

地震動指標の相互関係に関する統計的分析 (第一次)

水谷 守¹・川瀬 喜雄²・宮本 英治³

¹正会員 工修 株式会社 篠塚研究所 (〒160東京都新宿区新宿6-26-4 JMビル)

²正会員 株式会社 復建エンジニアリング (〒104東京都中央区銀座1-2-1)

³正会員 株式会社 解析技術サービス (〒171東京都豊島区高田3-18-2 タイムプラザイセビル)

地震動の大きさの表現として計測震度、最大加速度、最大速度、SI値等様々な指標が存在し、これらは目的により使い分けられている。地震被害推定を念頭に置いた場合、対象となる施設被害と関連の深い指標を用いることが望ましいが複数の地震指標を同時に利用する際には混乱が生じる。筆者らは地震動指標として、異なる振動特性を持つ施設の被害を一元的に扱うことのできる応答加速度を提案しているが、本分析では応答加速度と他の地震動指標の関係を統計的手法で検討した。一次元波動伝播理論を用いて作成された264の仮想的な地震波時刻歴を利用し算定された各地震動指標を用いて相関解析を実施し、その結果、平均応答加速度が他の指標を精度良く推定できることが示された。

Key Words : ground motion parameter, correlation analysis, average response acceleration, intensity, PGA, PGV

1. 概要

現在、地震動の大きさの表現として計測震度、最大加速度、最大速度、SI値など様々な指標が存在している。地震被害推定を念頭に置いた場合、対象となる施設の被害と関連の深い指標を用いることが望ましい。そこで本分析では、様々な振動特性を有する構造物の応答推定に対し一元的に使用できる応答加速度に着目し、これと他の指標との関係を統計的に検討した。その結果、平均応答加速度は、計測震度と最大速度に対し良好な相関関係を有していることが判明したのでここに報告する。

2. 分析に用いたデータ

想定地盤としては、埋立地、沖積平野、河川流域部、洪積丘陵部、山間域など我が国の大都市圏に見られる代表的な表層地盤を網羅する形で22種類を成層地盤としてモデル化した。基盤における入力地震波は、エルセントロ波、八戸波、神戸波の3種類の実地震波を使用し、一次元波動伝播理論により地表面時刻歴を作成した。また、地震動の大きさによる非線形性を考慮して基盤入力における地震動レベルを、100 Gal, 300 Gal, 500 Gal, 700 Gal の4つに設定した。この方法により合計264の仮想的な地震波時刻歴を作成し、算定された各地震動指標を用いて相関解析を実施した。対象とする地震動指標は、平均応答加速度の他に、計測震度、童・山崎(1996)の計測震度推定式¹⁾、最大速度および最大加速度である。

3. 周期帯の同定

本分析で取り上げる応答加速度(SA)は加速度応答スペクトルという形式で算定されるためにこのままでは地震動指標としての適用が困難である。地震動指標としては1つのパラメータにすることが望ましく、そのためには、注目する指標や構造物の応答と関連の深い周期帯を同定する必要がある。同定された周期帯における加速度応答スペクトル値を平均したものが平均応答加速度(ASA)である。

同定の方法としては、関連付けをしたい他の指標とデジタル値で与えられた単一周期(0.02秒~4.0秒までの間に82個)毎の加速度応答スペクトル値との相関係数を算定し、同係数の高い周期帯を着目すべき周期帯とする。ここで相関係数は以下の式で表される。

$$\rho = \frac{\text{Cov}(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

上の式で x を単一周期の加速度応答スペクトル値とし y を関連付けたい他の地震動指標の値とすると

$\text{Cov}(x, y)$: x と y の共分散

σ_x : x の標準偏差

σ_y : y の標準偏差

本検討では、平均応答加速度(ASA)と計測震度(IMA)および最大速度(PGV)との関連付けを行った。計測震度との関連付けを行う際の周期帯の同定結果を表すものを図-1

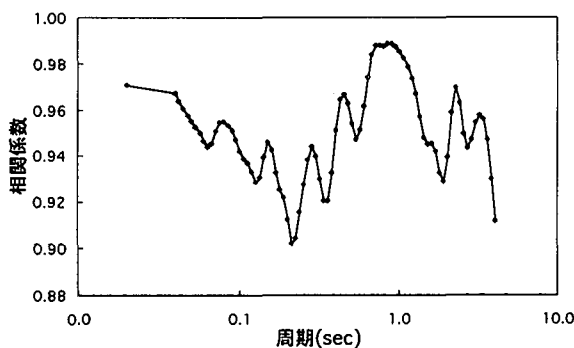


図-1 $\ln(SA)$ と I_{MA} の相関

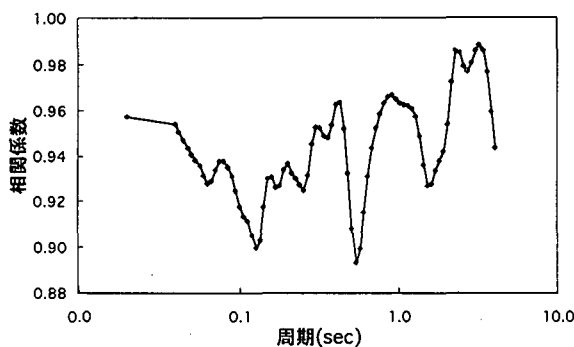


図-2 $\ln(SA)$ と PGV の相関

に、最大速度との場合のものを図-2にそれぞれ示す。図-1から計測震度と関連の深い周期帯は0.75～0.95秒であり、図-2から最大速度と関連の深い周期帯は2.2～3.4秒であることがわかった。したがって、両ケースの平均応答加速度はこれらの着目周期帯の加速度応答スペクトル値を平均したものとした。

ちなみに両図の縦軸の値である相関係数はそれが大きいほど正の相関が強いことを示しているが、この場合は周期帯毎の相対的な比較に用いるべきものであり、絶対値を比較して図-2の方が図-1よりも相関関係が強いという意味ではないことに注意を要する。

4. 評価結果

(1) 計測震度(I_{MA})との相関

平均応答加速度(ASA)を含む4つの地震動指標と計測震度(I_{MA})との相関分析と回帰分析より求められる推定式の算定を行った。その際、最大速度(PGV)、最大加速度(PGA)、平均応答加速度(ASA)の標本値は自然対数をとることとした。また、童・山崎による計測震度推定式とは以下のような最大速度と最大加速度の線形和である。

$$I = 1.11 + 0.78 \cdot \log_{10}(PGV) + 1.25 \cdot \log_{10}(PGA)$$

相関分析の結果を表-1に整理して示す。表中の指標値 v は、相関係数だけでは表しきれない非相関成分を評価するもので誤差の標準偏差であり、次式で示される。

$$v = \sigma_y \cdot \sqrt{1 - \rho^2} \quad (2)$$

表-1からもわかるように平均応答加速度(ASA)との相関は、相関係数も高く、誤差の標準偏差を示す指標値も小

表-1 他指標と計測震度との相関

	相関係数 ρ	指標値 v
童・山崎(1996)	0.986	0.112
$\ln(PGV)$	0.983	0.124
$\ln(PGA)$	0.971	0.160
$\ln(ASA)$	0.989	0.099

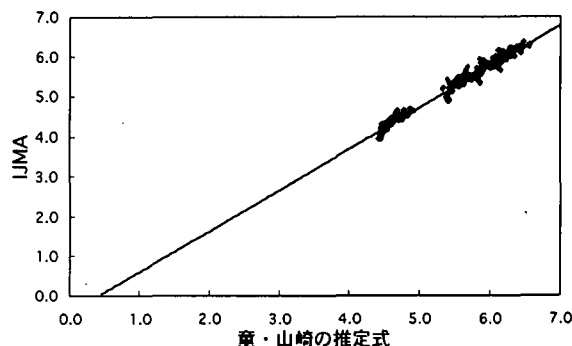


図-3 童・山崎(1996)と I_{MA} の散布図

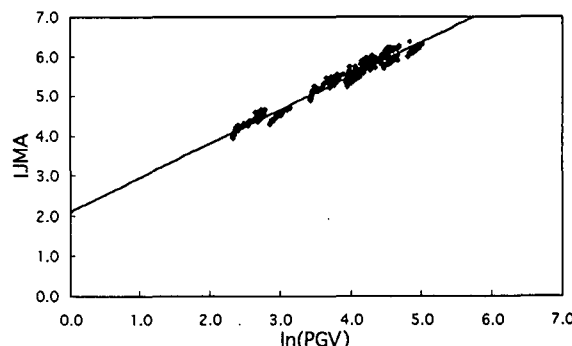


図-4 $\ln(PGV)$ と I_{MA} の散布図

さいため他の地震動指標と比較しても良好であることが理解できる。また、各地震動指標から計測震度(I)を推定する際の回帰式は以下のように算定された。

$$I = 1.03 \cdot (\text{童・山崎の推定式}) - 0.43$$

$$I = 0.85 \cdot \ln(PGV) + 2.11$$

$$I = 0.92 \cdot \ln(PGA) - 0.06$$

$$I = 0.85 \cdot \ln(ASA) - 0.12$$

図-3～図-6に各地震動指標と計測震度の関係を全標本点についてプロットし、上記の回帰式を記入したものを示す。

(2) 最大速度(PGV)との相関

平均応答加速度(ASA)を含む3つの地震動指標と最大速度(PGV)の相関分析を行った。平均応答加速度の着目周期帯は3.で述べたように、2.2～3.4秒である。相関分析の結果を表-2に示す。

また、回帰分析による推定式はそれぞれ以下のように算定された。

$$\ln(PGV) = 1.19 \cdot (\text{童・山崎の推定式}) - 2.86$$

$$\ln(PGV) = 1.05 \cdot \ln(PGA) - 2.35$$

$$\ln(PGV) = 0.93 \cdot \ln(ASA) - 0.87$$

計測震度との相関の場合と同様に、ここでも平均応答加

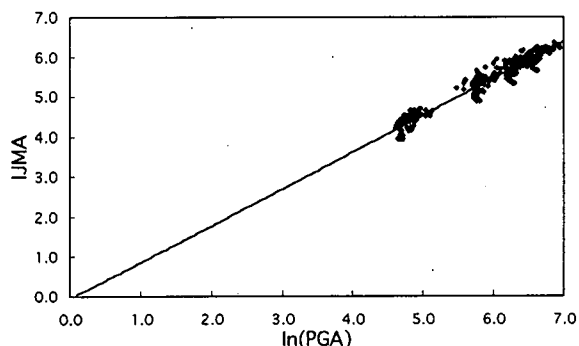


図-5 ln(PGA)とIJMA

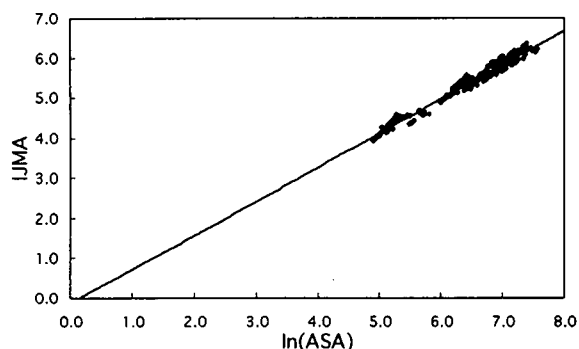


図-6 ln(ASA)とIJMA

表-2 他指標と最大速度との相関

	相関係数 ρ	指標値 v
童・山崎(1996)	0.985	0.134
ln(PGA)	0.957	0.224
ln(ASA)	0.986	0.129

速度(ASA)が最も良好な相関性を示した。計測震度の場合と比較すると誤差がやや増加するが、それでも実用的には問題のない範囲であるといえる。

(3) 地震波毎の検討

今回使用した仮想的地震波の特性が分析結果に及ぼす影響を検討する目的から、3つの地震波毎にデータを分け、他指標と計測震度との相関分析を行った。その結果を、表-3に示す。

表-3からわかるように全ての地震動指標において、全データで分析した場合と比較し、より良い相関を示す。これは各データセット毎の回帰結果のため当然である。

ここで基盤地震波毎の誤差の標準偏差に着目するとASAが最も安定していることがわかる。

各回帰式と各標本点(全264点)との誤差を横軸に、その累積度数を縦軸にとった図を、最大速度(PGV)と平均応答加速度(ASA)についてそれぞれ図-7、図-8に示す。図中の点線は回帰式と全標本点の差の平均値と標準偏差を基に作成した累積分布関数であり、この点線にプロットが完全に乗っていれば回帰式と標本点の差は正規分布となる。

図-7、図-8の横軸に示した回帰式との差の標準偏差は、最大速度(PGV)で0.124、平均応答加速度(ASA)で0.099であり、これは表-1中に示した指標値 v と一致して

表-3 地震波毎の他指標と計測震度との相関

	地震波	相関係数 ρ	指標値 v
童・山崎(1996)	EL	0.993	0.080
	八戸	0.996	0.060
	神戸	0.983	0.121
ln(PGV)	EL	0.996	0.060
	八戸	0.997	0.047
	神戸	0.992	0.081
ln(PGA)	EL	0.988	0.104
	八戸	0.990	0.090
	神戸	0.960	0.184
ln(ASA)	EL	0.991	0.089
	八戸	0.993	0.074
	神戸	0.996	0.062

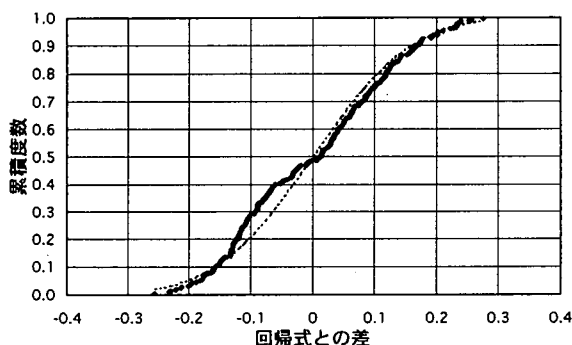


図-7 PGVにおける誤差の分布(全標本)

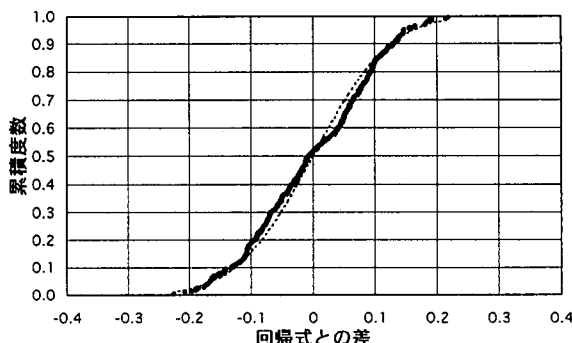


図-8 ASAにおける誤差の分布(全標本)

いる。両図を比較すると平均応答加速度の方が回帰式に適合していることがわかる。

さて、3つの地震波のうち2つで最も良い相関を示した最大速度(PGV)が3波総合では平均応答加速度(ASA)よりも相関性が落ちるのはなぜかを見るために、図-7、図-8を地震波別に分割した。最大速度(PGV)を分割したものを図-9~図-11に、平均応答加速度(ASA)を分割したものを図-12~図-14にそれぞれ示す。

図-9(PGV:エルセントロ波)では回帰式との差の範囲は1点を除いて全てプラス側であり、図-10(PGV:八戸波)では全ての標本点がマイナス側にあることがわかる。図-11(PGV:神戸波)は比較的広い範囲に分布しているが、回帰式との差の絶対値が大きい範囲(グラフの端部)での標本点が少ない。

一方、図-12(ASA:エルセントロ波)、図-13(ASA:八

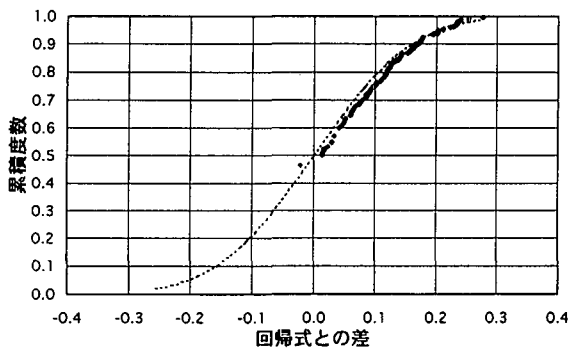


図-9 PGVにおける誤差の分布(エルセントロ波)

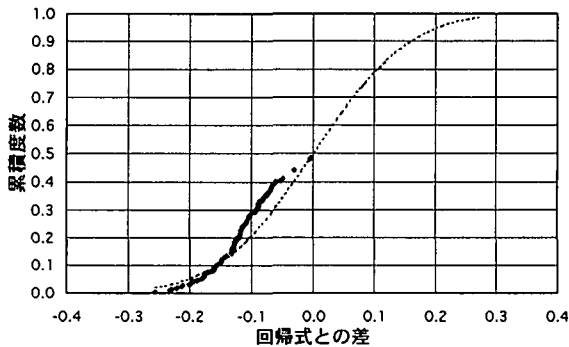


図-10 PGVにおける誤差の分布(神戸波)

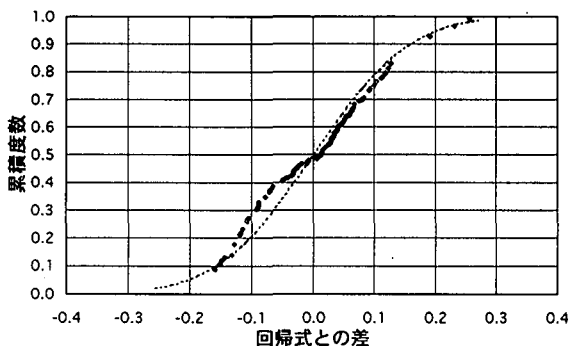


図-11 PGVにおける誤差の分布(神戸波)

戸波)、図-14 (ASA：神戸波)では多少の偏りはあるものの、標本点の範囲は満遍なく分布していることが理解される。

したがって、最大速度(PGV)は、平均応答加速度(ASA)と比較して入力地震波特性の影響を受けやすい地震動指標であると判断され、地震波毎に算出した相関係数が高かったこともこのデータの偏りが原因であったと考えられる。

5. まとめ

本分析では、多くの想定地盤モデルに対し、3種類の実地震波を4レベルで入力して複数の地震動指標値を算定した後、平均応答加速度に着目して他の地震動指標との関係を統計手法を用いて検討した。その結果、比較的良好に他の指標を推定できることが示された。この結果は現在様々な指標を用いて示される地震動を応答加速度で統一的に記述できることを示唆している。

応答加速度は様々な振動特性を持つ構造物の地震応答を一元的に推定することができる指標であり、地震時被害推

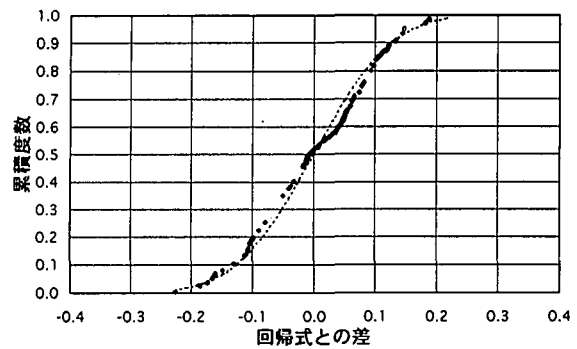


図-12 ASAにおける誤差の分布(エルセントロ波)

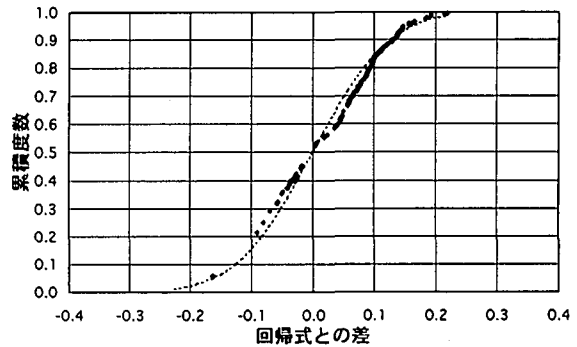


図-13 ASAにおける誤差の分布(神戸波)

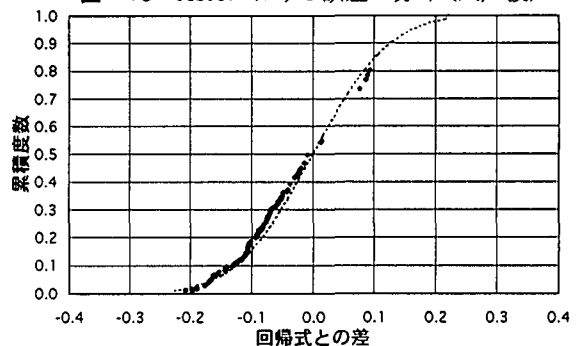


図-14 ASAにおける誤差の分布(神戸波)

定に有用と考えられる。現在利用されている様々な地震動指標による地震被害関係式を応答加速度を指標として変換することにより、その利用価値が高まることとなる。

本検討は、人工的な仮想地震を用いたものであるため今後は実地震記録を含めてより詳細な検討を行い、平均応答加速度の地震動指標としての有為性を実証していく予定である。

参考文献

- 1) 童華南・山崎文雄：地震動指標と新しい気象震度との対応関係，生産研究48巻11号，1196。