

想定地震に基づくレベル2地震動の設定手法について

田村敬一¹・片岡正次郎²

¹正会員 工博 独立行政法人土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)

²正会員 工博 国土交通省国土技術政策総合研究所 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1)

土木構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を設定するために、対象とする地震を想定した上で、地震動を推定する実務的な手法を試案として提示した。本研究では、まず、内陸地震と海溝型地震のそれぞれについて、各断層パラメータ間の関係を求め、断層モデルを設定する手法を示した。次に、動的解析に用いる時刻歴波形を得ることができ、かつ、実測の強震記録が得られていない場合にも適用可能な地震動の推定手法として、統計的グリーン関数法によりレベル2地震動を設定するための手法を提示した。

Key Words: Level 2 design ground motion, scenario earthquake, source fault model, stochastic Green's function method, seismic design

1. はじめに

現在、土木構造物の耐震設計においては対象とする地震を想定した上で、設計地震動を設定するという方向が指向されている。ただし、実際にこのような手法で設計地震動が設定された事例は限定的である。これは、想定する地震から地震動強度を算定する実務的な手法が確立されていないことによる部分が多い。

このような背景を踏まえ、本稿では、将来発生する地震を想定して断層モデルを設定した上で、統計的グリーン関数法によりレベル2地震動を設定するための手法を試案として取りまとめた。まず、内陸地震と海溝型地震では各断層パラメータ間の平均的な関係が異なるため、それぞれの地震について、断層パラメータ間の関係から断層モデルを設定する手法を示した。次に、レベル2地震動を対象とした耐震設計では、構造物の非線形挙動を動的解析により算定することが考えられるため、地震動の推定手法としては、時刻歴波形を得ることができる方法を提示することとした。ここで、構造物の建設予定地点で強震記録が得られていない場合を想定して、過去に得られた強震記録の統計的性質に基づき地震動を推定する統計的グリーン関数法を用いることとした。

2. 断層モデルの設定手法

(1) 内陸地震の場合

1) 断層面の位置 (走向 ϕ 、傾斜角 δ) と断層長さ L を決定する。

対象地点周辺における活断層を活断層マップ等によって選定し、各断層セグメントの走向 ϕ と傾斜角 δ を決定する。また、同時に活動する可能性の高い断層セグメントの長さの合計を対象地震の断層長さ L とする。

2) 断層幅 W を決定する。

入倉・三宅¹⁾は、Somerville et al.²⁾が収集した15の内陸地震の断層モデルから、 $L < 20[\text{km}]$ では $W=L$ 、 $L \geq 20[\text{km}]$ では $W=H/\sin\delta$ とすることを提案している。ここで、 H は上部地殻の地震発生層の層厚である。本研究では、上述の結果を参照して、 $L < H/\sin\delta$ では $W=L$ 、 $L \geq H/\sin\delta$ では $W=H/\sin\delta$ とする。地震発生層の層厚 H は微小地震の発生範囲と対応しているが、不明の場合には平成7年兵庫県南部地震の断層モデル^{例えば、3)}を参考に $H=20[\text{km}]$ とする。

3) 断層面積 S を計算する。

$S=L \times W$ によって求められる。

4) 地震モーメント M_0 を決定する。

Somerville et al.²⁾は、収集した15の内陸地震の断層モデルから、

$$S [\text{km}^2] = 2.23 \times 10^{-15} \cdot M_0^{2/3} [\text{dyne} \cdot \text{cm}] \quad (1)$$

の関係をj得ている

5) 平均くい違い量 D を計算する。

地震モーメント M_0 、せん断剛性率 μ 、断層面積 S から $D=M_0/(\mu S)$ によって求められる。日本の上部地殻の地震発生層におけるせん断剛性率はおよそ 3

$\times 10^{11}[\text{dyne/cm}^2]$ であるが、活断層周辺における地下構造からせん断剛性率を求めることが望ましい。なお、 $\mu=3 \times 10^{11}[\text{dyne/cm}^2]$ とすると、密度 ρ とS波速度 β は $\mu=\rho\beta^2$ より $\rho=2.6[\text{g/cm}^3]$ 、 $\beta=3.4[\text{km/s}]$ となる。

6) 立ち上がり時間 τ 、破壊伝播速度 v を決定する。

$$\tau[\text{s}] = 2.03 \times 10^{-9} \cdot Mo^{1/3}[\text{dyne} \cdot \text{cm}] \quad (2)$$

の関係を得ている。また、破壊伝播速度の平均値は $v=2.73[\text{km/s}]$ となっているが、これは地震発生層におけるS波速度 $\beta=3.4[\text{km/s}]$ の0.80倍である。

7) アスペリティの個数と面積を決定する。

Somerville et al.²⁾は、内陸地震の断層モデルから矩形アスペリティを抽出し、それぞれの断層モデルに平均2.6個のアスペリティがあり、平均的にはアスペリティの合計面積が全断層面積の22%を占め、最大のアスペリティが16%を占めるという結果を得ている。

入倉・三宅¹⁾はこの結果から小さいアスペリティを除外し、平均は2.1個という結果を得た上で、起震断層が複数の断層セグメントからなる場合は各セグメントに1個、単一の断層セグメントの場合は $L < H/\sin\delta$ で1個、 $L \geq H/\sin\delta$ で2個のアスペリティを置くことを提案している。

このアスペリティの面積(大きさ)は推定地震動の卓越周期に大きな影響を及ぼす⁴⁾ことから、ここでは各セグメントのアスペリティが1個の場合と2個の場合の両方を想定し、1個の場合には全断層面積の22%、2個の場合には大きい方が16%、小さい方が6%を占めることとする。なお、Somerville et al.²⁾はアスペリティの長さとの比がほぼ1になっていることを考慮して、アスペリティはなるべく正方形に近い形状とするものとする。

8) アスペリティと背景領域でのくい違い量と応力降下量を決定する。

Somerville et al.²⁾は、矩形アスペリティについて、アスペリティ内での平均すべり量 D_a が全断層面での平均すべり量 D の2.01倍になるという結果を得ている。

入倉・三宅¹⁾は、セグメントにアスペリティが1個の場合には $\sigma_a=9.6[\text{MPa}]$ 、2個の場合には $\sigma_{a1}=\sigma_{a2}=12.6[\text{MPa}]$ とすることを提案している。その結果、アスペリティが1個の場合には $D_a=2.01D$ 、2個の場合には大きい方が $D_{a1}=2.24D$ 、小さい方が $D_{a2}=1.37D$ のくい違い量になる。また、背景領域についてはアスペリティの個数に関わらず応力降下量 $\sigma_b=1.8[\text{MPa}]$ 、くい違い量 $D_b=0.72D$ となる。

一方、壇・他⁵⁾は過去に提案されている不均質な断層モデルから短周期レベル A (短周期領域におけ

る加速度震源スペクトルのレベル)を算定し、その地震モーメントとの経験式

$$A[\text{dyne} \cdot \text{cm/s}^2] = 2.46 \times 10^{17} \times Mo^{1/3}[\text{dyne} \cdot \text{cm}] \quad (3)$$

を得ている。その上で、この短周期レベルに一致するような応力降下量を求めた結果、せん断剛性率 $3 \times 10^{11}[\text{dyne/cm}^2]$ の場合に12.6[MPa]という値を得ている。この場合のアスペリティは全断層面積の35%を占めている。また、背景領域の応力降下量は2.9[MPa]となっている。

以上のことから、ここではアスペリティの個数に関わらず、アスペリティでの応力降下量を $\sigma_a=13[\text{MPa}]$ とし、アスペリティが1個の場合には $D_a=2.01D$ 、2個の場合には大きい方が $D_{a1}=2.24D$ 、小さい方が $D_{a2}=1.37D$ のくい違い量とする。また、背景領域については応力降下量 $\sigma_b=2[\text{MPa}]$ 、くい違い量 $D_b=0.72D$ とする。

9) 震源位置、アスペリティ位置を設定する。

事前に想定することは困難なため、断層面内で系統的に設定する。

以上をもとに、内陸地震の断層パラメータの設定値の一覧を表-1に示す。

表-1 内陸地震の断層パラメータの設定

パラメータ	設定値
走向 ϕ , 傾斜角 δ	活断層マップ等
断層長さ L [km]	同時に活動するセグメント長の合計
断層幅 W [km]	$W = L (L < H/\sin\delta)$ $W = H/\sin\delta (L \geq H/\sin\delta)$
断層面積 S [km ²]	$S = L \times W$
地震モーメント Mo [dyne·cm]	$S = 2.23 \times 10^{-15} \cdot Mo^{2/3}$
平均くい違い量 D [cm]	$D = Mo / (10^{10} \times \mu S)$
立ち上がり時間 τ [s]	$\tau = 2.03 \times 10^{-9} \cdot Mo^{1/3}$
破壊伝播速度 v [km/s]	$v = 0.80\beta$ (β : S波速度)
アスペリティ面積 S_a [km ²]	$S_a = 0.22S$
アスペリティ(大)面積 S_{a1} [km ²]	$S_{a1} = 0.16S$
アスペリティ(小)面積 S_{a2} [km ²]	$S_{a2} = 0.06S$
アスペリティくい違い量 D_a [cm]	$D_a = 2.0D$
アスペリティ(大)くい違い量 D_{a1} [cm]	$D_{a1} = 2.24D$
アスペリティ(小)くい違い量 D_{a2} [cm]	$D_{a2} = 1.37D$
背景領域くい違い量 D_b [cm]	$D_b = 0.72D$
アスペリティ応力降下量 σ_a [MPa]	$\sigma_a = 13$
背景領域応力降下量 σ_b [MPa]	$\sigma_b = 2$

(2) 海溝型地震の場合

1) 断層面の位置(走向 ϕ 、傾斜角 δ)と断層長さ L 、断層幅 W を決定する。

対象地点周辺における既往の海溝型地震を選定し、

提案されている断層モデル^{例えば、6)}等をもとに、断層面の走向 ϕ 、傾斜角 δ 、断層長さ L 、断層幅 W を決定する。

2) 断層面積 S を計算する。

$S=L \times W$ によって求められる。

3) 地震モーメント M_0 を決定する。

金森⁷⁾は、海溝型地震の平均的な静的応力降下量を 3[MPa]として、

$$S[\text{km}^2]=1.88 \times 10^{-15} \cdot M_0^{2/3}[\text{dyne} \cdot \text{cm}] \quad (4)$$

の関係を得ている

4) 平均くい違い量 D を計算する。

地震モーメント M_0 、せん断剛性率 μ 、断層面積 S から $D=M_0/(\mu S)$ によって求められる。日本の海溝付近におけるせん断剛性率はおおよそ $5 \times 10^{11}[\text{dyne}/\text{cm}^2]$ であるが、想定した断層面周辺におけるデータからせん断剛性率を求めることが望ましい。なお、 $\mu=5 \times 10^{11}[\text{dyne}/\text{cm}^2]$ とすると、密度 ρ と S 波速度 β は $\mu=\rho\beta^2$ より $\rho=3.1[\text{g}/\text{cm}^3]$ 、 $\beta=4.0[\text{km}/\text{s}]$ となる。

5) 立ち上がり時間 τ 、破壊伝播速度 v を決定する。

佐藤⁶⁾は、日本で発生した既往地震の断層モデルから、くい違い速度の平均値を 80[cm/s]として

$$\tau[\text{s}]=1.98 \times 10^{-9} \cdot M_0^{1/3}[\text{dyne} \cdot \text{cm}] \quad (5)$$

の関係を得ている。また、破壊伝播速度は断層面周辺の S 波速度 $\beta=4.0[\text{km}/\text{s}]$ の 0.80 倍とすると、 $v=3.2[\text{km}/\text{s}]$ が得られる。

6) アスペリティの個数と面積を決定する。

Somerville et al.⁸⁾は、収集した海溝型地震の断層モデルから矩形アスペリティを抽出し、平均的にはアスペリティの合計面積が全断層面積の 25% を占め、最大のアスペリティが同様に 17% を占めるという結果を得ている。

ここではアスペリティが 1 個の場合と 2 個の場合の両方を想定し、1 個の場合には全断層面積の 25%、2 個の場合には大きい方が 17%、小さい方が 8% を占めることとする。なお、断層面が 2 つ以上に分かれている場合、それぞれの断層面に 1 個または 2 個のアスペリティを想定することとする。また、海溝型地震の場合もアスペリティはなるべく正方形に近い形状をとるものとする。

7) アスペリティと背景領域でのくい違い量と応力降下量を決定する。

Somerville et al.⁸⁾は、矩形アスペリティについて、アスペリティ内での平均すべり量 D_a が全断層面での平均すべり量 D の約 2 倍になるという結果を得ている。

壇・他⁵⁾は前述の内陸地震と同様の方法で応力降下量を求めた結果、せん断剛性率 $5 \times 10^{11}[\text{dyne}/\text{cm}^2]$ の場合に 8.29[MPa]という値を得ている。ただし、この場合のアスペリティは全断層面積の 35% を占め

ている。また、背景領域の応力降下量は 1.91[MPa]となっている。

ここでは、アスペリティを 2 個とした場合に、前述の入倉・三宅¹⁾と同様の方法でアスペリティと背景領域での応力降下量を求めた結果から、 $\sigma_{a1}=\sigma_{a2}=16[\text{MPa}]$ 及び $\sigma_b=2[\text{MPa}]$ とし、アスペリティが 1 個の場合には $D_a=2.0D$ 、2 個の場合には大きい方が $D_{a1}=2.22D$ 、小さい方が $D_{a2}=1.57D$ のくい違い量とする。また、背景領域については応力降下量 $\sigma_b=2[\text{MPa}]$ 、くい違い量 $D_b=0.67D$ とする。

8) 震源位置、アスペリティ位置を設定する。

事前に想定することは困難なため、断層面内で系統的に設定する。

以上をもとに、海溝型地震の断層パラメータの設定値の一覧を表-2 に示す。

表-2 海溝型地震の断層パラメータの設定

パラメータ	設定値
走向 ϕ , 傾斜角 δ	既往地震等
断層長さ L [km]	既往地震等
断層幅 W [km]	既往地震等
断層面積 S [km ²]	$S=L \times W$
地震モーメント M_0 [dyne·cm]	$S=1.88 \times 10^{-15} \cdot M_0^{2/3}$
平均くい違い量 D [cm]	$D=M_0/(10^{10} \times \mu S)$
立ち上がり時間 τ [s]	$\tau=1.98 \times 10^{-9} \cdot M_0^{1/3}$
破壊伝播速度 v [km/s]	$v=0.80\beta$ (β : S 波速度)
アスペリティ面積 S_a [km ²]	$S_a=0.25S$
アスペリティ(大)面積 S_{a1} [km ²]	$S_{a1}=0.17S$
アスペリティ(小)面積 S_{a2} [km ²]	$S_{a2}=0.08S$
アスペリティくい違い量 D_a [cm]	$D_a=2.0D$
アスペリティ(大)くい違い量 D_{a1} [cm]	$D_{a1}=2.22D$
アスペリティ(小)くい違い量 D_{a2} [cm]	$D_{a2}=1.57D$
背景領域くい違い量 D_b [cm]	$D_b=0.67D$
アスペリティ応力降下量 σ_a [MPa]	$\sigma_a=16$
背景領域応力降下量 σ_b [MPa]	$\sigma_b=2$

3. 地震動の推定手法

(1) 統計的グリーン関数の作成

統計的グリーン関数法による地震動の合成は、従来、加速度振幅スペクトルの統計モデルと位相特性を用いて、小地震による地震動を人工的に作成し、これをグリーン関数とすることで行われてきた^{例えば、9)}。それに対して、本試案では、構造物の設計地震力が従来より加速度応答スペクトルで規定されることが多いということを考慮して、小地震の規模と震源距離から評価した加速度応答スペクトルにフィッティングさせた地震動を統計的グリーン関数として

用いることにした。

本試案で用いた加速度応答スペクトルの推定式は、K-net 観測点のうちI種地盤で得られた強震記録を用いて作成したものである。ここでは、地震のタイプ別の特性を反映するために、内陸地震と海溝型地震それぞれについて加速度応答スペクトルの推定式を作成した¹⁰⁾。

また、これらの推定式から得られる加速度応答スペクトルにフィッティングする時刻歴波形を作成するには、位相特性あるいは経時特性の情報が必要である。そのため、加速度応答スペクトルの推定式の作成に用いたものと同じ強震記録を用いて、Jennings型包絡形でモデル化した加速度波形の振幅包絡線の推定式を作成した¹⁰⁾。

(2) 地震動の重ね合わせ

地震動の重ね合わせには、Irikura¹¹⁾による断層の不均一な破壊を考慮した波形合成法を用いる。この合成法は次式のように表せる。

$$U(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij}(t) * c \cdot u_{ij}(t)$$

$$F_{ij}(t) = a_{ij} \delta(t - t_{ij}) + \frac{b_{ij}}{n'_{ij}} \sum_{k=1}^{(N-1)n'_{ij}} \delta\left[t - t_{ij} - \frac{(k-1)\tau_{ij}}{(N-1)n'_{ij}}\right]$$

(6)

ここで、添字 i, j は小断層 (i, j) に対応するパラメータを意味しており、 N は分割数、 $U(t)$ は大地震の合成地震動、 $u_{ij}(t)$ は小地震による地震動、 $F_{ij}(t)$ は大地震と小地震の震源時間関数の違いを補正するフィルター関数、 c は大地震と小地震の平均応力降下量の比、 t_{ij} は重ね合わせの際の時間遅れ、 τ_{ij} は立ち上がり時間を表している。また、 a_{ij} と b_{ij} は不均一な破壊を表現するためのパラメータで、次の3式によって定まる。

$$a_{ij} + b_{ij}(N-1) = \frac{D_{ij}}{D} N, \quad \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_{ij}^2 = N^2, \quad a_{ij} \propto \sigma_{ij}$$

(7)

ここで、 D_{ij} と σ_{ij} はそれぞれ小断層 (i, j) のくい違い量と応力降下量である。なお、大地震と小地震の地震モーメント M_o 、 M_{o_c} には次の関係が成り立つ。

$$M_{o_c} = \frac{M_o}{cN^3}$$

(8)

経験的グリーン関数法では、 M_o 、 M_{o_c} 、 c から N を定めることになるが、統計的グリーン関数法では予め適当な N を決定し、 M_o 、 c 、 N から式(8)を用いて M_{o_c} を求めるという手順になる。

4. まとめ

本稿は、断層モデルの設定及び地震動の合成に関

する現時点での知見をもとに、レベル2地震動の設定手法を試案として示したものである。上記の分野においては、いずれも現在精力的に研究が進められているところであり、必ずしも確立されていない部分も少なくない。本研究では、例えば、アスペリティの大きさや応力降下量の設定のように研究事例が少ないものについても、適宜判断を行った上で設定手法に取り入れた。今後、各種試算等を行い、設計地震動の設定手法として確立を図る予定である。

謝辞：本研究の実施に当たっては、土木研究所に設置された「レベル2地震動の設定手法に関する技術検討会（座長：大町達夫東京工業大学教授）」において、ご指導、ご助言を賜った。また、防災科学技術研究所による K-net 観測記録を使用した。ここに記して、深甚なる謝意を表する。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎・三宅弘恵 (2000)：強震動予測のための震源特性化の手続き，地震学会秋季大会予稿集。
- 2) Somerville, P. G. et al. (1999): Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Letters*, 70, 59-80.
- 3) Wald, D. J. (1996): Slip history of the 1995 Kobe, Japan, earthquake determined from strong motion, teleseismic, and geodetic data, *J. Phys. Earth*, 44, 489-503.
- 4) 釜江克宏・入倉孝次郎 (1997)：1995年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，500, 29-36.
- 5) 壇一男・他 (2001)：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集（投稿中）。
- 6) 佐藤良輔 (1989)：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会。
- 7) 金森博雄 (1991)：地震の物理，岩波書店。
- 8) Somerville, P. G. et al. (1998): Characterizing subduction earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *American Geophysical Union 1998 Fall Meeting*, F658.
- 9) 釜江克宏・他 (1991)：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測，日本建築学会構造系論文集，430, 1-9.
- 10) 佐藤智美・他 (2001)：K-net 強震記録を用いた加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討，第26回地震工学研究発表会講演論文集（掲載予定）。
- 11) Irikura, K. (1988): Estimation of near-field ground motion using empirical Green's function, *Proc. 9th World Conf. Earthq. Eng.*, VIII, 37-42.