形に対して計算された応答速度の最大をとるもの)⁵⁾による値を採用した。これは、水平2方向の応答速度値をベクトル合成したものの最大値をとる合理的なSI値に比べると、常にわずかに小さな値となる。

気象庁は、それまでの体感震度に代わって震度を器械計測するため、当初、長周期が強調された地震動加速度の最大値をもとに震度6までの計測震度を定義した。さらに、阪神大震災を機会に継続時間を明示的に考慮して震度7まで適用可能なものに修正した(平成8年気象庁告示第4号)。これは、地震動が継続している時間の地震動波形を使って算出される。実際には、気象庁によりさらに細かく算定方法(気象庁の方法)が規定されている。本論文では、計測震度の数値として、さまざまな機関が気象庁の方法で算定して公表したもの⁶⁾を使っている。

なお、本論文の検討では、K-NET、KiK-netの強震記録を中心に、中越地震では気象庁や各自治体の計測震度計の記録も用い、また中越地震や宮城県沖の地震ではJRの警報地震計の記録も適宜用いた。集集地震については台湾中央気象局の強震記録を使った。使用したデータは、地震規模についてはM3.8~M8.0、震央距離については1km~586km、地震動の大きさについては計測震度で0.6~6.7、にそれぞれ分布している。用いたデータのM-図上の分布を図1に示す。

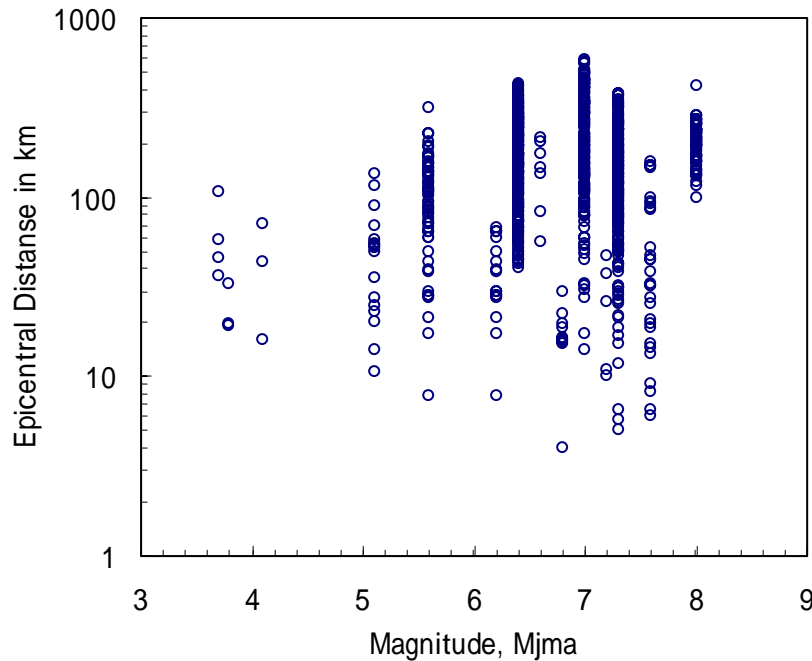


図1 本論文で使った強震波形データのM- 分布

主な地震は以下のとおりである。括弧内にマグニチュードM、算定した地点数とその震度範囲などを示す。すなわち、1995年兵庫県南部地震(M7.2、11km～47km、5地点、計測震度5.3～6.5)、2000年鳥取地震(M7.3、5km～380km、202地点、計測震度1.1～6.6)、2001芸予地震(M6.4、40km～434km、337地点、計測震度0.6～5.7)、2003宮城県沖の地震(M7.0、14km～586km、168地点、計測震度1.0～6.2)、2003年宮城県北部の地震群(M5.6、M6.2、M5.1、延べ90地点、計測震度2～5.2)、2003年十勝沖地震(M8.0、98km～422km、56地点、計測震度4.0～6.4)、2004年新潟県中越地震(M6.8、1km～30km、15地点、計測震度4.9～6.7)および1999年台湾集集地震(M7.6、6km～156km、30地点、計測震度4.5～6.5)である。これに中小地震群(M3.7～6.6、延べ24地点、首都圏・東北・九州、計測震度0.6～5.2)を加えた合計延べ927地点のデータを用いている。なお、すべての地点で検討対象の地震動指標が算定されている訳ではないので、比較ペア毎に検討に用いた延べ地点数は異なる(表1参照)。

3. リアルタイム震度

被害との関連性を考慮して、地震動のパワー(地震力×応答速度)を基に次のように、発災強度(DI: Destructive Intensity)を定義した^{7),8)}。

$$DI = \log_{10}(|\mathbf{a} \cdot \mathbf{v}|) \quad (1)$$

ここに、 \mathbf{a} と \mathbf{v} はそれぞれ、加速度応答ベクトルおよび速度応答ベクトルであり、 \cdot はベクトルの内積を意味する。

つまり、DIは、地震動が作用する物体に対して為し得る単位質量あたり単位時間あたりの仕事の大きさ、すなわち地震動の破壊エネルギー注入能力、の時間変動をあらわしており、被害と密接に結びついた指標であるといえる。

DIの最大値(DI値)と計測震度を比較した結果、一定の値だけシフトするものの、ほとんど同じ特性を示すことがわかった。そこで、シフト分を取り除き、計測震度に対応する値となるリアルタイム震度RIを、次のように定義した。

$$RI = DI - 0.6 \quad (2)$$

この時DIは、0.1Hz～5Hzの振動数域の地震動を対象に、加速度および速度の単位を、それぞれ、Gal(cm/s²)お

よび $m\text{kin}(cm/s/1000)$ として算定されている。このように、RIは物理的にも明確な背景をもち、リアルタイムに算定可能であるため、一定以上の震度の地震動到来をいち早く警報することができるとともに、地震終了後、ただちにその値を関係箇所に通報して、的確な被害状況の把握に役立てることができる。

なお、本論文では、リアルタイム算定とは波形のサンプリング毎に所定の計算を逐次処理していくことをいい、一定時間蓄積した波形データを間欠的に処理する計算方法はリアルタイム算定とはいわない。

4. 地震動指標相互の比較

(1) 計測震度とSI値ならびに5HzPGAの関係

ここでは実用されている三種の代表的な地震動指標である計測震度(気象庁)、SI値(東京ガス、JR)および5HzPGA(JR、東京メトロほか)を、計測震度を中心に相互比較する。これは計測震度が、被害との関連性を意識して構築された地震動指標である気象庁震度階との連続性を考慮してつくられていること、および広く一般に使われて

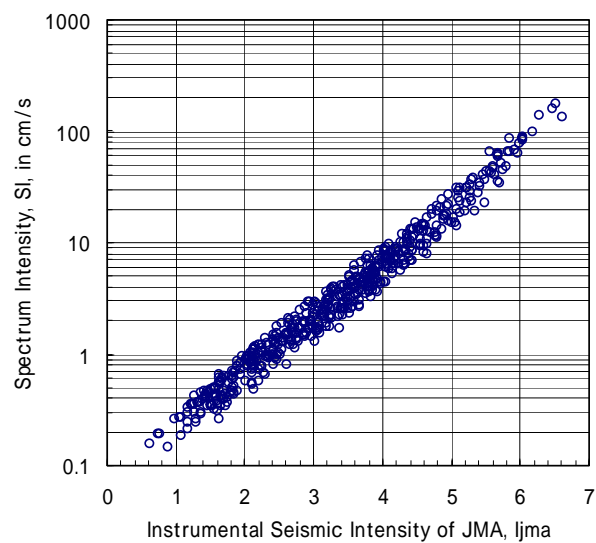


図2 SI値(東京ガス方式)と計測震度の関係

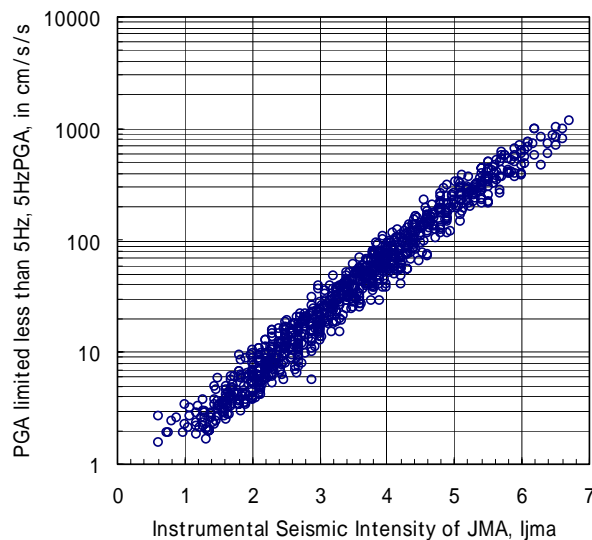


図3 5HzPGAと計測震度の関係

いる尺度であること、に鑑みたものである。

図2および図3は、計測震度とSI値および5HzPGAの関係を、それぞれ示したものである。これらの図におけるばらつきを定量的に表すために回帰分析を行い、その相関係数と計測震度推定の標準誤差を算定した。これらを表1に示す。これらの図表によると、SI値や5HzPGAに対応する計測震度のばらつきの程度は、SI値の方が5HzPGAよりやや小さいものの、大きな相違はない。なお、計測震度とPGAの関係は図4に示すように大きくばらついており、被害とPGAの対応が良くないことを間接的に示唆している。最大加速度と被害の対応は通常良くないとされるが、計測震度との対応で見ると、高い振動数成分を除いた5HzPGAと、被害との対応がいいとされているSI値が同程度に対応しており、注目に値する。

なお、国鉄は1985年に警報用加速度を5HzPGAに変更しているが、合理的な措置であったと評価できる。

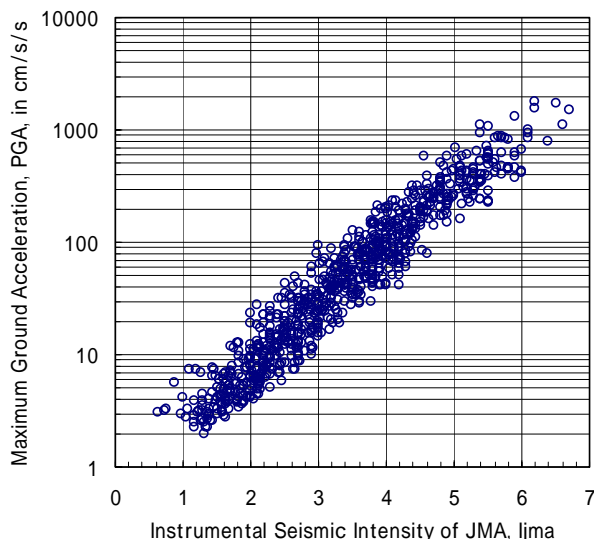


図4 PGAと計測震度の関係

表1 地震動指標間の相関性

Y	X	number of sites	correlation coefficient r	standard error
Ijma	RI	925	0.9948	0.1324
Ijma	SI	545	0.9867	0.2032
Ijma	5HzPGA	925	0.9843	0.2295
Ijma	PGA	862	0.9611	0.3382
RI	SI	545	0.9947	0.1291
RI	5HzPGA	927	0.9687	0.3256
RI	PGV	524	0.9544	0.3463
RI	PGA	862	0.9375	0.4256

cf. Difference between Ijma and RI

	number of sites	average	standard deviation
Ijma-RI	925	0.048	0.1339

(2) 計測震度とRI値の関係

図5にRIの最大値(RI値)と計測震度の関係を示す。使用したデータの地震規模はM3.8～M8.0、地震動の大きさは計測震度で0.6～6.7となっている。全体のデータ個数は延べ925地点、計測震度とRI値の差の平均値は0.048、標

準偏差は0.134であった(表1参考)。これから両者は実用上同じものと見なせる。

RI値と計測震度の差を、マグニチュード別に詳しく見たものが図6である。M<6.5ではRI値は計測震度よりやや小さく、M>6.5では逆にやや大きくなる傾向が伺える。Mの小さな地震で大きめに算定される計測震度の傾向が、RI値では多少是正されているのかも知れないが、これは両指標のフィルター特性が微妙に異なること(RIは0.1Hz~5Hz、計測震度は0.1Hz~10Hz)が主な要因であろう。Mが大きいほど卓越振動数は低くなるので、低い振動数が卓越するほどRI値は計測震度より大きくなりやすいと推察される。いずれにせよ、地震動のもつパワーと関係するRI値は地震動の大きさをあらわす指標としての合理性を有しており、地震力をあらわすPGAや地震動エネルギーを表すPGVなどと併せて利用すれば、被害の有無や被害程度をよりの確に推定できるものと期待される。次節以降ではこれらの関係について検討する。

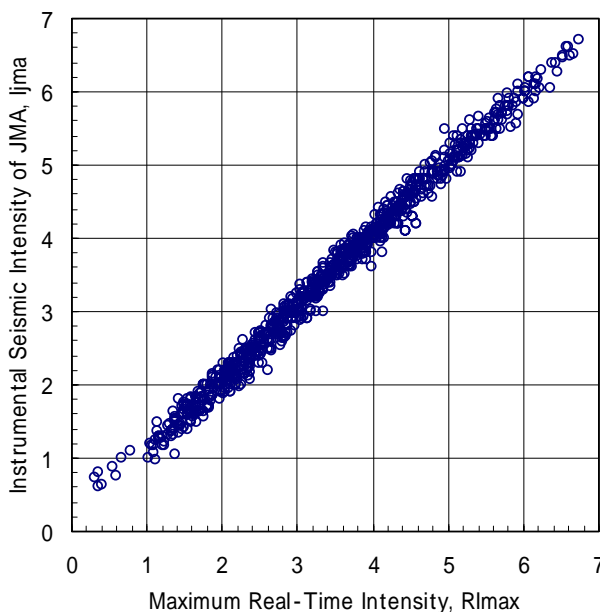


図5 RI 値と計測震度の関係

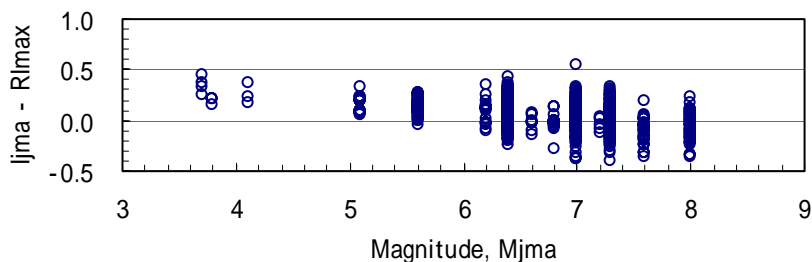


図6 計測震度とRI 値の差と気象庁マグニチュードの関係

(3) RI 値と最大加速度、最大速度、SI 値の関係

RI 値は地震動のなし得るパワー(仕事率)に関係するので、被害との関連があるのは当然である。しかし、実際の被害は、対象とする建造物の振動特性を含む耐震性能にも密接に関係しており、注意を払う必要がある。ここでは、RI 値と比較する震度指標として、最大加速度(PGA、5HzPGA)、最大速度(PGV)、SI 値をとりあげる。

図7(a)~図7(d)はPGA、5HzPGA、PGV および SI 値と RI 値を比較したものである。図7のばらつきを定量的に比較しやすくするために、回帰分析を行って、相関係数とRI 値の推定標準誤差を算定した。結果を表1に示す。これらを見ると、RI 値に対して、PGA は大きくばらつき、5HzPGA、PGV、SI 値の順で RI 値に対するばらつきは急激に小さくなるのがわかる。RI 値を SI 値で回帰すると次式が得られる。

$$RI = 2.02 \log(SI) + 2.31 \quad (3)$$

相関係数は 0.9947、標準誤差は 0.1291 であり、被害との関連では、RI 値と SI 値はほとんど等価とみなせる。したがって、これらを同時に使うのは意味がない。RI 値と組み合わせて使うとすれば、5HzPGA が PGV ということになる。

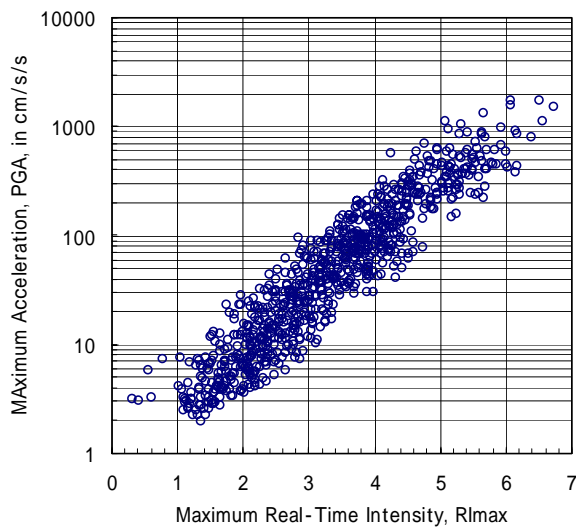


図7(a) PGA と RI 値の関係

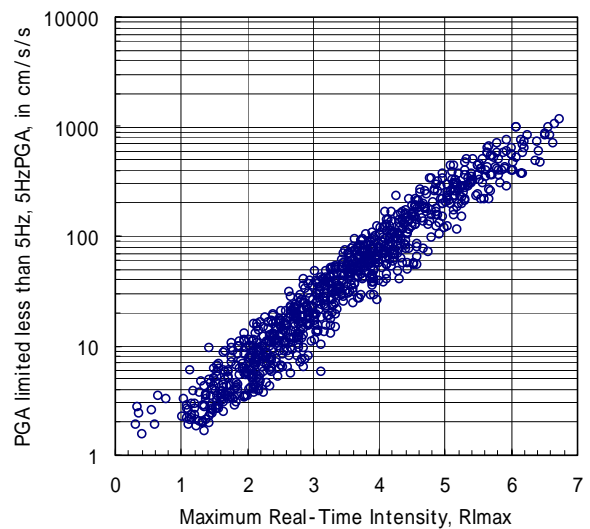


図7(b) 5HzPGA と RI 値の関係

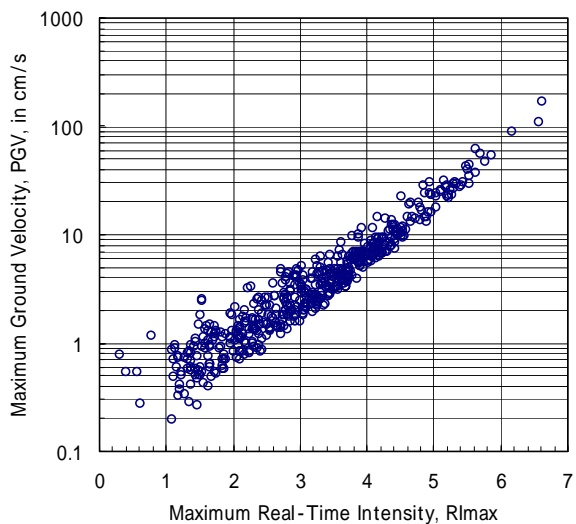


図7(c) PGV と RI 値の関係

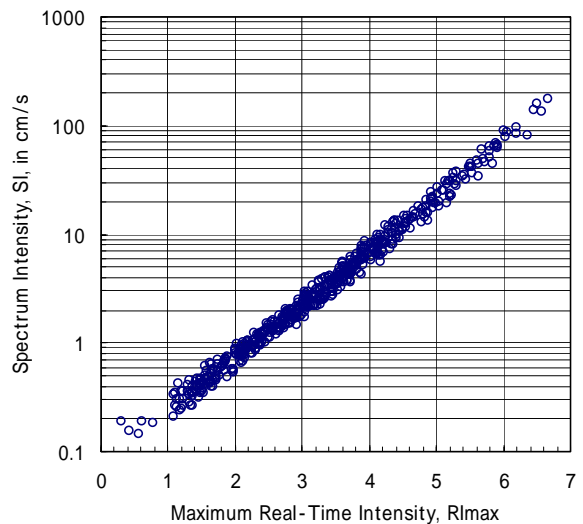


図7(d) SI 値(東京ガス方式)と RI 値の関係

5. 地震動指標と被害との関連

ここでは、地震動指標値と被害を単純に比較した事例のひとつを例示する。これにより、地震動指標値と被害の関係を検討するにあたっては、地震動のみならず、地震動を受けた側の耐震性能を客観的に評価した資料が併せて必要である、という当たり前の事実を改めて指摘したい。

島村ら⁹⁾は、2003年5月26日の宮城県沖地震(三陸南地震)による新幹線高架橋の被害と沿線地震計の SI 値や 5HzPGA の分布を比較している(図9、水沢江刺と一ノ関が入れ違っているが、原図をそのまま引用した)。これによると、SI 値の分布のピークと被害発生箇所が見事に一致しており、SI 値と被害の関連性を示すものとして注目された。この地震による新幹線沿線などの地震動加速度波形(線路にほぼ直交する EW 成分)を図8に例示する。なお、この図には高架橋柱の被災状況も例示した。

20030526_EW: Perpendicular to Railroad

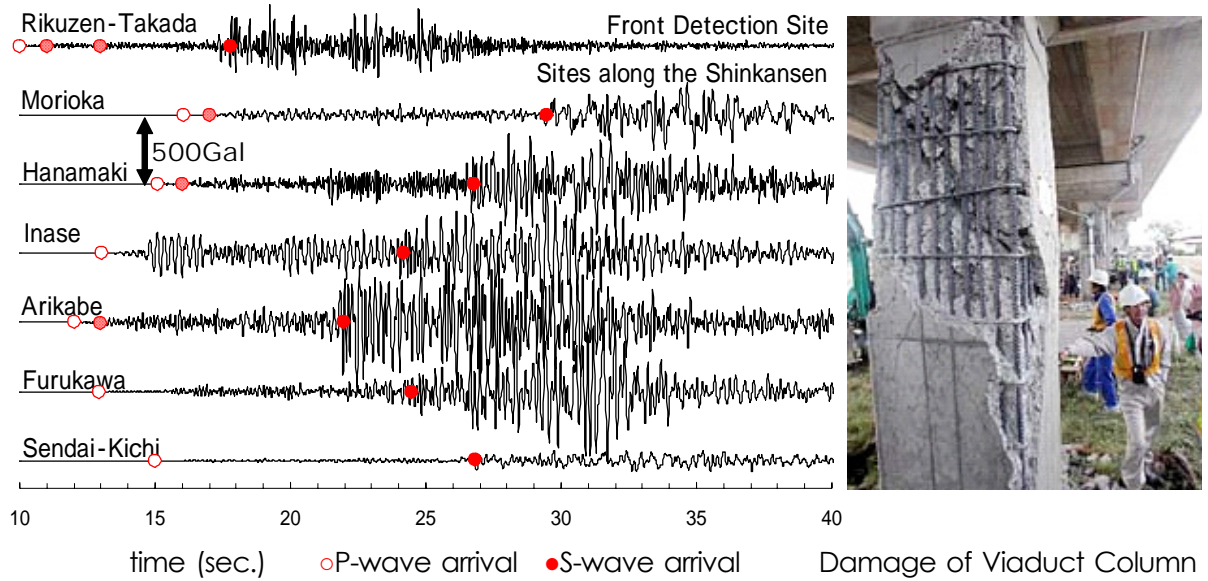
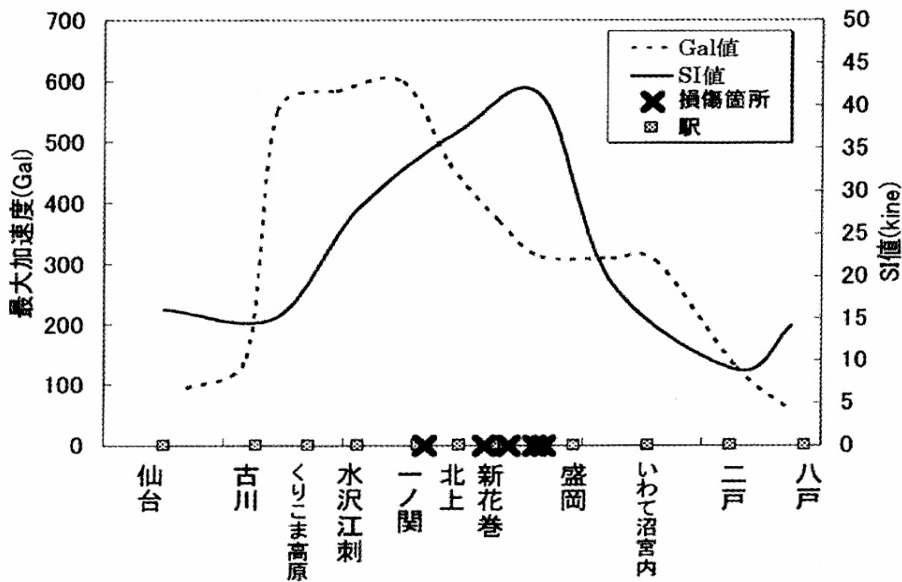


図8 2003年5月26日の三陸南地震による新幹線沿線の加速度波形ほか



東北新幹線沿線地震動と高架橋被害箇所との関係

図9 地震動と被害の関係¹⁰⁾

ここに示された最大加速度とSI値の関係を詳しくみるために、図10に示す5HzPGAとSI値の関係図に、島村らの結果を図から読み取ってプロットしてみたものが、図中の印である。プロット群のいくつかはこれまでの傾向とは明らかに異なっている。特に500Gal前後の地点のSI値が極端に小さい。

確認のため、この図の元になった仙台-盛岡間の新幹線沿線の加速度波形データや周辺のK-NETやKiK-netの加速度波形データを入手してSI値と5HzPGAを独自に計算してみた。再計算された応答スペクトルを図11に例示する。SI値の算定は、東京ガスSI値を算定する際の周期セット(図11中に縦線で示した)を含む周期セットを用い、水平2方向の応答をベクトル合成した後、最大応答を求めた。これによると、仙台および盛岡付近では比較的低い周

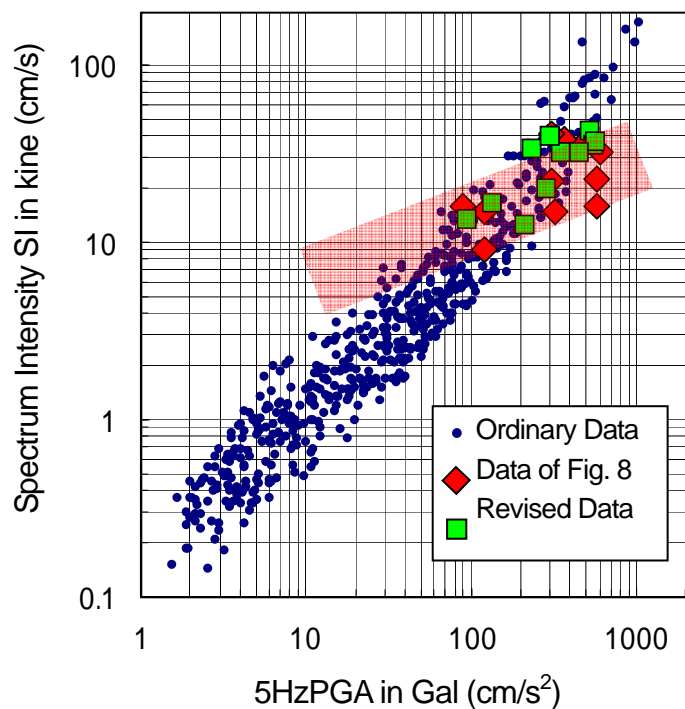


図10 5HzPGA と SI の関係

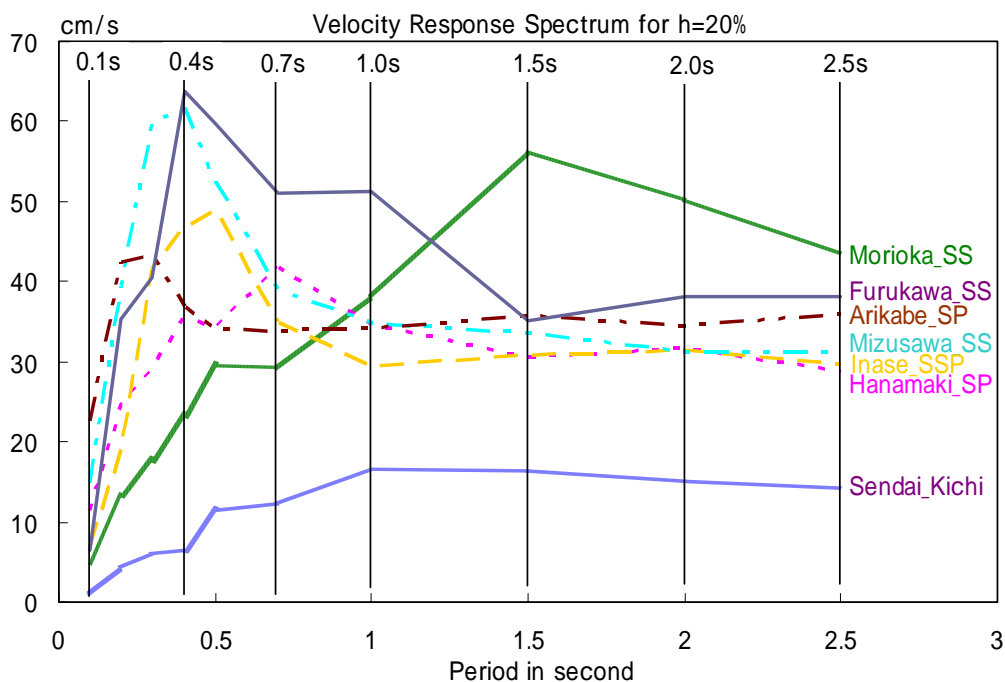


図11 新幹線地点の速度応答スペクトル例

波数帯域が卓越し応答値が小さいのに対して、これらの中間地域では高架橋の固有振動数に対応する周波数帯域が大きく卓越している。中間地域の地震動には表層地盤の地震動特性が大きく影響しているものと推測される。

再計算の結果による図8相当図を図12に示す。これによれば、5HzPGAについては変わらないものの、SI値は大きく変化した。再計算された5HzPGAとSI値の関係(図10 印)は、これまでの傾向から逸脱しない。図9のSI値分布は被害地周辺(480km)のみにピークが認められるが、新しい計算結果(図12)では、370km(古川)付近と

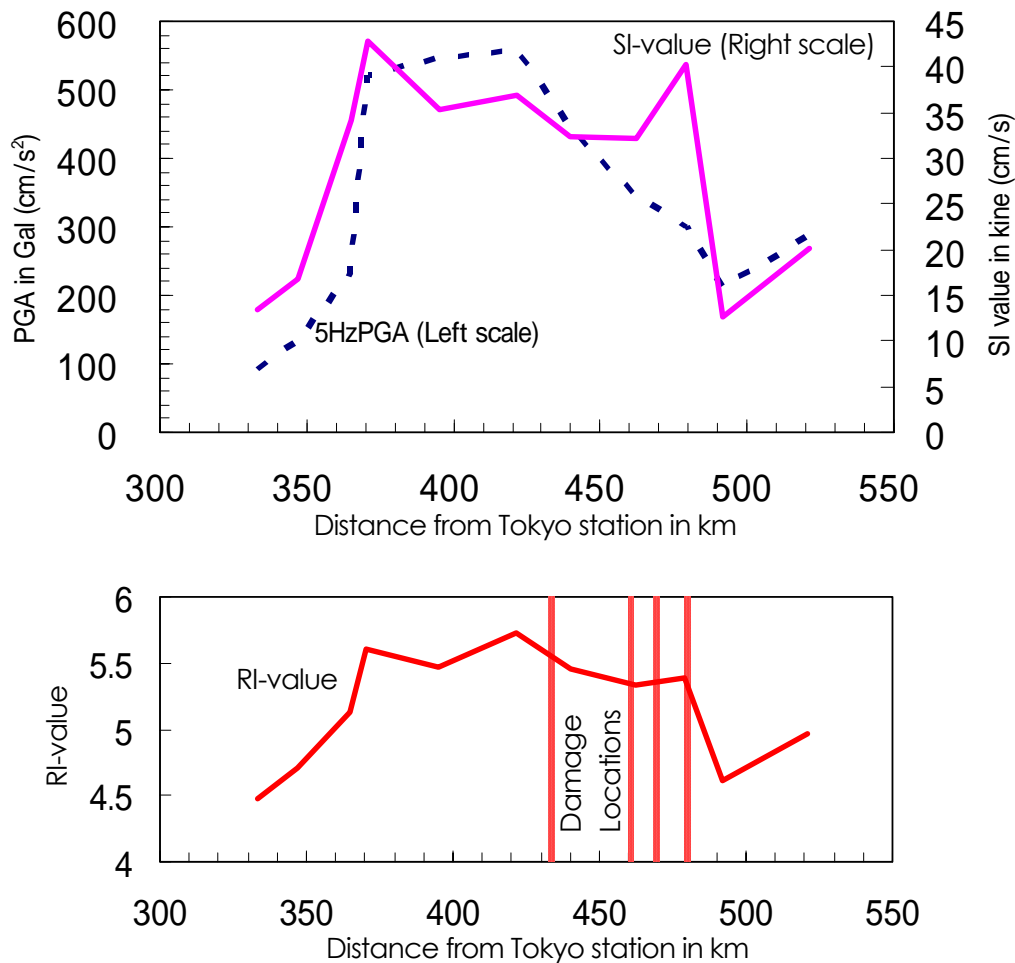


図12 再計算された5HzPGAとSI値の分布ならびにRI値の分布

480km(盛岡)付近の二箇所では40kineを越すピークが現れ、その間(370km～480km)は35kine程度のSI値が続くなど、SI値と被害の関係は明瞭ではなくなっている。RI値の変化をみると、盛岡側にいくほど小さくなる傾向が認められるが、370km～480kmの区間でRI値(計測震度に相当)は概ね5.5となっている。高架橋が被災した430km～480km(水沢江刺～盛岡)の区間よりも370km～420km(古川～水沢江刺)の区間の方が5HzPGAと同様にSI値もRI値も大きい。被災した区間ではRI値による震度は5.4を下回っている。大きな揺れではあるものの、きちんと耐震設計された構造物が被災するような大きさではない。この地震動を被害地点での揺れと見なせるのであれば、耐震補強されていなかった事実と考えあわせ、被害高架橋は耐震性に問題があって被災したと考えるのが妥当であろう。本事例は、単純なSI値の計算ミスと思われるが、構造物の特性を考慮せず地震動だけに頼って被害を議論する時の陥穽を示すものでもある。

被害発生は地震動を受ける構造物側の問題でもあり、地震動と構造物双方の情報を揃えてから検討を行うべきである。2005年の宮城県沖地震(M7.2)では遠く離れた埼玉県で住家が全壊した。これなども地震動の問題というよりは家屋の耐震性の問題である。被害地点での地震動記録が無いことも被害分析をあいまいにしている。被害と対比すべき地震動指標は、被害との関連性が物理的に保証されたものが望ましいことはいうまでもない。地震被害分析を的確なものにして防災に活かしていくためには、既存構造物の的確な耐震性評価とともに稠密な地震観測が望まれるのである。

6. 応答性について

次に、強震計に実用性を付加する地震警報機能の観点から地震動指標の地震動に対する応答性を検討する。なお、リアルタイム性がなく、警報には利用できない計測震度はここでは取上げない。なお、警報のために監視する地震動指標が決まっても、実際に警報を発するには危険性の判定方法⁷⁾などが必要となることはいうまでもない。これについてはここでは言及しないが、興味があれば参考文献などを参照されたい。

図13にRIおよびSIの時刻暦変動を波形とともに例示する。これは2003年三陸南地震を東北新幹線盛岡変電所で観測したもので、地震動の生長状況がよく見てとれる。このような応答性状は、いずれの地震波形でも概ね同様の傾向を示す。

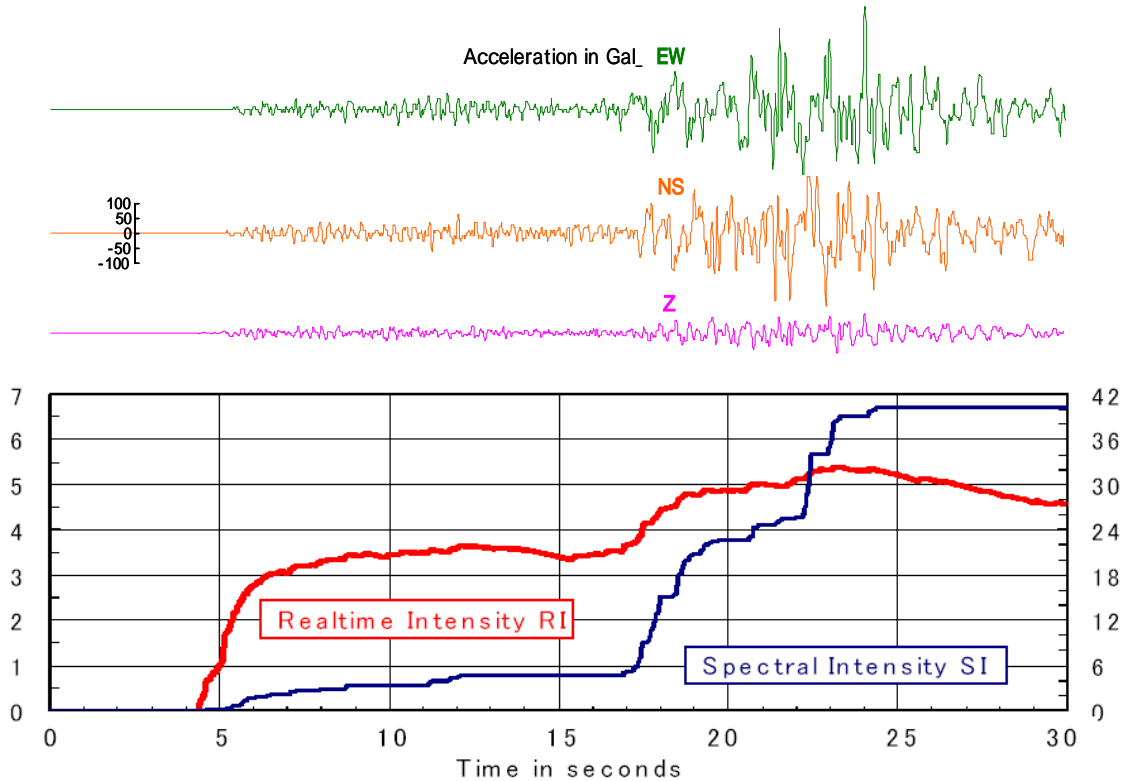


図13 地震動の消長とRIおよびSIの変動例(2003年三陸南地震・新幹線盛岡変電所での観測)

いくつかの地震、地点に対して同様な時間変動をRI、5HzPGAおよびSIについて算定してP波後の規準値超過時間などを表2にまとめた。比較に用いた規準値は実際に使用されている値である。すなわち、RI値2.0はコンパクトユレダスで用いられている標準的な値(PI値)のRI換算値であり、5HzPGAの10Galはコンパクトユレダスの新幹線用起動レベルで地震起動時刻設定用の値である。また、5HzPGAの40galは新幹線などで使われている地震警報レベル(JR警報基準)であり、SI値6kineはJR東日本における一般区間の速度規制値(ちなみに東京ガスでは警報レベルを30kineとしている⁵⁾)である。図12や表2により、応答性の早い順番に並べると、概ね、RI値2.0、5HzPGA_10Gal、5HzPGA_40Gal、SI値6kineとなる。概ね震度5を超えるところでは、P波後1秒程度以内にRI値2.0を超えている。5HzPGA_10Galはそれよりやや遅れる程度で実質P波警報となる。ただし、小地震の主要動でも10Gal以上となることがあるので、多少の過剰警報(これまでの経験に基づけば年に数回程度)が容認される場所ではよいが、警報の信頼性を上げるためにはP波の識別が欠かせないので注意が必要である。5HzPGA_40GalはS波直前が多い。SI値6kineはS波後の警報となることが多く、少なくとも今のままの基準値では、地震後の対応選定に使えても、リアルタイム警報に使うことは難しい。

なお、SI値は周期応答を算定する関係上、算定周期の1/4程度の応答遅れが発生する。最長2.5秒周期の応答が算定されるため、長周期が卓越するMの大きい地震では地震動の消長より明らかに遅れた時系列変動を示す。鈴木ら¹⁰⁾は「SIの計算周期は、 $\dots 1/100$ 秒間隔で計算されている。よって、 \dots 極めて短い時間で警報を出力することが可能である。」と述べている。しかし計算時間間隔を短くしても応答性は迅速化できない。

表2 P波到達後の規準値超過時間など一覧

2003.5.26, 18:24 M7.0 71km						P波到着後の経過時間(秒)					
地点	震央距離	RI	5HzPGA	PGV	SI	RI2.0	10Gal	40Gal	6kine	S波時	最大時
大船渡	30	5.1	320	21.7	30.3	1.1	1.1	7.7	8.1	8.0	13.9
盛岡	109	4.6	210	7.9	12.7	1.9	1.8	13.9	15.2	13.8	16.9
石鳥谷	88	5.1	211	16.9	26.6	1.5	1.8	8.2	11.5	12.4	17.4
北上	74	5.3	393	26.3	34.3	1.4	1.7	2.9	7.7	11.4	13.4
水沢	59	5.3	284	23.5	37.8	1.3	2.3	7.9	8.2	11.9	16.4
一関	51	4.6	181	10.3	13.9	1.4	2.5	7.5	10.4	9.8	16.0
古川	67	5.1	231	20.2	34.1	0.9	4.0	11.6	12.1	11.3	19.3
塩竈	78	4.7	135	10.2	16.8	2.1	3.2	11.4	11.9	11.3	18.3
2004.10.23, 17:56 M6.8 13km						P波到着後の経過時間(秒)					
地点	震央距離	RI	5HzPGA	PGV	SI	RI2.0	10Gal	40Gal	6kine	S波時	最大時
六日町	22	5.0	256	12.8	20.8	1.9	2.1	4.8	5.9	5.7	8.1
川口	4	6.6	818	98.6	168.9	0.2	0.5	1.3	1.7	3.0	5.2
長岡	14	5.7	417	37.0	57.9	0.6	1.2	2.4	2.9	3.2	6.0
押切	25	5.3	194	24.6	34.9	1.1	1.6	3.0	4.0	2.3	6.5
2005.8.16, 11:46 M7.2 42km						P波到着後の経過時間(秒)					
地点	震央距離	RI	5HzPGA	PGV	SI	RI2.0	10Gal	40Gal	6kine	S波時	最大時
牡鹿	81	4.9	247	13.6	20.3	1.9	2.5	8.4	8.6	7.9	10.2
石巻	104	5.0	268	16.6	25.9	0.9	1.2	4.0	10.1	11.3	13.9
仙台	130	5.0	220	12.7	20.4	2.6	4.0	12.6	13.7	13.5	18.0
岩沼	134	5.0	200	14.7	22.1	2.7	3.2	7.1	14.1	14.0	17.4
古川	136	4.8	126	12.6	18.0	2.0	3.5	10.6	13.4	13.9	18.9

7. まとめと今後の課題

発災強度に関連するリアルタイム震度を紹介するとともに、これを中心に、いくつかの地震動指標をとりあげて、相互の関係を調査した。また、被害との関連性や応答の迅速性についても具体的な事例に基づいて検討した。その結果、以下の事柄が明らかとなった。

- 1) 計測震度や最大リアルタイム震度 RI 値との対応をみると、帯域を制限しない最大加速度 PGA は大きくばらつき、被害との対応性がよくないことを示唆しているが、0.1Hz～0.5Hz の帯域に制限した最大加速度 5HzPGA では、被害との対応が良いとされる SI 値や最大速度 PGV と同程度にまで改善される。
- 2) 地震動のパワーを元に定義されたリアルタイム震度 RI はP波の到来とともに急激に大きくなり、地震動パワーの消長を的確に反映する。その最大値(RI 値)は計測震度とほぼ同じ値となる。
- 3) SI 値は RI 値とほとんど等価である。したがって、被害判定のために使うのであれば、両者を同時に用いても意味はない。
- 4) 最大加速度は比較的小さいにもかかわらず SI 値が大きくなっているところを中心に高架橋被害が発生したとされる現象について検討した結果、SI 値の算定ミスによって生じた見掛けの現象であることが明らかとなった。被害分析には、地震動のみならず建造物の耐震性資料も併せて検討する必要があることが改めて確認された。
- 5) 地震警報に関して、実用されている震度指標のトリガー振幅超過時刻を比較した結果、RI 値 2.0、5HzPGA_10Gal、5HzPGA_40Gal、SI 値 6kine の順に遅くなるのがわかった。RI 値 2.0 と 5HzPGA_10Gal は P 波到着直後から数秒の間に超過し、5HzPGA_40Gal は概ね S 波到達直前、SI 値 6kine は S 波到達後となることが多い。

国鉄は 1985 年からそれまでの PGA に代えて 5HzPGA に基づいた地震警報に移行し、JR に受け継がれている。また、東京メトロは 5HzPGA に基づいて警報発令や地震後の運転再開手順を定めている。本研究により、5HzPGA の妥当性が改めて確認された。

地震被害は地震動の振幅、周期および継続時間に関係する。ふたつの地震動指標を用いることにより、振幅と周期について考慮することが可能となるので、振幅だけを考慮するよりも的確な被害判定が可能になると期待される。複数の地震動指標を用いて被害発生を判断しようとする場合、RI 値と SI 値を同時に使うのは意味がなく、RI 値と組み合わせるとすれば、5HzPGA と PGV のいずれかまたは双方ということになる。

被害との関連を検討するには、地震動強度のみでなく地震動を受ける構造物や施設の耐震性能をも把握しておく必要があることはいうまでもない。地震動指標はあくまでも地震動の指標であり、被害程度との対応関係が明確なものを確立する必要はあるものの、被害との対応関係の変化に伴って変更するようなものではない。地震動の大きさだけで被害を説明しようとすると、思わぬ錯誤に陥るおそれがあるので注意が必要である。被害分析には地震動を受ける側の耐震性能を評価した資料が別途必要となるのである。今後、RI 値を中心に被害との関連について実データに基づいた検討を進めていきたい。

SI 値の算定ミスに関していえば、図 9 に示したような SI 値の算定ミスが実際の機器に反映されている場合、大きな混乱を惹き起こす可能性がある。図中の網掛で示した部分のような傾向を持つ算定ミスの場合、数 10Gal 程度の地震動で 12kine を超える SI 値が計測されることになる。この SI 値は、JR では徒歩巡検すべき地震動に対応している。このため、構造物はもちろん機能上も問題が無いような地震動に対して、過剰な対応をして無用の混乱を惹き起こしかねない。2005 年 7 月 23 日や 2006 年 2 月 1 日に首都圏の交通機関のうち特に JR が長時間混乱した。これらの地震の後、混乱対策として JR 東日本では地震計の増設計画を公表したが、この原因が SI 値の算定ミスにあるとすれば、既設のものと同機種を増設では却って混乱を増大させてしまう可能性すらある。まず、SI 値が正しく算定されていることを確認する必要があるものと思われる。

こうした錯誤をなくし、より簡便な地震計の普及を図るためにも、正確な三次元震動台を用いて、さまざまな警報地震計の動作を相互に比較検証する必要があるのではないかと考えている。不規則な強震動に対して、最大加速度や SI 値、計測震度を計測するさまざまな地震計がどのような挙動を示すかが確認できるほか、実際の動作をみることによって実践的な活用方法もイメージしやすくなるという副産物も期待できる。気象庁検定済の震度計ばかりではなく、使いやすい様々な震度計の存在を知らしめることで、自治体職員はじめ広く一般の方々が積極的に地震観測に関与する機運が生まれるのに期待したい。SI 値を計測するさまざまな地震計についても相互に同じ値を計測できるかどうか確認でき、万一異なるようなことがあれば、正しいものに是正できるので、無用の混乱を防止できるようになるものと期待される。

最後に、リアルタイム震度は、物理的な背景が明確、迅速な警報が可能、計測震度にほぼ一致、等の特徴があり、違和感なく受け入れられるものと期待している。

謝 辞

本研究では、独立行政法人防災科学技術研究所、台湾中央気象局および東日本旅客鉄道株式会社の強震記録を利用させていただきました。関係者の皆様の日頃のご努力に敬意を表するとともに深甚の謝意を表します。また、匿名査読者(複数)のご意見は論文の質を向上させるのに非常に有益でした、記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 中村 豊・富田健司:最大地震動加速度の推定式、第 39 回土木学会年次学術講演会講演概要集 I-393、1984.10.
- 2) 中村 豊:国鉄における地震警報システム、鉄道技術 Vol.42、N0.10、pp.371-376、1985.10
- 3) 童華南・山崎文雄・佐々木裕明・松本省吾:被害事例に基づく地震動強さと家屋被害の関係、第 9 回地震工学シンポジウム、pp.2299-2304、1994.12.
- 4) Housner, G.W.: Spectrum Intensity of Strong Motion Earthquakes, Proceedings of 1952 Symposium on Earthquake and Blast Effects on Structures, Earthquake Engineering Research Institute, 1952, pp.72-88.
- 5) 清水善久:都市ガス供給網のリアルタイム地震防災システムの開発に関する研究(第 4 章)、東京大学博士論文、2001.5
- 6) 例えば以下の URL: <http://www.sdr.co.jp>
- 7) NAKAMURA, Yutaka: A New Concept for the Earthquake Vulnerability Estimation and its Application to the Early Warning System, Early Warning Conference 98 in Potsdam, Germany, 1998.9.
- 8) 中村 豊: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、第 25 回地震工学研究発表会、1999.7
- 9) 島村 誠・石黒 進:SI 値による新しい地震時運転規制基準とその導入効果、JREA、Vol.7、No.6、2004.6.
- 10) 鈴木博人・島村 誠:地震時運転規制方法の研究、JR EAST Technical Review-No.3、Spring 2003、pp.53-60.
- 11) 中村 豊:合理的な地震動強度指標値の検討、第 27 回地震工学研究発表会、2003.12.9.

(原稿受理日:2006 年 3 月 28 日)

(登載決定日:2007 年 2 月 13 日)

Comparison of Various Earthquake Motion Indices

NAKAMURA Yutaka

Member, President, System and Data Research, Visiting Prof. of Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

ABSTRACT

Various earthquake motion indices, maximum acceleration PGA, maximum velocity PGV, instrumental seismic intensity Ijma, SI value and RI value (maximum of real-time intensity RI), are compared each other. The PGA limited less than 5Hz (5HzPGA) is not differ from SI value that seems to be related to actual earthquake damage, from the relationship to the Ijma. Both Ijma and SI value are almost equivalent to the RI value that defined based on the power of the earthquake motion. It suggests that these indices mutually related to the actual damage. Because Ijma defined by JMA can calculate only after the earthquake and SI value must be calculated from responses for various periods, it is difficult to calculate without delay so both indices are unsuitable for the earthquake alarm. Because not only RI fits to the Ijma at the peak value, but also RI responds to the P wave arrival sensitively, RI can realize the quick and exact alarm. It is expected to be utilized at the various field because RI is assured to related physically to actual damage.

Key Words: PGA, 5HzPGA, PGV, SI, Realtime Intensity RI, Instrumental Seismic Intensity, Earthquake Early Warning