

強震記録から見た地震動強さの指標間の関係

RELATIONSHIP AMONG THE VARIOUS INTENSITY INDEXES OF THE STRONG MOTION

大井昌弘¹，野畑有秀²，水谷守³，藤原広行⁴¹独立行政法人 防災科学技術研究所，研究員

Masahiro Ooi, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, ooi@bosai.go.jp

²(株)大林組技術研究所，主任研究員 博士(工学)

Arihide Nobata, Technical Research Institute, Obayashi Corporation, nobata@tri.obayashi.co.jp

³独立行政法人 防災科学技術研究所，客員研究員

Mamoru Mizutani, Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, mmiz@pop21.odn.ne.jp

⁴独立行政法人 防災科学技術研究所，主任研究員 理博

Hiroyuki Fujiwara, National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention, fujiwara@bosai.go.jp

SUMMARY

To estimate structural damage during the earthquake, it is important to consider an appropriate index of input ground motion. But, in the most of disaster area, not so many information of characteristics of strong ground motion are evaluate, only one index of the ground motion intensity is often evaluative. To estimate the other index from the given one index of intensity, based on the observed strong ground motion records, it examined about the relation among the various index of strong ground motion intensity.

キーワード: 強震記録，最大加速度，最大速度，計測震度，応答スペクトル

Key words: Strong Ground Motion Records, Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, Instrumental Intensity, Response spectrum

1 はじめに

構造物の被害を評価する地震動強さの指標は，対象とする構造物により適切に設定することが必要である。自治体での被害想定において構造物の被害を評価する地震動指標は，墓石転倒震度，実効加速度，最大加速度，最大速度，気象庁震度（旧），計測震度，応答スペクトル，設計震度というように様々な指標が用いられている¹⁾。

近年では，兵庫県南部地震の被害データから，高層建物のみならず，木造低層建物においても，破壊に結びつく指標としては最大速度が適切であるという報告もあり，兵庫県南部地震以降の被害を基にした建物の被害関数構築においては，最大速度の指標を用いて検討される例が多い。一方，兵庫県南部地震以外の地震を検討した例や，構造物の種類によっては最大速度が必ずしも被害の説明変数として最良の指標とならないこと²⁾や，被害のレベルによっては，他の指標との相関が良いことも考えられ，単純に一

つの地震動指標で被害を表現することは難しいものと考えられる。これらのことを鑑みて，防災科学技術研究所では，特定プロジェクト「地震動予測地図作成手法の研究」において「震災被害予測手法に関する研究」を行っており，構造物に対する地震損傷度評価手法の検討を行っている。しかしながら，実際の被災地域の地震動強さの推定においては，地震動特性全ての情報が得られることは稀であり，公表される地震動強さも一指標しかない場合も多い。

このような背景のもと，本報告では，限られた地震動強さの指標の情報から，地震動強さの他の情報を得ることを目的として，近年の強震記録を含めた高振幅レベルの強震記録のデータベースを基に，地震動強さの指標間の平均的な関係について検討した結果について述べたものである。

2 計測震度と最大値指標の関係

Table 1 Analysis Strong Ground Motion Records

Earthquake	Mw	Num.	Earthquake	Mw	Num.	Earthquake	Mw	Num.
1940Imperial Valley	6.9	1	1985Michoacan	8.0	11	1994Northridge	6.7	15
1966Parkfield	6.2	1	1986NorthPalmSpring	6.0	6	1994北海道東方沖	8.3	2
1971San Fernando	6.6	1	1987Superstition Hills	6.6	2	1994三陸はるか沖	7.7	3
1976Gazli	6.7	1	1989Loma Prieta	7.0	8	1995兵庫県南部	6.9	6
1978Tabas	7.4	1	1990Manjir	7.3	1	1997鹿児島県	6.1	20
1979Imperial Valley	6.5	11	1992Erzincan	6.6	1	1997鹿児島県	6.0	19
1980Mammoth Lakes	6.2	1	1992JoshuaTree	6.2	1	1999Kocaeli	7.4	3
1980Campania-Lucania	6.7	1	1992Petrolia	7.0	2	1999ChiChi	7.6	19
1980Mexicali Valley	6.4	2	1992Landers	7.3	2	1999Duzce	7.1	2
1983Coalinga	6.3	1	1992BigBear	6.5	1	2000鳥取県西部	6.6	33
1984Morgan Hill	6.2	4	1993釧路沖	7.6	3	2001芸予	6.8	18
1985Nahanni	6.7	1	1993北海道南西沖	7.7	1	Total EQ Number 35 Total 205		

2.1 用いた強震記録

用いたデータセットは、Table-1 に示すように内陸地震の震源近傍のデータセット³⁾に加えてそれ以降の地震や海溝型地震を加えた 35 地震 205 組の強震記録である。また、用いた記録は地表面の記録であり、様々な地盤条件のもとで観測されている。Fig.-1 に計測震度の頻度分布を示す。同図に見られるように、既往の検討例に比べて、高震度に焦点をあてたデータベースとなっている。なお、平均計測震度は 5.2 である。

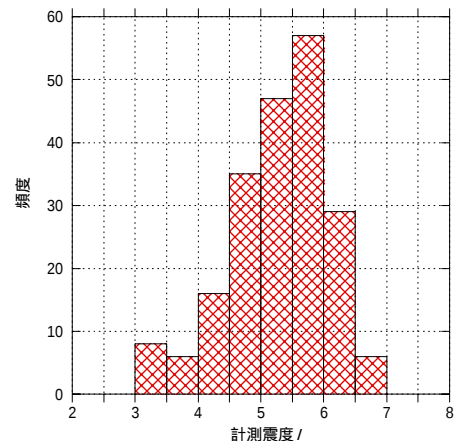
2.2 計測震度と最大加速度，最大速度

計測深度と最大加速度，最大速度の関係については多くの検討例⁴⁾⁻¹²⁾がある。その検討の中で、強震動のレベルにより多少傾向の異なることも指摘されている。本論では、被害に直結するような高震度レベルに着目したデータに基づいて、再度、既往の検討と同様に説明変数と目的変数を基に回帰した結果と、相互変換が可能である主成分分析による評価を行う。一般に説明変数と目的変数間を逆とした場合、その関係式は、逆が成立しない。そこで、主成分分析（共分散 Matrix の主軸解析）を行うことで、相互変換が可能な関係式を示す。この操作は評価式からデータまでの垂線における長さの 2 乗を最小とする直線をもとめることを意味している。

また、ここで用いる最大加速度 PGA ，最大速度 PGV は、水平 2 成分の時刻歴上でのベクトル最大値である。

最大加速度 PGA と計測震度 I の関係を示したものが Fig.-2(a) である。回帰曲線としてもとめた結果が(1)(2)式であり、主成分分析によりもとめた結果が(3)式である。(3)式においては逆の関係も成立するので、以降、主成分分析の結果は一方向のみを記載する。

$$I = 1.82 * \log_{10}(PGA) + 0.66 \quad \pm \sigma = 0.37 \quad (1)$$



Average Intensity: 5.2

Fig.-1 Distribution of Instrumental Intensity of used data

$$\log_{10}(PGA) = 0.43 * I + 0.27 \quad \pm \sigma = 0.18 \quad (2)$$

$$I = 2.23 * \log_{10}(PGA) - 0.38 \quad \pm \sigma = 0.40 \quad (3)$$

I と PGA の関係における標準誤差は 0.4 程度とかなり大きい。本結果は、童・他⁴⁾、翠川・他⁵⁾とほぼ等しい結果となり、用いるデータセットを変えても概ね整合している。

最大速度 PGV と計測震度 I の関係を示したものが Fig.-2(b) である。回帰曲線としてもとめた結果が(4)(5)式であり、主成分分析によりもとめた結果が(6)式である。

$$I = 1.57 * \log_{10}(PGV) + 2.88 \quad \pm \sigma = 0.29 \quad (4)$$

$$\log_{10}(PGV) = 0.55 * I - 1.36 \quad \pm \sigma = 0.17 \quad (5)$$

$$I = 1.76 * \log_{10}(PGV) + 2.59 \quad \pm \sigma = 0.31 \quad (6)$$

用いたデータセットには、1999 年集集地震のように周期 10 秒程度が卓越する地震のように震度が対応する周期帯とは違う周期で最大速度を決めている地震もあり、ばらつきは、既往の検討結果より大きくなるものと考えられるが、最大加速度よりは標準誤差が小さくなっていることが

わかる。

計測震度 I と最大加速度 PGA および最大速度 PGV の両者を用いた関係を検討する際、最大加速度と最大速度の間に後述するように弱いながらも相関を有しているため、両者を個別の説明変数で評価するためには2段階回帰等の方法等を用いる必要がある。従って、本検討では、翠川・他⁵⁾に倣い、両者の積との関係についての評価を行った。Fig.-2(c)に I と $PGA*PGV$ の関係を示す。回帰曲線としてまとめた結果が(7)(8)式であり、主成分分析によりまとめた結果が(9)式である。

$$I = 0.97 * \log_{10}(PGV * PGA) + 1.34 \quad \pm \sigma = 0.18 \quad (7)$$

$$\log_{10}(PGV * PGA) = 0.97 * I - 1.08 \quad \pm \sigma = 0.18 \quad (8)$$

$$I = 1.00 * \log_{10}(PGA * PGV) + 1.21 \quad \pm \sigma = 0.18 \quad (9)$$

この結果は、翠川・他⁵⁾と概ね対応している。標準誤差も0.18と低く、童・他⁴⁾、翠川・他⁵⁾との指摘と同様に計測震度を説明する実用的な指標である。

主成分分析の結果(3)(6)(9)式は、最大加速度、最大速度に関しての標準誤差は、各々を説明変数として回帰した場合に比べて若干精度が落ちている。Fig.-2には、同式による評価結果も併せて示しているが、比較的、説明変数を I

とした場合の回帰式と適合した結果となっている。

また、主成分分析の結果は、評価式への最短距離の2乗誤差を最小にしたのみであり、その誤差分布が、実際に説明変数を用いた目的変数軸上(即ち標準誤差)で最適に評価されているかの保証はされていない。そこで、評価された標準誤差から期待される正規分布の誤差の度数分布と観測値の誤差の度数分布を比較したのがFig.-3である。最大速度との関係では誤差分布に若干の偏りが見られるものの概ね両者は対応している。即ち、主成分分析で評価された関係式からの誤差分布も正規分布で評価できること示している。

以上の結果より、主成分分析の結果(3)(6)(9)式での推定は、概ね観測値を評価できるものと考えられ、両方向からの推定が可能である。ただし、一方向のみの推定を行う場合は、各々説明変数とした回帰式を用いた方が、標準誤差も小さく比較的精度の良い推定ができるものと考えられる。

2.3 特定の地震における関係

このような指標間の関係は、地震の特徴によっても異

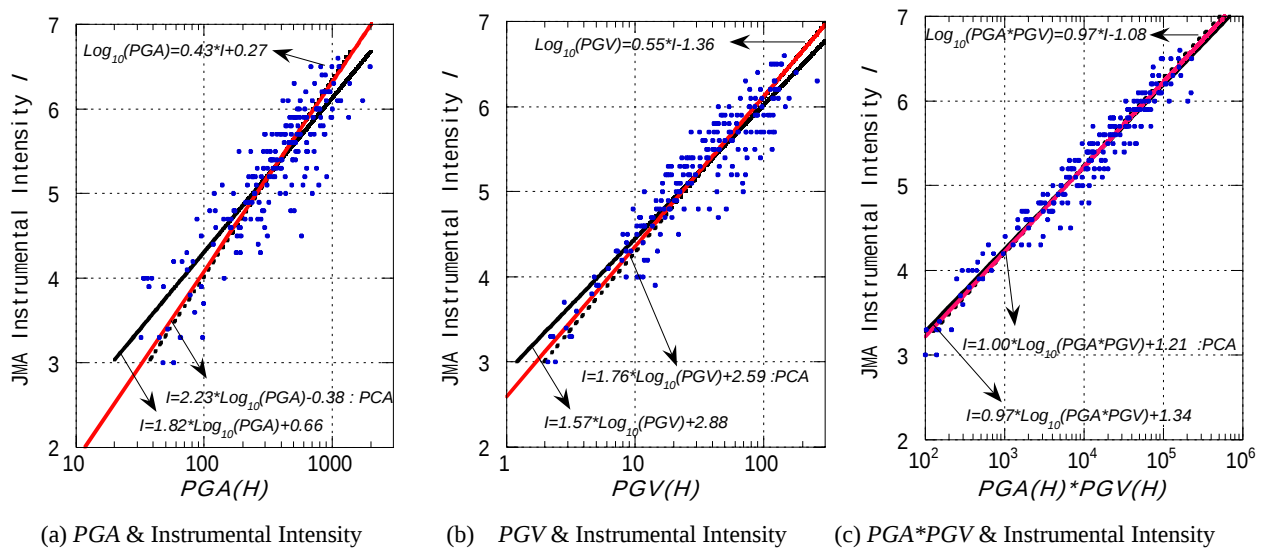


Fig.-2 Relation of the Instrumental Intensity and the Intensity index of strong motion

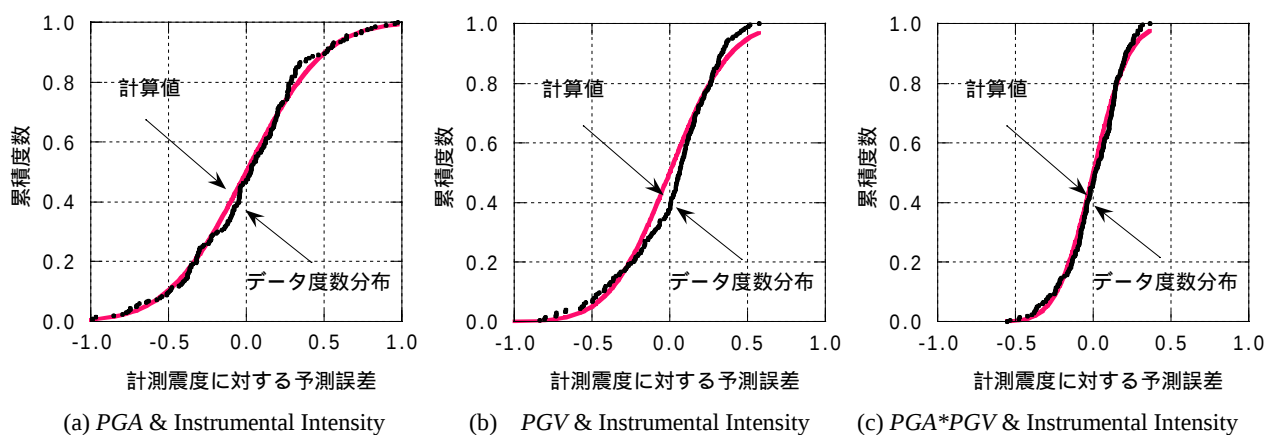


Fig.-3 Error Distribution of Objective Index obtained from PCA

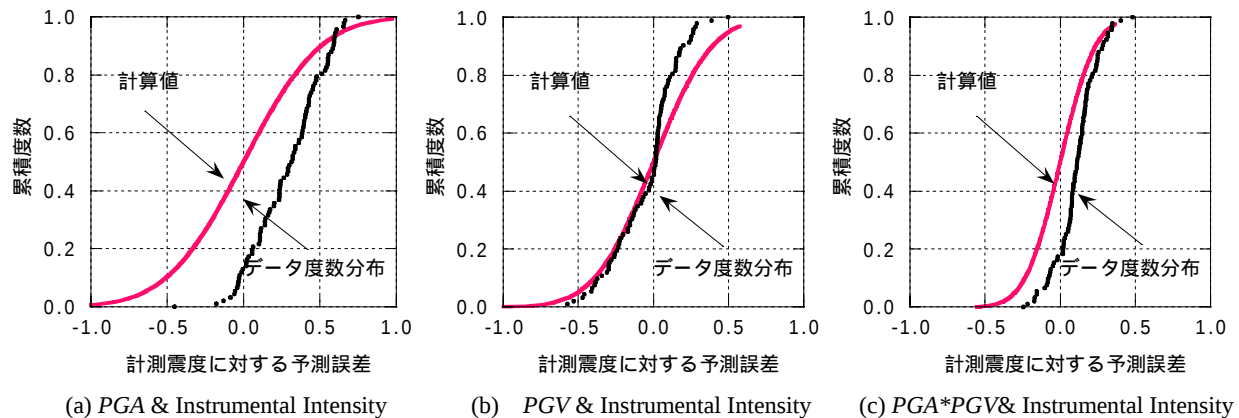


Fig.-4 Comparison of Error Distribution between 1995 Hyogo-ken-Nanbu Earthquake and All Data

なることが予想される。ここでは、1995 年兵庫県南部地震で観測された 95 地点（前述のデータベースの兵庫県南部地震に 89 地点の記録を追加，従って、震源近傍のみならず距離の範囲も広がっている）の記録と全地震を用いた場合についての比較を行う。

Fig.-4 に計測震度と最大加速度，最大速度，最大加速度*最大速度の誤差分布を全地震で得られた評価式における誤差分布との比較で示す。同図(a)に見られるように，最大加速度と計測震度の関係においては，最大加速度に比べて計測震度が全般的に高くなる傾向が伺える。また，最大速度に関しては概ね全地震での評価式と対応しており，最大加速度*最大速度では，最大加速度と計測震度の関係がずれている関係を反映して若干上側にシフトしていることがわかる。いずれの場合もその推定誤差に関してはシャープに立ち上がることであり，ばらつきは全地震の評価に比べ小さな傾向にあることが見られる。

3 最大加速度と最大速度

Table-1 のデータを用いた最大加速度と最大速度の関係を Fig.-5(a)に示す。両者の間の弱いながらも相関は見られるものの，その相関係数は 0.73 とかなりばらついていることがわかる。これから両者の関係を回帰すると，下式のようにもとまる。

$$\log_{10}(PGA) = 0.60 * \log_{10}(PGV) + 1.61 \pm \sigma = 0.26 \quad (10)$$

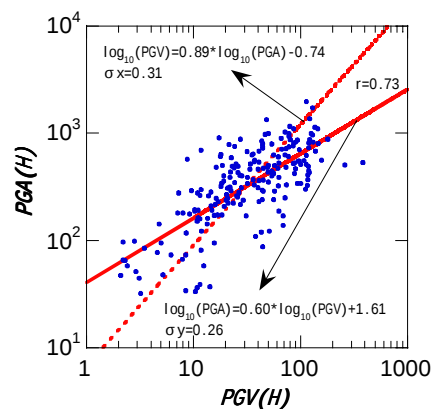
$$\log_{10}(PGV) = 0.89 * \log_{10}(PGA) - 0.74 \pm \sigma = 0.31 \quad (11)$$

両者の関係をより詳細にみると，最大速度振幅が大きくなるにつれて最大加速度はそれほど大きくならないという傾向が伺える。この理由として，一つに，振幅が大きくなるにつれ表層地盤の非線形性が生じ卓越周期が延びる影響，さらにもう一つとして，地震規模が大きくなるにつれ卓越周期が延びる傾向が現れているものと考えられる。そこで両者の比をとり，M との関係を示したのが Fig.-5(b)である。かなりばらつくものの，M の増加に従い， PGA/PGV （見掛けの卓越振動数）の関係は小さくなる傾向が見られる。

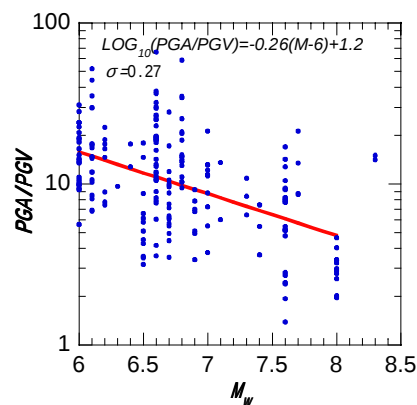
$\log_{10}(PGA/PGV) = -0.26(M-6) + 1.2 \pm \sigma = 0.27 \quad (12)$
M6 程度であるとその比の平均的な値は 15 倍程度であり，M8 程度であるとその比の平均的な値は 5 倍程度になることを示している。

4 最大値指標と応答スペクトル

地震動の最大値指標が，公表されていてもその応答スペクトル等の情報はわからない場合が多い。ここでは，最大値指標の情報から平均的な加速度応答スペクトルを評価することを目的として検討を行う。

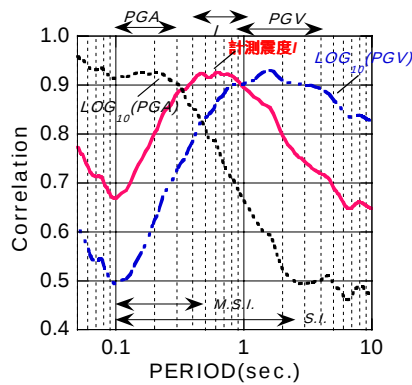


(a) PGA & PGV

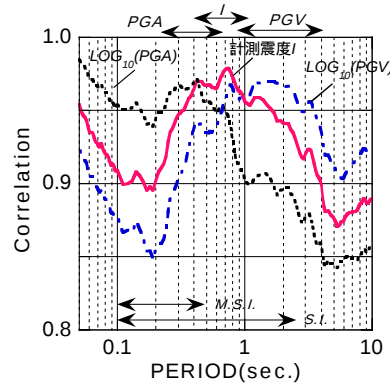


(b)PGA/PGV & M

Fig.-5 Relation between PGA and PGV



(a) All EQ DATA(Table-1)



(b) 1995 Hyogo-ken-Nanbu EQ

Fig.-6 Correlation of Response Spectrum and index of Ground motion intensity

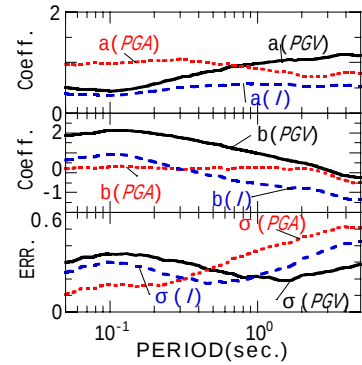
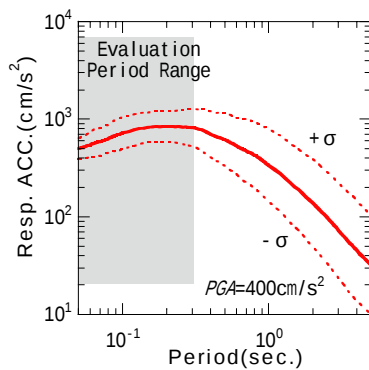
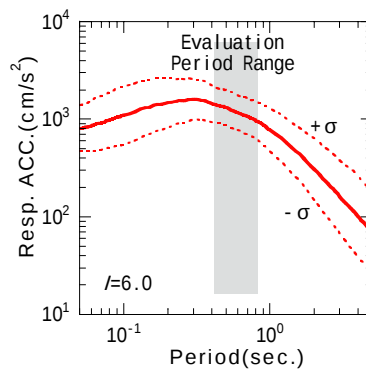


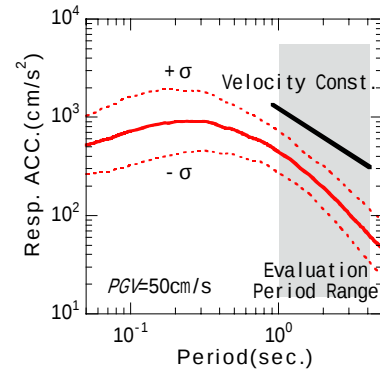
Fig.-7 Coefficient a, b, and error



(a) SA estimated from PGA(400)



(b) SA estimated from I(6.0)



(c) SA estimated from PGV(50)

Fig.-8 Response Acceleration Spectrum estimated from Intensity Index of Strong Ground Motion

Fig.-6(a)に、加速度応答スペクトルの各周期毎の振幅値と最大加速度、最大速度、計測値の相関係数を示す。同図より、最大加速度が周期 0.3 秒以下の加速度応答振幅と、また最大速度が周期 0.8 秒以上の加速度応答振幅値との対応が良いことがわかる。また計測震度はそのフィルターの定義より 1 秒弱付近での対応が良く、前述したように最大加速度、最大速度の中間的な周期帯を表わす指標となっていることがわかる。また、Fig.-6(b)には 1995 年兵庫県南部地震のみを対象とした場合の結果を示す。計測震度、最大速度に関しては、全データを用いた場合とほぼ等しいが、最大加速度に関しては、長周期側にシフトしており、前述したように最大加速度と計測震度の関係がシフトしている傾向を表している。

回帰に当たっては、平均像を把握するために、全地震のデータを用い、5%減衰の加速度応答スペクトル $SA(t)$ が下式のように表現できるものとした。

$$\text{Log}_{10}(SA(t)) = a(t)[\text{Log}_{10}(PGA \text{ or } PGV \text{ or } I)] + b(t) \pm \sigma \quad (13)$$

得られた係数 $a(t)$ 、 $b(t)$ と標準誤差 σ を Fig.-7 に示す。

前述した、各最大値指標と相関の良い周期帯では、PGA、PGV の係数 a は概ね 1 であり、 I に関しては 0.5 となっている。このことは、各最大値指標の係数倍でスペクトルが表現できる可能性があることを示唆している。標準誤差もその周期帯で小さめの値になっていることがわかる。

Fig.-8 に各最大値指標から推定した加速度応答スペクトルを示す。各々 $PGA=400\text{cm/s}^2$ 、 $I=6.0$ 、 $PGV=50\text{cm/s}$ とした場合の例である。同図には $\pm \sigma$ も示しているが、実用的に使えるような周期帯は、網掛けのした範囲であり、他の周期帯の範囲ではかなりの不確実性を見込む必要がある。このように周期帯を限定し、各指標を組み合わせる評価すれば、最大加速度、最大速度等の情報から平均的な地震動の加速度応答スペクトルがある程度推定可能である。

一方、逆に加速度応答スペクトルが既知であり、地震動強さの指標を評価する場合を考える。この場合は、応答スペクトルの振幅に対して S.I.、M.S.I.、SI 値、ASA 等、周期範囲を工学的に適宜決定し、ある平滑化を施して評価される場合が多い。ここでは、(14)式に示される平均加速度応答スペクトルを用いて検討を行った。

$$ASA_{T_1-T_2} = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} S_{A,0.05}(T) dT \quad (14)$$

$$ASV_{T_1-T_2} = \frac{1}{2\pi(T_2 - T_1)} \int_{T_1}^{T_2} T * S_{A,0.05}(T) dT$$

最大加速度 PGA と相関の良い周期帯 0.1 ~ 0.3 秒の平均加速度応答スペクトル ASA と PGA の関係を示したものが Fig.-9(a)である。この関係をもとに回帰曲線としてもとめた結果が(15)式である。同図には、参考のため逆の回帰式も併示している。

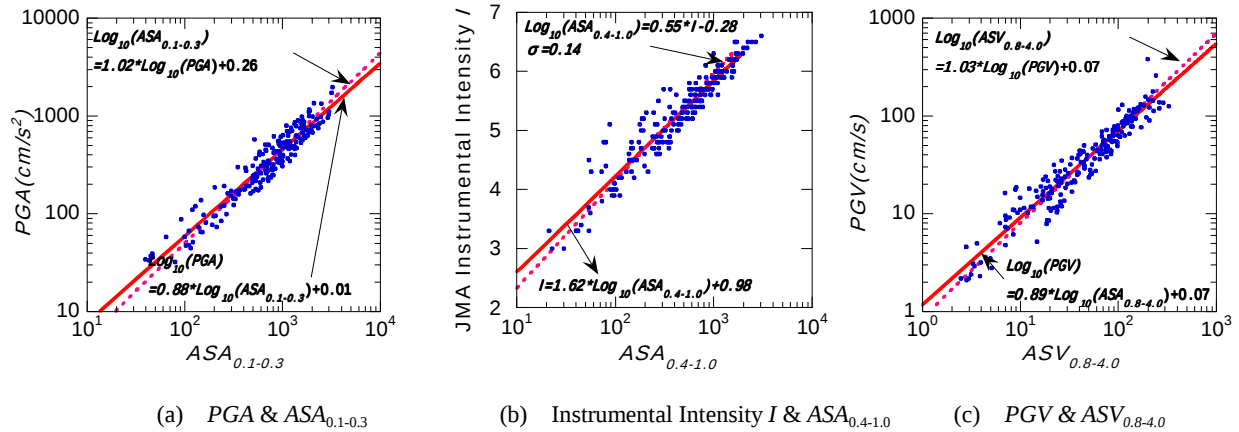


Fig.-9 Relation of Average Response Spectrum and the Intensity index of strong motion

$$\log_{10}(PGA) = 0.88 \log_{10}(ASA_{0.1-0.3}) + 0.01 \quad \sigma = 0.11 \quad (15)$$

計測震度 I と相関の良い周期帯 0.4 ~ 1.0 秒の平均加速度応答スペクトル ASA と I の関係を示したものが Fig.-9(b) である。この関係をもとに回帰曲線としてもとめた結果が (16) 式である。

$$I = 1.62 \log_{10}(ASA_{0.4-1.0}) + 0.98 \quad \pm \sigma = 0.24 \quad (16)$$

最大速度 PGV と相関の良い周期帯 0.8 ~ 4.0 秒の平均擬似速度応答スペクトル ASV と PGV の関係を示したものが Fig.-9(c) である。ここで、平均擬似速度応答スペクトルで定義した理由としては、長周期では、概ね速度応答スペクトル振幅が一定となる既往の関係 (Fig.-8(c) 参照) を考慮したことによる。この関係をもとに回帰曲線としてもとめた結果が (17) 式である。

$$\log_{10}(PGV) = 0.89 \log_{10}(ASV_{0.8-4.0}) + 0.07 \quad \sigma = 0.13 \quad (17)$$

なお、S.I. 及び M.S.I. からの推定は、既往の検討結果¹³⁾ とほぼ同様な評価式となっている。

5 まとめ

限られた地震動指標の情報から、他の地震動強さの情報を推定するために、それらの間の関係を、高振幅レベルの強震記録を基に検討を行った。

震度と地震動最大値指標の関係について検討を行い、高振幅レベルのデータにおいても、既往の検討結果と概ね対応する結果となることを示した。また、逆方向の関係が成立する主成分分析による関係式をもとめた。

特定の地震のみを対象とした場合、そのばらつきは減少し平均値が異なる可能性があることを示した。

最大加速度と最大速度の関係においては、 M による効果が見られ、地震規模が大きくなるにつれて最大加速度と最大速度の比は小さくなることを示した。

最大値指標から応答スペクトルを推定する式を検討し、応答スペクトルと最大値指標間の相関の良い周期帯において概ね評価が可能であることを示した。

このような検討は、ばらつきの大きな評価ではあるものの、第 1 次近似の推定値としての平均的地震動特性を知る有益な情報を与えるものと考えられる。

謝辞

本論文の作成に当たっては、K-NET を初め、多くの機関の強震記録を利用している。また、用いた強震記録の多くは、筆者の一人が東京工業大学翠川三郎教授とともに整理したものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 損害料率算定会：地震被害想定資料集，地震保険調査報告 28，1998，p1.1-4.153
- 2) 境有起，津野靖志，瀧藤一起，神野達夫：地震動の破壊力から見た改正基準法による設計用入力地震動，第 29 回地盤震動シンポジウム，日本建築学会，pp.111-122，2001
- 3) 野畑有秀，翠川三郎：強震記録に基づく震源近傍での地震動強さ，構造工学論文集，日本建築学会，Vol.47B，2001，pp.173-180
- 4) 童華南，山崎文雄：地震動強さ指標と新しい気象庁震度との対応関係，生産研究，第 48 巻，11 号，1996，pp.547-550
- 5) 翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さ指標との関係，地域安全学会論文集，Vol.1，1999，pp.51-56
- 6) 翠川三郎，福岡知久：気象庁震度階と地震動強さの物理量との関係，地震第 2 輯，第 41 巻，1988，pp.223-233
- 7) 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率の関係，第 9 回日本地震工学シンポジウム，1994，pp.2299-2304
- 8) 水谷守，川瀬喜雄，宮本英治：地震動指標の相互関係に関する統計的分析（第一次），第 24 回地震工学研究発表会講演論文集，1997，pp.217-220
- 9) 栗田哲史，高橋聡，嶋田昌義，安中正：応答スペクトルを用いた計測震度推定と震源断層推定への応用，応用力学論文集，土木学会，Vol.3，2000，pp.54-557
- 10) 菅原正晴，小林義尚，真下貢：計測震度と各種地震動強さ指標との関係について，日本建築学会大会学術講演梗概集，B2，1999，pp.175-176
- 11) 宮崎雅徳，岩崎宏輔，尻無濱昭三，他：計測震度と最大加速度および最大速度に関する一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，B2，1999，pp.177-178
- 12) 永井章：面的震度分布情報の発表について，地震学会ニュースレター，Vol.13，No.4，2001，pp.54-55
- 13) 小林啓美，翠川三郎，田鎖隆(1978)：震源域周辺での地震基盤からの入射波の強さについて，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.534-554