

生起特性を考慮した地震加速度応答 スペクトルの算出に関する考察

DETERMINATION OF DESIGN VALUE OF SEISMIC RESPONSE SPECTRA CONSIDERING
THE PROBABILISTIC CHARACTERISTICS OF EARTHQUAKE OCCURRENCE

杉山 俊幸* 富樫 信英** 折井 克寿***

by Toshiyuki SUGIYAMA, Nobuhide TOGASHI and Katsuhisa ORII

A computer program has been developed for obtaining design value of seismic response spectra in this paper. Probabilistic characteristics of earthquake occurrence, i.e. whether the earthquake occurrence can be modeled as Poisson Process or not, is taken into account. Records of large earthquakes which occurred in and at the circumference of Japan from 684 A.D. to 1987 A.D. are stored in this program. Total number of records are 616. When a structural engineer feeds the input data to the computer, design value of seismic response spectrum is obtained. This design value corresponds to a priori specified fractile value of the distribution of life-time maximum response spectra. Natural frequency and damping constant of structure, latitude and longitude of construction area, type of foundation, and construction time are used as the input parameters.

1. はじめに

1990年2月に改訂された現行道路橋示方書の耐震設計編では、主として震度法が採用されているが、その設計震度算定の基礎となる地震活動度は、地震の発生が'平均的である'として求められている。すなわち地震の発生がPoisson Processに従うと仮定している。しかし、地震の発生時間間隔に周期性がある場合には、構造物の建設時刻と最新の地震発生時刻との時間間隔を考慮して設計地震荷重を設定するのが確率論的には望ましいことが指摘されている¹⁾。一方、地震に関するデータは現時点では必ずしも十分ではなく、最新の情報を1個でも多く組み込んだデータを用いて統計解析する方が望ましいことは誰もが認めるところであろう。幸いなことに最近では高度情報通信網が発達し、データベースの利用が一般化してきており、これまでに得られているデータに最新の情報を追加して統計処理することは極めて容易となってきた。

以上のことを考慮して本研究では、これまでに得られている地震情報に関するデータファイルを作成し、構造物を建設する地点の緯度・経度、地盤種別、構造物の固有振動周期・減衰定数を入力すると、その地点での地震の生起特性がPoisson Processに従うか否かを判定し、Poisson Processに従わない場合にはRenewal Processとして、あらかじめ規定された超過確率値に対応する耐震設計用地震加速度応答スペクトルを算出するプログラムの開発を試みることにする。そして、地震加速度応答スペクトルの算出に際して問題となる以下の3点について検討を加えることにする。

* 工博 山梨大学助教授 工学部土木環境工学科 (〒400 甲府市武田4-3-11)
 ** 日本国土開発院 (〒107 東京都港区赤坂4-9-9)
 *** 長野県土木部 (〒380 長野市大字南長野字幅下692-2)

- ①日本各地で発生した地震のうち統計解析の対象とする地震として、耐震設計を行う地域に架設される橋梁にどの程度の応答加速度を生じさせる地震を抽出すればよいのか
 - ②Poisson Processに従うのか、Renewal Processに従うのかの判定基準をどうするか
 - ③記録漏れの少ない最近の地震データのウェイトを大きくし、記録漏れが多いと思われる古い時代の地震データに小さなウェイトをつけて統計解析すべきかどうか
- なお、③の問題については文献2)で取り扱われているが、そこでは地震の発生がPoisson Processに従うとの前提で議論が展開されており、Renewal Processに従う場合については言及されていない。また、①、②の問題について検討した研究はほとんど見当たらないのが実情である。

2. データファイルの作成

地震情報に関するデータファイルには、「日本被害地震総覧³⁾」に掲載されている西暦684年から1984年までの653個の地震のうち、震央位置およびマグニチュードの不明なものを除いた583個に、1985年から1987年間に発生した地震のうち実際に構造物に影響を与えると思われる Class 4 以上の地震33個を加えた総計616個を入力してある。入力項目は、発生年月日・地震番号・地震名・震央の緯度と経度・マグニチュードである。なお、文献3)に掲載されている地震のうちマグニチュードの範囲が示されている場合（例えば「マグニチュード7.0~7.5」）には、その中央値を入力してある。データファイルの出力結果の一部を図1に示す。

3. 地震の生起特性の考慮した加速度応答スペクトルの算出

3.1 加速度応答スペクトルの算出方法

加速度応答スペクトルの算出に際しては、建設省土木研究所で提案されている以下の式を用いた^{4), 5)}。

$$S_A(T, h) = \left(\frac{1.5}{4.0h + 1} + 0.5 \right) \cdot S_A(T, 0.05) \quad \dots (1)$$

ただし、 $S_A(T, 0.05) = a(T, GCi) \times 1.0^{b(T, GCi) \cdot M} \times (\Delta + 3.0)^{-1.178}$

T: 構造物の固有周期, h: 減衰定数, Δ: 震央距離, M: 地震のマグニチュード,

a(T, GCi) および b(T, GCi): 固有周期と地盤種別ごとに与えられる係数⁴⁾

発生年月日	地震番号	地震名	経度	緯度	マグニチュード
1983 3 16	644	シマオカシイ	137.62	34.79	5.7
1983 5 26	645	ニホカイチユウ	139.08	40.36	7.7
1983 8 8	646	カガワヤマシケンザイ	139.03	35.52	6.0
1983 10 16	647	ニガタケンセイエンガン	137.97	37.12	5.3
1983 10 31	648	トトリケンエンガン	133.93	35.41	6.2
1984 3 6	649	トリシケンカイ	139.21	29.34	7.9
1984 5 30	650	ヒウゴケンナンセイ	134.59	34.96	5.6
1984 8 6	651	シハラハントウセイ	130.17	32.76	4.8
1984 8 7	652	ヒウガナダ	132.16	32.38	7.1

図1 データファイルの出力結果の一部

3.2 地震の生起特性の考慮

本プログラムでは、応答加速度を求めたい地点の地盤種別が3種地盤で、構造物の固有周期0.1秒、減衰定数0.05の場合に100gal以上の応答加速度を生じさせる地震を抽出し、統計処理に用いている。まず地震の発生がPoisson Processに従うかどうかを調べるために、図2に示すように発生時間間隔のデータを確率紙上にプロットし、式(2)に基づいてPoisson Processへの適合性を判定する。図2のようにプロットした点が直線状になるほど ϵ の値は小さくなり、Poisson Processに従うと仮定してよいため、式(2)を判定基準としている。なお、同図の直線は、最小自乗法を用いて傾きを求め描いてある。

$$\begin{cases} \epsilon \leq 0.5 & \rightarrow \text{Poisson Process} \\ \epsilon > 0.5 & \rightarrow \text{Renewal Process} \end{cases} \quad \dots (2)$$

ただし

$$\epsilon = \lambda \times \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N \{t_i - \log_{10}(1 - y_i) / \alpha\}^2}{N - 2}}$$

$$\alpha = \sum_{i=1}^N t_i \times \log_{10}(1 - y_i) / \sum_{i=1}^N t_i^2$$

y_i : Gumbelの方法による経験的累積確率

$$\lambda = -\alpha / \log_{10} e, \quad e = 2.71828$$

そして、Poisson Processに従う場合には式(3)を、Renewal Processに従う場合には式(4)を用いて、構造物の供用期間 T_s における最大応答加速度の確率分布を求め、その10%超過確率値を算出する。

[Poisson Process に従う場合]

$$F_z(x) = \sum_{k=0}^{\infty} (F_s(x))^k \cdot \frac{(\nu T_s)^k}{k!} \exp(-\nu T_s) \quad \dots (3)$$

ただし、 $F_s(x)$: 個々の地震による応答加速度の大きさの確率分布、

ν : 地震の平均発生率 [回/年]

[Renewal Process に従う場合]

$$F_z(x) = 1 - \{1 - F_s(x)\} \sum_{k=0}^{\infty} [F_s(x)]^{k-1} \times F_{T_k}(T_c + T_s) \quad \dots (4)$$

ただし、 $F_{T_k}(t) = \int_0^t F_{T_{k-1}}(u) \cdot f_T(t-u) du$

$$F_{T_1}(t) = \{F_T(t) - F_T(T_c)\} / \{1 - F_T(T_c)\}$$

$$f_T(t) = d F_T(t) / d t$$

$F_T(t)$: 地震の発生時間間隔の確率分布

T_c : 最新の地震発生から現時点までの時間

なお、 $F_s(x)$ は極値 I 型最大値分布に、 $F_T(t)$ は Weibull 分布に従うものと仮定している。

3.3 出力例

図3に出力結果の一例を示す。図3(a)は、地震の発生がPoisson Processに従うと判定された京都に関する出力である。横軸に構造物の固有振動周期を、縦軸に応答加速度をとり、地盤種別をパラメータとして描いてある。なお、橋梁構造物の減衰定数を0.05としている。同図より、例えば3種地盤上に固有周期0.5秒の橋梁構造物を建設する場合には、800gal程度の地震応答加速度を考慮することになるのが読み取れる。

図3(b)は、地震の発生がRenewal Processに従うと判定された東京に関する出力を示したものである。縦軸、横軸は図3(a)と同じである。また、構造物の減衰定数を0.05とし、1990年1月に架設されるとしている。同図より、例えば3種地盤上に固有周期0.5秒の橋梁構造物を建設する場合には、400gal程度の地

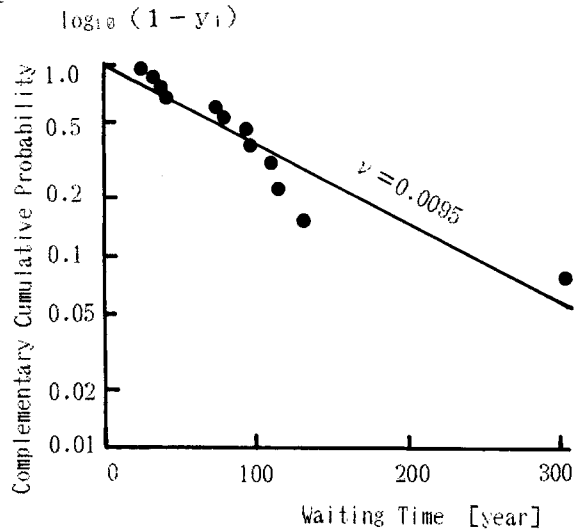


図2 京都における地震発生の待ち時間分布

震応答加速度を考慮することになるのが読み取れる。

図4は、各都道府県庁所在地の3種地盤上に固有周期0.5秒、減衰定数0.05の構造物を建設する場合に考慮すべき加速度応答スペクトルを表示したもので、構造物の架設は1990年1月になされると仮定している。京都を中心とした近畿地方や、東京・横浜・鹿児島等でかなり大きな加速度応答スペクトルを考慮する必要があることがわかる。なお、隣接した都道府県（例えば福岡県と大分県）の間に大きな差がある場合も見られるが、これは、各都道府県庁所在地における値でその都道府県の加速度応答スペクトルを代表させているためである。

図5は、各都道府県庁所在地都市における地震の発生がPoisson Processに従うか否かを判別したものである。これより、関東地方、南九州地方、および岩手(盛岡)・秋田の東北中部では地震の発生がPoisson Process

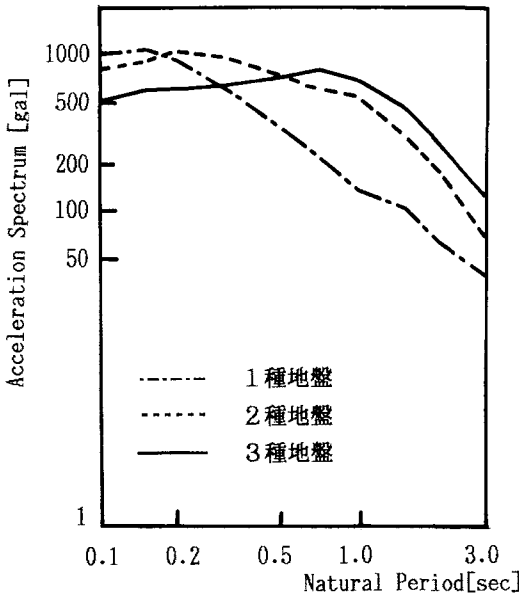


図3(a) 京都における加速度応答スペクトル

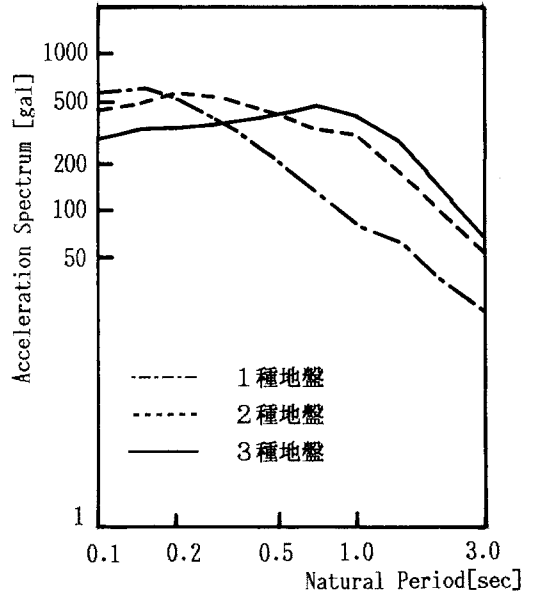


図3(b) 東京における加速度応答スペクトル

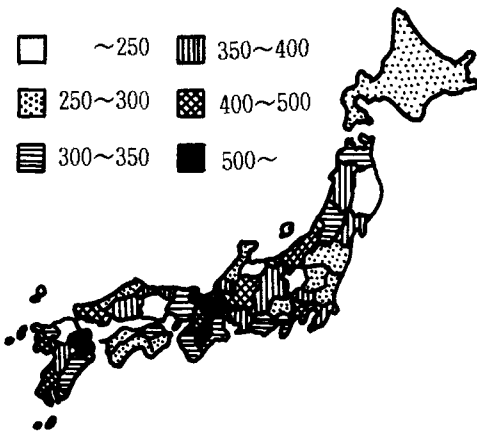


図4 加速度応答スペクトルの都道府県別分布

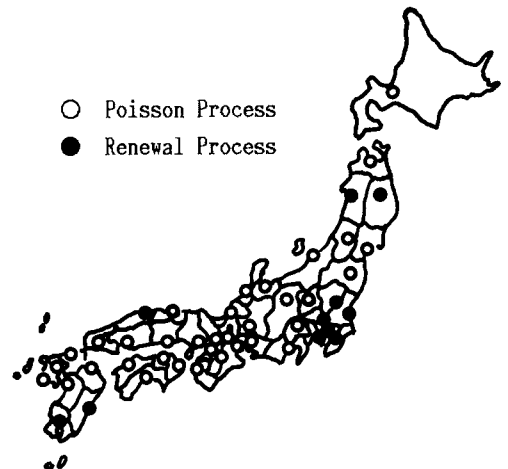


図5 日本各地の地震の生起特性

に従わないことがわかる。図には示していないが、式(2)の ε の値を0.3~0.7と変化させてもこの傾向は認められている。

4. 加速度応答スペクトルを算出する際の問題点に関する検討

これまでに算出してきた加速度応答スペクトルは、地盤種別が3種地盤で、構造物の固有周期0.1秒、減衰定数0.05の場合に100gal以上の応答加速度を生じさせる地震を抽出して、式(2)の判定基準に基づいて算出したものである。しかし、100galという値や $\varepsilon=0.5$ という値が果たして妥当な値かどうかは疑問が残る。また、文献2)で指摘されているように、記録漏れの少ない最近の地震データのウェイトを大きくし、記録漏れが多いと思われる古い時代の地震データに小さなウェイトをつけるというようなデータの重み付けは全く考慮せずに統計解析を行って得られたものである。これらの事項は、本プログラムを用いて得られる結果に大きく影響を及ぼすものであるといえよう。そこで本章では、これらの問題点に関して検討することにする。

4.1 地震データ抽出の基準となる加速度応答スペクトルの値

データファイルの中から地震を抽出する際に、構造物の架設地点に対してほとんど影響を及ぼさない地震は統計解析に用いる必要がない。そこで問題となるのは、どの程度の加速度応答スペクトルを生じさせる地震を統計解析の対象とすればよいかである。前述したように、この点に関する研究は見当たらないのが実情である。そこでここでは、震央距離とマグニチュード、および加速度応答スペクトルの関係を式(1)を用いて求め、その結果に基づいて基準となる加速度スペクトルの値を決定することを試みた。

表1 様々な震央距離、マグニチュードにおける加速度応答スペクトル

震央距離	マグニチュード	加速度応答スペクトル
50km	5	82.1gal
	6	132.6gal
	7	214.0gal
100km	5	46.4gal
	6	74.8gal
	7	120.8gal
200km	5	23.7gal
	6	38.2gal
	7	61.7gal

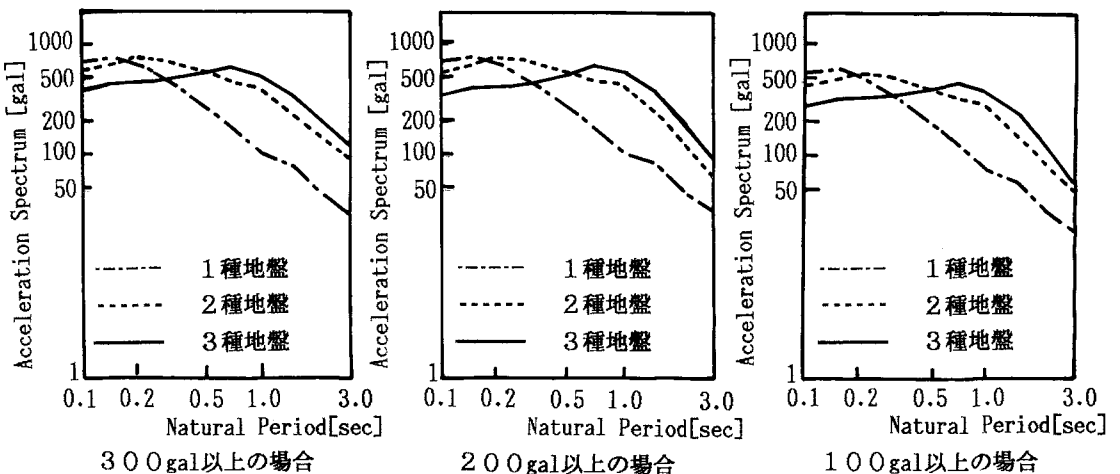


図6(a) 地震データ抽出の基準値を変化させた場合の加速度応答スペクトル (東京)

表1は、3個の震央距離、マグニチュードに対する加速度応答スペクトルを式(1)により算出した結果を示したものである。なお、3種地盤で、構造物の固有周期0.1秒、減衰定数0.05である場合について計算している。この表より、現行の耐震設計で用いられている0.2gという設計震度を越えるのは、震央距離が50kmでマグニチュードが7以上の地震であり、震央距離100kmでマグニチュード6以下の地震や、震央距離200kmでマグニチュード7以下の地震が構造物に与える影響はさほど大きくないといえる。そこで本研究では、加速度応答スペクトルの基準値を現行設計震度のほぼ1/2に相当する100galとしたのであるが、この基準値を200gal、300galと変化させたときの東京および京都における加速度応答スペクトルを求めたのが図6(a)、(b)である。これらの図より、基準値を大きくするほど大きな地震しか統計解析の対象とならないため、式(3)や式(4)に含まれる $F_s(x)$ の平均値は大きくなるものの、データ数が少なくなるため平均発生率や発生時間間隔の確率分布の平均値が小さくなり、式(3)、式(4)で求められる構造物の供用期間 T_s における最大応答加速度の確率分布 $F_z(x)$ の平均値や変動係数等にさほど差が生じないと考えられる。従って、データ数が過度に少なくなると統計解析の精度が低下することを考慮すると、加速度応答スペクトルの基準値として100galを選択しておくのが妥当であるといえよう。

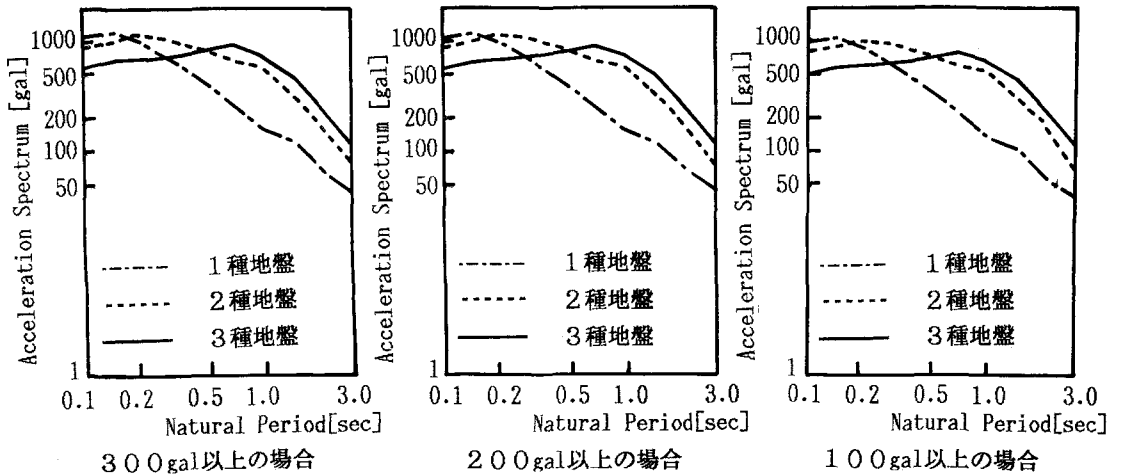


図6(b) 地震データ抽出の基準値を変化させた場合の加速度応答スペクトル (京都)

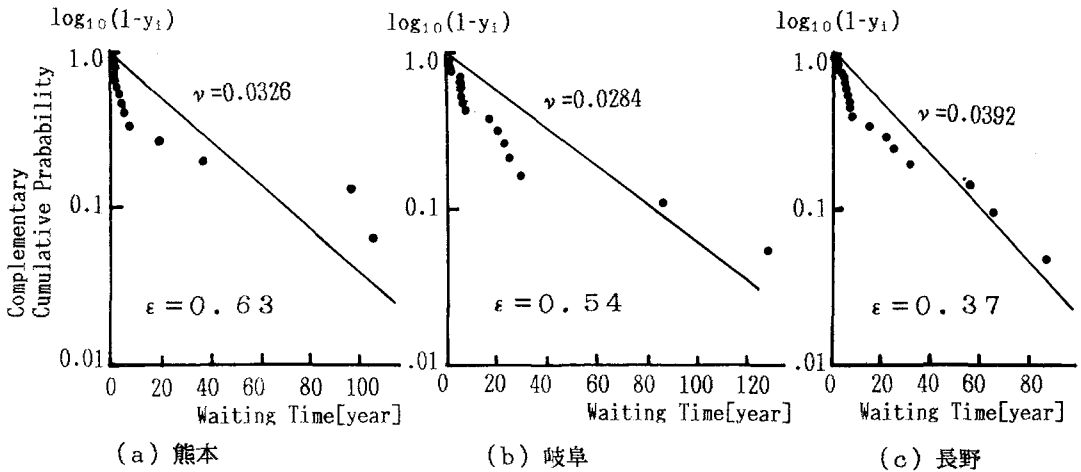


図7 地震発生の待ち時間分布

4.2 Poisson Processに従うか否かの判定基準

Poisson Process に従うか否かの判定基準となる ϵ の値を、主観的ではあるが最も簡単に決定する方法は、図2に示したように全国各地の地震発生の待ち時間分布を確率紙上にプロットし、プロットした点が直線状となっているかどうかを判定して、 ϵ の値がどのような範囲をとるときに直線状と判断されたかを調べることである。

図7は、各都道府県庁所在地において上記の作業を行った結果の一例を示したものである。これらの図は、図2と同じで地震発生の待ち時間分布を表わしており、図7(a)には、 $\epsilon = 0.63$ となった熊本、(b)には $\epsilon = 0.54$ となった岐阜、(c)には $\epsilon = 0.37$ となった長野の場合を示してある。また、図2に示した京都の場合には $\epsilon = 0.28$ となっている。これらの図より、プロットしたデータが直線状とみなせるかどうかの基準値の上限として $\epsilon = 0.5$ 程度が妥当であるといえる。

ϵ をどのような値とするのが妥当かを別の観点から検討したのが図8である。同図(a)、(b)、(c)は各各東京、甲府、京都において地震の発生がPoisson Processに従うと仮定して求めた加速度応答スペクトルおよび、Renewal Processに従うと仮定して求めた加速度応答スペクトルが示してある。 $\epsilon = 0.97$ となった東京では、Renewal Processに従うとして算出した方が30gal程度Poisson Processに従うと仮定した場合の値よりも大きくなっていることがわかる。これに対し、 $\epsilon = 0.28$ であった京都の場合には、逆にPoisson Processに従うと仮定した場合の値の方が50gal程度大きくなっている。 $\epsilon = 0.58$ と0.5に近い値となった甲府の場合には、両者の差が1~2galと極めて小さくなっている。すなわち、 $\epsilon \approx 0.5$ となるような地点では、地震の発生がPoisson Processに従うと仮定してもRenewal Processに従うと仮定しても加速度応答スペクトルの算出値にほとんど

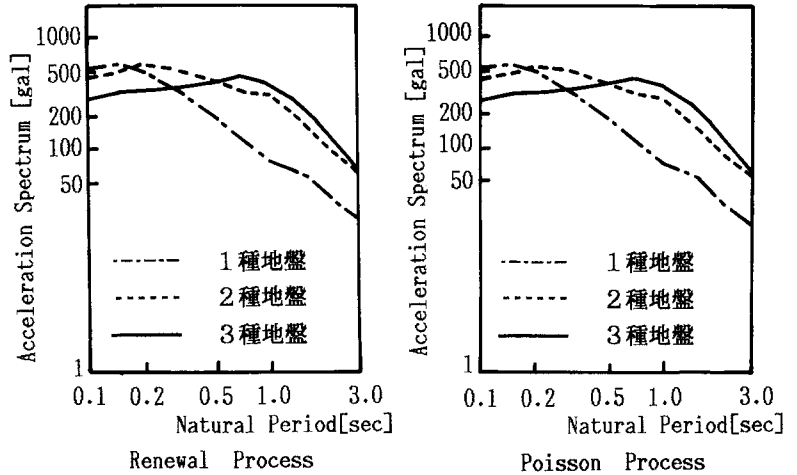


図8(a) Poisson Process および Renewal Process と仮定した場合の加速度応答スペクトル (東京)

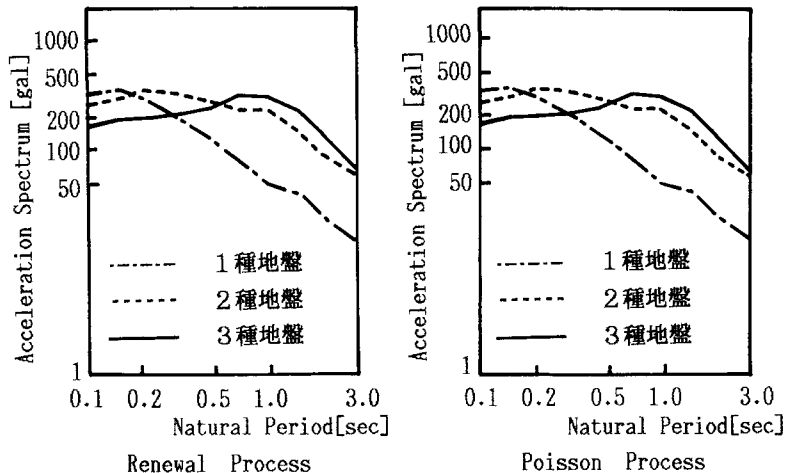


図8(b) Poisson Process および Renewal Process と仮定した場合の加速度応答スペクトル (甲府)

ど差は生じないが、Poisson Processに従うのにRenewal Processに従うとして、およびこの逆の仮定をして加速度応答スペクトルを算出することは、地震の影響を過小評価することになる。このことは、 ϵ として0.5程度の値を設定しておくのが妥当であることを物語っていると同時に、全国一律に地震の発生をPoisson Processに従うと仮定して設計荷重を算出することは設計の観点からは好ましくないことを示唆している。

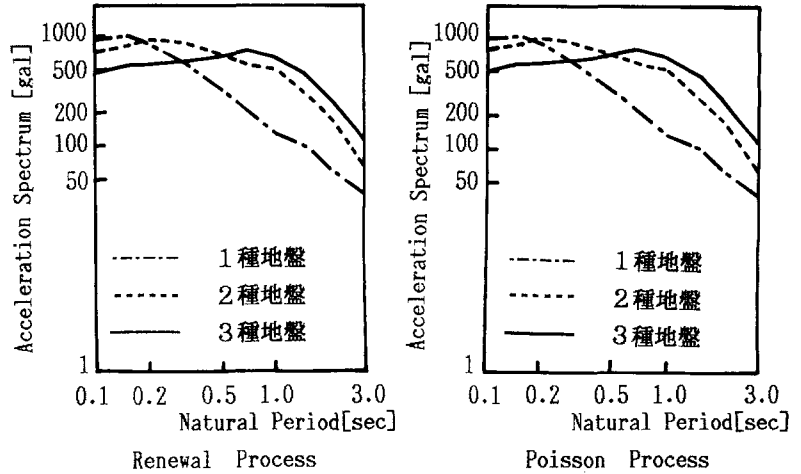


図8(c) Poisson Process および Renewal Process と仮定した場合の加速度応答スペクトル (京都)

4.3 地震データの重み付け

図9は、東京および京都における100年ごとの観測地震のデータ数を示したものである。加速度応答スペクトルが100gal以上の場合に着目すると、東京では、江戸幕府成立後の西暦1600年以降のデータ数が圧倒的に多いのに対し、京都では700年代から1700年代までの各100年間に1~4回コンスタントにデータが抽出されていることがわかる。これは、文献2)でも指摘されているように、地震記録の正確さは各年代における社会的・政治的条件に大きく依存していることを示唆している。加速度応答スペクトルが300gal以上の場合には、京都では1900年代に起こった地震が1つもないのに対し、800年代から1800年代にかけてほぼコンスタントにデータが得られる。これに対し、東京では、800年代1個、1200年代1個、1600年代1個、1900年代2個となっており、記録漏れの少ない最近の地震データのウエイトを大きくし、記録漏れが多いと思われる古い時代の地震データに小さなウエイトをつけるというようなデータの重み付けを考慮するのが果たして妥当かどうか疑問が残る。

図10は、地震データ抽出の基準となる加速度応答スペクトルの値を100galから300galまで変化させた場合に、Poisson Processに従うか否かの判定基準となる ϵ の値がどのように変化するかを調べたものである。加速度応答スペクトルの値を大きくしていくと統計解析に用いるデータ数が減少するため、甲府の場合のように ϵ の値が大きくなっていくのが一般的である。この、「加速度応答スペクトルの値を大きく

観測地震の個数

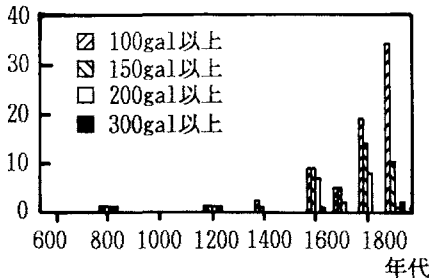


図9(a) 東京における100年ごとの観測地震数

観測地震の個数

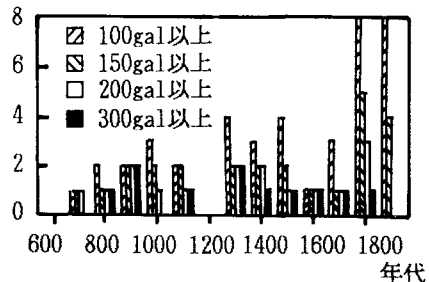


図9(b) 京都における100年ごとの観測地震数

していくと ε の値が大きくなっていく」という一般的傾向は、巨大地震になるほど周期性が強いという直観と合致しているとも言える。しかし、東京の場合にはこうした傾向を示していない。これは、図11に示すように、加速度応答スペクトルの基準値を大きくすることによって小規模・中規模地震が抽出されなくなり、基準値を300galとした時には、抽出される5個の巨大地震のうち2個が1900年代に観測されたものということで、待ち時間分布がたまたまPoisson Processに従ったためと考えられる。これに対し京都では、全年代にわたって地震記録がある程度網羅されているので、図2からもわかるように待ち時間のばらつきも小さく、また、加速度応答スペクトルの値を大きくすると ε の値が増大する傾向にあるものの、その変化は比較的少ない。

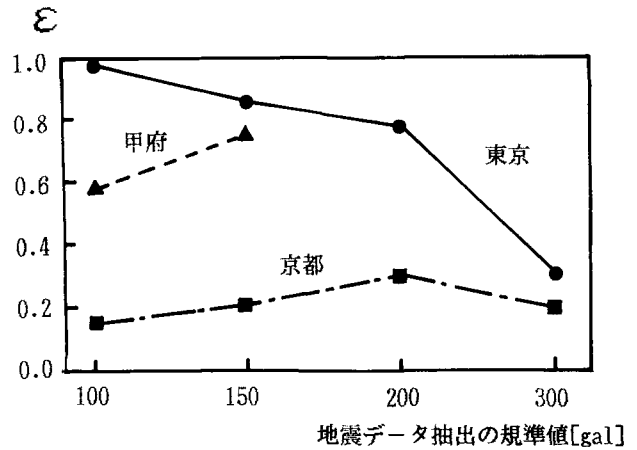


図10 地震データ抽出の基準値を変化させた場合の ε の値

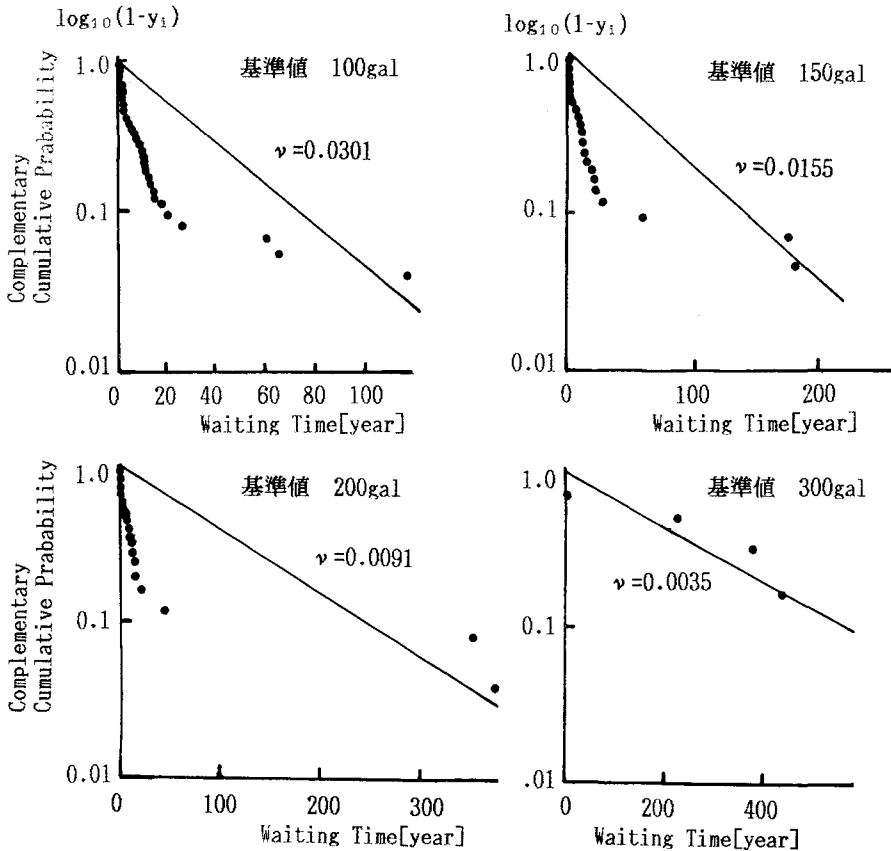


図11 地震データ抽出の基準値を変化させた場合の東京における待ち時間分布

以上の結果をまとめると、観測地震記録の重み付けを考える場合、単に記録漏れの少ない最近の地震データのウェイトを大きくし、記録漏れが多いと思われる古い時代の地震データに小さなウェイトをつけるというようなデータの重み付けを考慮するというのではなく、地震記録がある程度網羅されている地域とそうでない地域とを区別して考えていく必要があるといえる。

5. まとめ

設計しようとする建造物の振動特性（固有周期、減衰定数）、架設地点の経度・緯度および地盤種別を入力すると、その地点での地震の生起特性がPoisson ProcessとRenewal Processのどちらに従うかを判別し、あらかじめ規定された超過確率に対応する加速度応答スペクトルを算出できるプログラムを作成した。そして、地震加速度応答スペクトルの算出に際して考慮すべき問題について考察を加えた。その結果、統計解析に用いる地震を抽出する際の基準値、Poisson ProcessかRenewal Processかを判定する際の基準値を明らかにすることができた。また、全国一律に地震の発生をPoisson Processに従うと仮定して設計荷重を算出すると地震荷重を過小評価する場合も生じ設計の観点からは好ましくないこと、観測地震記録の重み付けを考える場合、地震記録がある程度網羅されている地域とそうでない地域とを区別して考えていく必要があることが結果として得られた。

参 考 文 献

- 1) 杉山，藤野，伊藤：偶発荷重の統計確率的性質に関する2，3の考察，第33回年次学術講演会，I-128，pp.248-249，昭和53年9月。
- 2) 後藤尚男，亀田弘行：地震時における最大地動の確率論的研究，土木学会論文集第159号，pp.1-12，昭和43年11月。
- 3) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧，東大出版会，1987年3月。
- 4) 建設省土木研究所：最大地震動および地震応答スペクトルの推定法，土研資料第2001号，昭和58年7月。
- 5) 川島一彦，相沢興，高橋和之：最大地震動および地震応答スペクトルの距離減衰式，土研報告第166号，昭和60年9月。

(1990年10月12日受付)