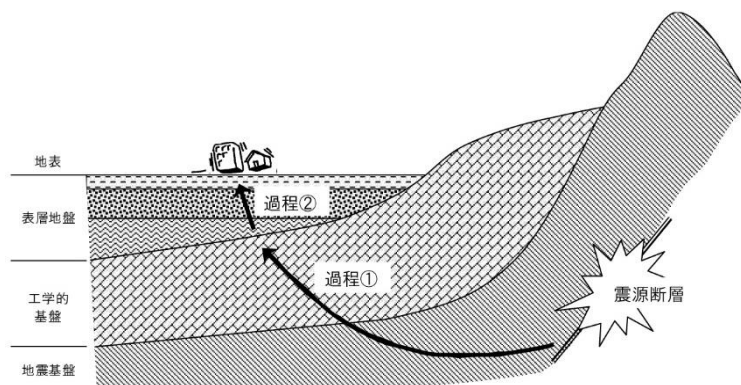


第Ⅱ章 ハザード予測手法の整理

1. 地震動の予測

地震被害想定 の根幹をなす部分として地震動の予測がある。各自治体の被害想定では、地表面での地震動強さを、下図に示す2つの過程（過程① 地震基盤＋工学的基盤、過程② 表層地盤）に分けて予測している場合が多い。それ以外に、地震基盤を設定することにより過程①を2段階で予測する方法もある。



図Ⅱ-1-1 地震基盤・工学的基盤・表層地盤を伝播する地震動の模式図(岩手県, 2004)

1-1. 工学的基盤面の地震動

予測手法としては、以下の3つに大別できる。

- (1) 震源断層の動的パラメータを考慮する手法
- (2) 距離減衰式を用いる手法
- (3) 上記2つの手法の結果を重ね合わせる手法

(1)は、震源断層を複数の小さな断層に分割し、断層破壊の伝播を模式的に行う考え方である。この考え方により、震源断層からの距離が同じであっても、断層の破壊様式にしたがって地震動の大きさが異なる現象を説明できる。ただ、活動していない断層に対し破壊の進行方向等の動的パラメータを決める点において、不確実性が大きいという問題点がある。手法としては、統計的グリーン関数やハイブリッド法を用いる手法が多く採用されている。

(2)は、地震観測記録の統計回帰分析に基づき導かれる距離減衰式を用いる手法である。(1)と比べると計算量が少なく適用が簡便なため、地震動推定の有効な手法として古くから多くの研究がなされている。ただ、実際の地震では震源域（震源断層）の中でも大きな地震エネルギーを放出する場所は限られており、地震動の大きさが距離に応じて一様に減衰するとは限らないため適用に課題もある。手法としては、司・翠川(1999)の手法が多く用いられている。

(3)は(1)と(2)の手法を両方試行し、各地点において大きい震度を採用する手法である。

(1) 震源断層の動的パラメータを考慮する手法

① 統計的グリーン関数法

○採用自治体：宮城県(04) 秋田県(13) 茨城県(18) 栃木県(15) 群馬県(12) 埼玉県(14) 神奈川県(15) 新潟県(21) 静岡県(13) 愛知県(14) 滋賀県(14) 島根県(18), 岡山県(14) 広島県(13) 山口県(14) 香川県(14) 愛媛県(13) 佐賀県(15) 長崎県(06) 宮崎県(20) 鹿児島県(14) 仙台市(02) 千葉市(17) 川崎市(13) 広島市(13)

統計的グリーン関数法は、人工的に作成した地震波を基にグリーン関数を求める手法である。 ω^{-2} 則を満たす中小地震を数値計算により人工的に作成し、これをグリーン関数として大地震の破壊過程に従って足し合わせ、大地震の波形を合成する。人工地震波の生成にあたっては、乱数から発生させた波形（ホワイト・ノイズ）が ω^{-2} 則を満たすように周波数領域での調整が行われる(Boore, 1983)。

中央防災会議(2001)では、以下の手順で波形を作成している(図II-1-1-1)。

- 1) 対象とする断層面を小断層に分割し、各小断層ごとに、Boore(1983)の手法により ω^{-2} 則を満たす振幅スペクトルの形状を求める。このスペクトル形状は以下のとおりである。

$$S_A(\omega) = \frac{R_{\phi\theta}}{4\pi\rho\beta^3} M_0 \cdot \frac{\omega^2}{1+(\omega/\omega_c)^2} \cdot \frac{1}{1+(\omega/\omega_{\max})^2} \cdot \frac{e^{-\omega R/2Q\beta}}{R} \quad (a)$$

ただし、 $\omega_c = 2\pi f_c$, $f_c = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma/M_0)^{1/3}$

$\omega_{\max} = 2\pi f_{\max}$, f_{\max} は高周波遮断周波数

- 2) (a)式中の R 、 ϕ 、 θ はラディエーション係数であるが、これは、各小断層から計算地点への方位角、射出角により計算する。この時、周波数依存型の放射特性を導入する。また、ここではS波のみを考えているため、SH波、SV波ごとに振幅スペクトルを求める。
- 3) 小断層ごとにすべり量が異なる場合は、それに応じて各小断層の M_0 、 $\Delta\sigma$ を設定する。
- 4) Q値は震源から計算地点までの伝播を考慮して評価する。
- 5) 以上は、振幅スペクトルについてのみ考えてきたが、ここで、Boore(1983)に従ってホワイトノイズに包絡形を施した波形のスペクトルをかけ合わせ、位相を与える。
- 6) 上記手法で作成した計算地点での地震基盤におけるスペクトルに対して、工学的基盤までの地盤構造による増幅を考慮するため、SH波については斜め入射のSH波動場を、SV波については、P-SV波動場の応答計算をHaskell Matrix(線形)で行う。
- 7) 求められた工学的基盤でのTransverse、Radial、UDの波形をNS、EW、UDに射影する。
- 8) 各小断層からの波形をIrikura(1986)および入倉ら(1997)に従って、それぞれの成分ごとに足し合わせる。これにより、工学的基盤での3成分波形を求める。なお、以上の作業は周波数領域で行う。

■中央防災会議の地震動データを用いる手法

○採用自治体：山梨県(05) 滋賀県(14) 奈良県(05) 和歌山県(14) 京都市(03) 岡山市(13)

- ・中央防災会議専門調査会では、東海、東南海、南海の各地震の発生状況別に1kmメッシュ別の広域の震度分布予測、液状化危険度予測を行い、地震動データを公開している。上記自治体では、基盤の地震動として加速度波形の公開データを用いている。

②理論地震動計算(三次元有限差分法)

○採用自治体：千葉県(16) 東京都(12) 神奈川県(15) 長野県(15) 鳥取県(18) 大分県(19) 札幌市(21) 横浜市(12) 京都市(03) 堺市(09) 熊本市(14)

理論地震動計算は、波動伝播の理論式を三次元有限差分法によって数値的に解くことにより地震波形を求める手法である。この手法を採用している自治体はすべて、③ハイブリッド法の中でこの手法を利用している。

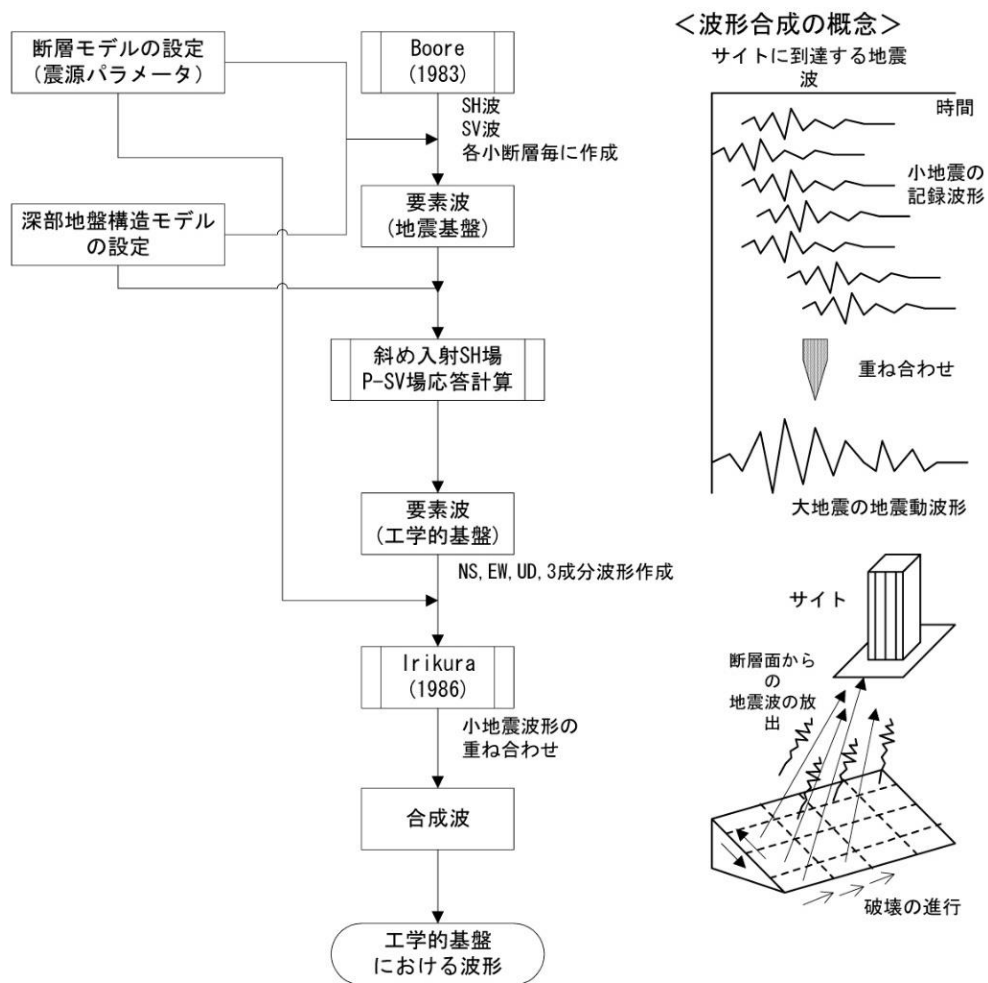


図 II-1-1-1 統計的グリーン関数法による工学的基盤の波形作成手順 (中央防災会議, 2001)

線形等方弾性体中 (linear isotropic elastic media) の三次元波動伝播は、以下の2組の方程式 (運動方程式, 応力-歪関係式) で表現される (Graves, 1996)。

連続体の運動方程式 :

$$\rho \partial_{tt} u_x = \partial_x \tau_{xx} + \partial_y \tau_{xy} + \partial_z \tau_{xz} + f_x$$

$$\rho \partial_{tt} u_y = \partial_x \tau_{xy} + \partial_y \tau_{yy} + \partial_z \tau_{yz} + f_y$$

$$\rho \partial_{tt} u_z = \partial_x \tau_{xz} + \partial_y \tau_{yz} + \partial_z \tau_{zz} + f_z$$

応力-歪関係式 :

$$\tau_{xx} = (\lambda + 2\mu) \partial_x u_x + \lambda (\partial_y u_y + \partial_z u_z)$$

$$\tau_{yy} = (\lambda + 2\mu) \partial_y u_y + \lambda (\partial_x u_x + \partial_z u_z)$$

$$\tau_{zz} = (\lambda + 2\mu) \partial_z u_z + \lambda (\partial_x u_x + \partial_y u_y)$$

$$\tau_{xy} = \mu (\partial_y u_x + \partial_x u_y)$$

$$\tau_{xz} = \mu (\partial_z u_x + \partial_x u_z)$$

$$\tau_{yz} = \mu (\partial_z u_y + \partial_y u_z)$$

ただし, u_x, u_y, u_z : 変位 (displacement) の x, y, z 成分

f_x, f_y, f_z : 体積力 (body-force) の x, y, z 成分

$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$: 応力 (stress) の独立な 6 成分

ρ : 密度 (density)

λ, μ : Lamé の定数

$\partial_x, \partial_y, \partial_z, \partial_{tt}$: 微分オペレータでそれぞれ $\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z, \partial^2/\partial t^2$ を意味する。

Graves (1996) では、スタッガード格子 (staggered-grid) を用いた三次元有限差分法を適用するた

め、変位と応力を変数とした方程式に変換した上で差分式を導き、地震動を数値計算する手法を提案している。

③ハイブリッド法

○採用自治体：千葉県(16) 東京都(12) 神奈川県(15) 長野県(15) 鳥取県(18) 大分県(19) 札幌市(21) 横浜市(12) 京都市(03) 堺市(09) 熊本市(14)

ハイブリッド法は、広い周期帯を対象とした強震予測手法で、ある特定の周期を境にして短周期帯域と長周期帯域の2つに分け、それぞれの帯域に対して地震動の時刻歴波形を計算し、最後にそれら2つの帯域波形を合成する手法である。

ハイブリッド法の採用自治体には、統計的グリーン関数法（短周期帯）と理論地震動計算（長周期帯）を組み合わせている自治体が多い。

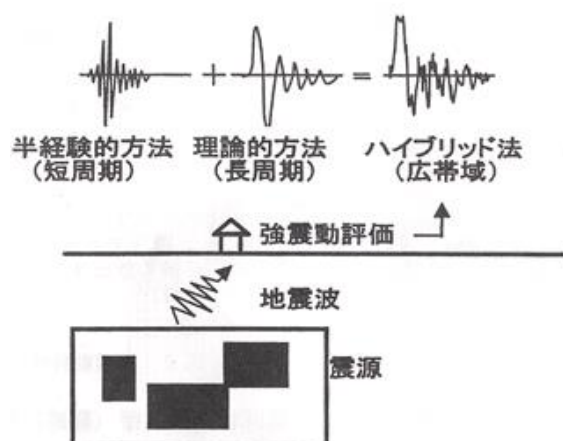


図 II-1-1-2 広域帯ハイブリッド法の模式図(佐藤, 2003)

(2) 距離減衰式を用いる手法

①司・翠川(1999)の手法

○採用自治体：青森県(16) 岩手県(04) 山形県(06) 茨城県(18) 千葉県(16) 福井県(12) 長野県(15) 鳥取県(18) 佐賀県(15) 長崎県(06) 沖縄県(14) さいたま市(14) 新潟市(15)

1968年から1997年までに日本で発生した21地震から得られた強震記録を用いて、最大加速度、最大速度の距離減衰式を作成している。震源特性の影響を評価するために、回帰モデルに震源深さと断層タイプの項を追加している。

$$\log_{10} A = b - \log_{10}(X + c) - kX \quad (\text{断層最短距離を用いる場合})$$

$$\log_{10} A = b - \log_{10} X_{eq} - kX_{eq} \quad (\text{等価震源距離を用いる場合})$$

$$b = aM_w + hD + d_i + e$$

$$c = 0.0055 \cdot 10^{0.50 \cdot M_w} \quad (\text{最大加速度を求める場合})$$

$$c = 0.0028 \cdot 10^{0.50 \cdot M_w} \quad (\text{最大速度を求める場合})$$

ただし、 A : 地震動の最大振幅値 (最大加速度(gal)、最大速度(cm/s))

X : 震源最短距離(km)

X_{eq} : 等価震源距離(km)

M_w : モーメントマグニチュード

D : 震源深さ(km)

a, h, e, k : 係数 (下表)

d_i : 断層タイプに関する係数 (下表)

表 II-1-1-1 距離減衰式にかかる係数(司・翠川, 1999)

	地震動	a	h	d_i			e	k
				地殻内地震	プレート間地震	プレート内地震		
断層最短距離	最大加速度	0.50	0.0043	0.00	0.01	0.22	0.61	0.003
	最大速度	0.58	0.0038	0.00	-0.02	0.12	-1.29	0.002
等価震源距離	最大加速度	0.50	0.0036	0.00	0.09	0.28	0.60	0.003
	最大速度	0.58	0.0031	0.00	0.06	0.16	-1.25	0.002

(3) 上記2つの手法の結果を重ね合わせる手法

①中央防災会議(2013)の手法

○採用自治体：愛知県(14) 京都府(17)

強震波形計算による手法(統計的グリーン関数法)と経験的手法(距離減衰式)の両方を試行し、各地点において大きい震度を採用する。

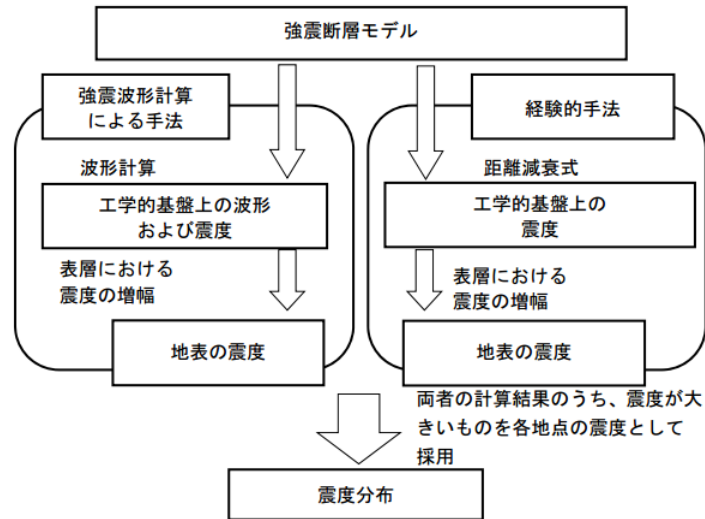


図 II-1-1-3 震度の予測フロー(中央防災会議, 2013)

1-2. 地表面の地震動

地表面における地震動の予測手法としては、

- (1) 応答解析を用いる手法
- (2) 表層地盤の増幅度を用いる手法

の2つに大別でき、これら2つを組み合わせた方法もある。

(1)の応答解析を用いる手法は、重複反射理論を基に計算する手法である。重複反射理論の最も基本的な手法である線形解析法は、1950～1960年代初頭に確立された(例えばHaskell(1960))ものである。この手法は、軟弱な地盤でゆれが増幅しやすい点を上手く再現し、入力地震動にかかわらず地盤の増幅特性が決められるという利点がある。しかし、非線形的な特徴を捉えることができず、軟弱な地盤を大きな地震動が襲った場合に地盤中にひずみが蓄積し、硬質な地盤よりもゆれが小さくなるような現象を表現することができない。

そこで、非線形的な振る舞いを評価する手法として、等価線形解析法や逐次非線形解析法が開発されてきた。等価線形解析法は、重複反射理論を基に土の非線形特性を等価な線形の関係に置き換えて非線形的な挙動を表現した方法であり、自治体の被害想定でよく用いられる。等価線形解析法を取り入れた代表的な手法としてはSHAKE(Schnabelほか, 1972)があるが、最近ではひずみの周波数依存を考慮した手法(例えば FDEL(杉戸ら, 1994))なども採用される傾向にある。一方、逐次非線形解析法はパラメータの設定等に課題があるため被害想定で用いられていなかったが、等価線形解析法と比較して大きな地震動にも適用できることなどから、最近では採用する自治体もある。

一部の自治体では、地震基盤上面から工学的基盤面については、線形重複反射理論で増幅特性を求め、表層地盤については、等価線形解析法で地盤の応答特性を求めている。この際には、深部地盤の減衰を示す係数 Q を過去の地盤探査結果から設定する必要がある。

(2)の表層地盤の増幅度を用いる手法は、工学的基盤の最大速度に微地形区分から想定される増幅率を掛け合わせて地表の最大速度を算出する中央防災会議の手法が代表的である。

(1) 応答解析を用いる手法

① 等価線形解析法の概要

○採用自治体：福島県(97) 群馬県(12) 千葉県(16) 神奈川県(15) 新潟県(21) 福井県(12) 山梨県(05) 長野県(15) 京都府(17) 奈良県(05) 鳥取県(18) 島根県(18) 岡山県(14) 広島県(13) 愛媛県(13) 福岡県(12) 大分県(19) 鹿児島県(14) 札幌市(21) 千葉市(17) 川崎市(13) 広島市(13) 熊本市(14)

一般に、土はせん断ひずみが増大するとせん断弾性定数は減少し、減衰定数は増大する。等価線形解析法による地盤応答計算では、以下のような手順で計算を行う。(図II-1-2-1)

- a) 応答計算に必要な土質パラメータを与え、解析モデルを作成する。この際、ひずみは微小であるとして、せん断弾性定数、減衰定数を求める。
- b) 与えられた入力地震波形を基に応答解析を行う。この際、各層のひずみの時系列変化を求める。
- c) せん断弾性定数および減衰定数のひずみ依存曲線を基に、応答計算で得られた最大ひずみの65%に対応する新しいせん断弾性定数を求める。
- d) 新しいせん断弾性定数および減衰定数によりモデルを修正。
- e) せん断弾性定数および減衰定数が収束するまでb)～d)を繰り返す。

② 逐次非線形解析法の概要

○採用自治体：静岡県(13) 滋賀県(14) 京都市(03) 堺市(09)

逐次非線形解析法は、材料の非線形特性を数学モデルや力学モデルで表現し、材料特性の変化を

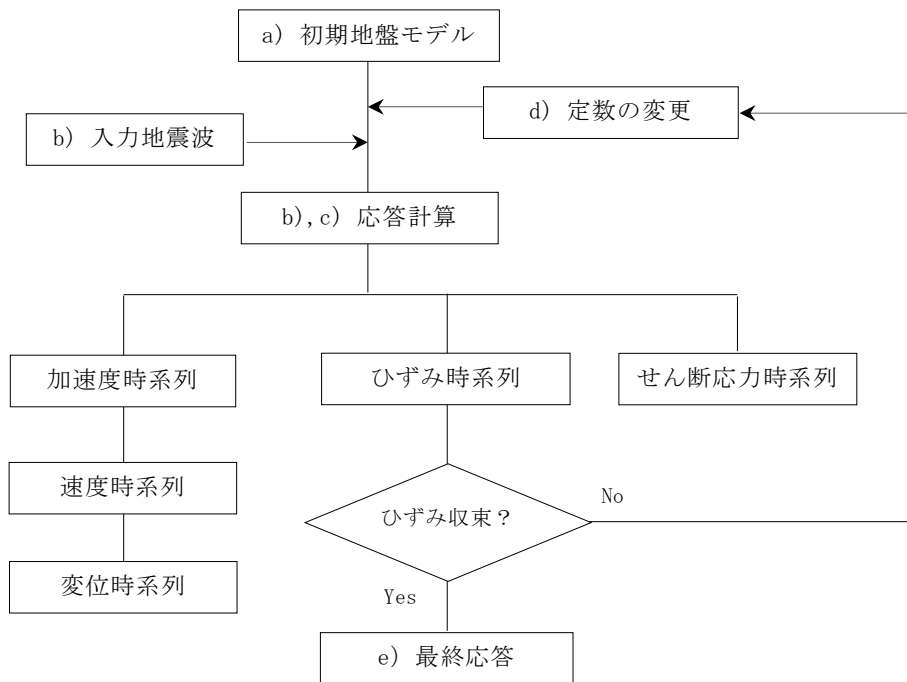


図 II-1-2-1 等価線形解析法による地盤応答計算の流れ

逐次計算しながら挙動を求めようとする方法である。等価線形解析法の適用範囲は、ひずみが 0.1～1%程度の地震動までであるのに対して、逐次非線形解析法ではひずみが1%を超える大きな地震動でも適用が可能であるとされている。その一方で、入力パラメータの設定や算出結果の解釈など、専門的な知識を持って解析に当たることが必要となる(防災科学技術研究所, 2003)。

③重複反射理論の概要

○採用自治体：埼玉県(14) 愛知県(14) 仙台市(02)

表のような水平成層地盤モデルを考える。

表 II-1-2-1 水平成層地盤モデル

変位	S波速度	剛性率	密度	層厚	層
u_1	V_1	μ_1	ρ_1	D_1	1
u_2	V_2	μ_2	ρ_2	D_2	2
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
u_m	V_m	μ_m	ρ_m	d_m	m
⋮	⋮	⋮		⋮	⋮
u_{n-1}	V_{n-1}	μ_{n-1}	ρ_{n-1}	d_{n-1}	n-1
u_n	V_n	μ_n	ρ_n	d_n	n

基盤面(第n層上端面)に入射するS波の振幅は、定数 u_i を使用して、

$$u_n = u_i \exp(i\omega t)$$

と表される。任意のm層における変位 u_m は、下降波 u'_m と上昇波 u''_m の和である。この時、m層の変位 u_m およびせん断応力 τ_m は、時間項 $\exp(i\omega t)$ を省略し、層上面からの深さを Z 、 $h_m = \omega/V_m$ とすれば、以下ようになる。

$$\begin{pmatrix} u_m \\ \tau_m \end{pmatrix}_Z = \begin{pmatrix} \cos(h_m Z) & -i \sin(h_m Z) \\ -h_m \mu_m \sin(h_m Z) & -i h_m \mu_m \cos(h_m Z) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u'_m + u''_m \\ u'_m - u''_m \end{pmatrix}$$

m層および (m-1) 層の境界面 (m-1) 面での変位・応力の連続条件から、

$$\begin{pmatrix} u_m \\ \tau_m \end{pmatrix}_{m\bar{面}} = a_m \cdot \begin{pmatrix} u_{m-1} \\ \tau_{m-1} \end{pmatrix}_{m-1\bar{面}}$$

$$a_m = \begin{pmatrix} \cos(h_m d_m) & (h_m \mu_m)^{-1} \sin(h_m d_m) \\ -h_m \mu_m \sin(h_m d_m) & \cos(h_m d_m) \end{pmatrix} : \text{層マトリクス}$$

この漸化式を順次適用することにより、地表での地震波の変位 u_0 および応力 τ_0 を求めることができる。地表では、

$$\begin{pmatrix} u_n \\ \tau_n \end{pmatrix}_{n-1\bar{面}} = a_{n-1} \cdot a_{n-2} \cdots a_2 \cdot a_1 \cdot \begin{pmatrix} u_0 \\ \tau_0 \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} u_0 \\ \tau_0 \end{pmatrix}$$

地表面での応力はゼロであり、入射波の振幅は $(u_n)_{n-1\bar{面}} = u_i$ なので、上式を展開して、

$$A_{11} \cdot u_0 = u_i + (u_n)_{n-1\bar{面}}$$

$$A_{21} \cdot u_0 = -i h_n \mu_n \left((u_n)_{n-1\bar{面}} - u_i \right)$$

以上から、周波数領域での地表と基盤入射との比（地盤の周波数伝達関数） $H(\omega)$ が求まる。

$$H(\omega) = \frac{2i h_n \mu_n}{A_{21} + i h_n \mu_n A_{11}}$$

内部減衰 Q を考慮するためには、同様の手続きにおいて、せん断弾性定数 μ を複素せん断弾性定数 $\mu(1 + i/Q)$ に置換する。

(2) 表層地盤の増幅度を用いる手法

① 中央防災会議(2001)の手法

○採用自治体：茨城県(18) 千葉県(16) 東京都(12) 長野県(15) 滋賀県(14) 山口県(14) 香川県(14) 長崎県(06) 宮崎県(20) 沖縄県(14) さいたま市(14) 横浜市(12) 新潟市(15)

中央防災会議(2001)では、想定東海地震について統計的グリーン関数法により各メッシュの工学的基盤上の波形を求め、これを入射波形として地震応答計算(SHAKE)を行った。そして、計算結果を基に地盤モデルの表層30mの平均S波速度(AVS30)と工学的基盤～地表の震度増分との関係式を以下のように求めた。

$$\Delta I = a - b \cdot \log AVS$$

ΔI : 工学的基盤～地表の震度増分 AVS : 表層30mの平均S波速度の推定値

a, b : 係数 (下表)

表 II-1-2-2 AVS30と震度増分の関係式の係数(横田ら, 2005)

基盤震度	a	b	基盤震度	a	b
3.0～3.9	2.943	1.034	5.0～5.4	2.715	0.954
4.0～4.4	2.916	1.026	5.5～5.9	2.494	0.876
4.5～4.9	2.888	1.015	6.0～6.4	2.434	0.855

② 松岡・翠川(1994)の手法

○採用自治体：青森県(16) 岩手県(04) 宮城県(04) 山形県(06) 長野県(15) 長崎県(06) 横浜市(12)

千葉県東方沖地震(1987)の強震記録から、最大加速度振幅に対する地盤増幅度 ARA および最大速度振幅に対する地盤増幅度 ARV と深さ30mまでの地盤平均S波速度 $AVS30$ (m/s)の関係を調査し、以下の式を求めた。

$$\log_{10} ARA = 1.35 - 0.47 \log_{10} AVS30 \pm 0.18$$

$$\log_{10} ARV = 1.83 - 0.66 \log_{10} AVS30 \pm 0.16$$

AVS30については、地形条件等から以下の式を提案した。

$$\log_{10} AVS30 = a + b \log_{10} h + c \log_{10} D \pm \sigma$$

h : 各メッシュの標高 (m)

D : 主要河川からの距離 (km)

σ : 標準偏差

a, b, c : 地形・地質条件により定められる値 (下表)

表 II-1-2-3 地形・地質別の係数 (松岡・翠川, 1994)

地形・地質	a	b	c	σ	データ数
埋立地	2.23	0	0	0.14	132
人工改変地	2.26	0	0	0.09	7
三角州, 後背湿地 ($D \leq 0.5$)	2.19	0	0	0.12	36
三角州, 後背湿地 ($D > 0.5$)	2.26	0	0.25	0.13	57
自然堤防	1.94	0.32	0	0.13	18
谷底平野	2.07	0.15	0	0.12	26
砂洲, 砂丘	2.29	0	0	0.13	13
扇状地	1.83	0.36	0	0.15	20
ローム台地	2.00	0.28	0	0.11	95
砂礫台地	1.76	0.36	0	0.12	12
丘陵	2.64	0	0	0.17	22
その他 (火山など)	2.25	0.13	0	0.16	10
第三紀以前	2.87	0	0	0.23	3

③地震調査研究推進本部 (2008) の手法

○採用自治体 : 北海道 (18) 秋田県 (13) 茨城県 (18) 佐賀県 (15) 岡山市 (13)

工学的地盤における最大速度の値に、微地形区分から想定される増幅率を掛け合わせることで地表の最大速度を算出する。微地形区分から想定される増幅率は以下の手順で評価する。

- 1) 全国を網羅した約1kmメッシュの微地形区分データ (例えば 若松ら (2005))、または、約250mメッシュの微地形区分データ (例えば、若松・松岡 (2007)) を用いる。
- 2) その区分に次式に示す標高と表層30mの平均S波速度 (AVS30) との経験的關係 (例えば 若松ら (2005)) をあてはめる。

$$\log AVS30 = a + b \log E_v + c \log S_p + d \log D_m \pm \sigma$$

$AVS30$: 表層30mの平均S波速度 (m/s) E_v : 標高 (m)

S_p : 傾斜*1000 (傾斜は正弦)

D_m : 先第三系・第三系の山地・丘陵からの距離 (km)

σ : 標準偏差 a, b, c, d : 微地形区分ごとに与えられる回帰係数

- 3) 工学的基盤から地表への最大速度の増幅率は、表層30mの平均S波速度 (AVS30) との相関性が認められる。そこで次式を用いて、AVS30から最大速度の増幅率を算出する (例えば 藤本・翠川 (2006))。

$$\log (amp) = 2.367 - 0.852 \log AVS30 \pm 0.166 \quad (100 < AVS30 < 1500)$$

amp : 平均S波速度600m/sの工学的基盤を基準とした最大速度増幅率

(3) 上記2つの手法の結果を重ね合わせる手法

○採用自治体：愛知県(14) 岡山县(14)

愛知県や岡山县は、地震応答解析による手法（詳細法）と地表面の増幅度を用いる手法（簡易法）を両方試行し、大きい方を採用している。

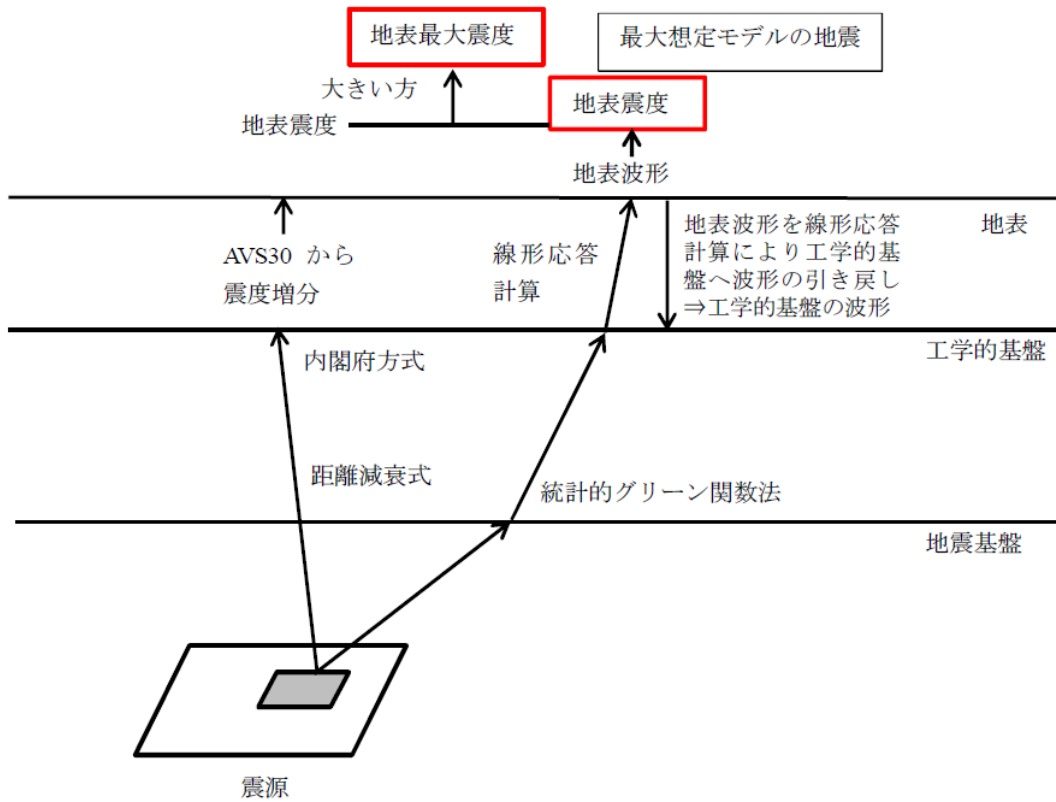


図 II-1-2-2 地震動予測の考え方(愛知県, 2014)

1-3. 震度(計測震度)の計算

多くの自治体では、1996年に改訂された気象庁の計算方法にしたがって震度を求めている。ただし、地震動の予測において最大加速度や最大速度のみを予測している自治体では、過去の地震から求められた経験式によって計測震度を求めている。

(1) 気象庁(1996)の手法

○採用自治体：秋田県(13) 新潟県(21) 福井県(12) 山梨県(05) 長野県(15) 滋賀県(14) 京都府(17) 奈良県(05) 広島県(13) 愛媛県(13) 福岡県(12) 広島市(13)

官報(1996.2.15, 気象庁告示第4号)に告示された計算方法にしたがって震度を計算する。

(2) 童・山崎(1996)の手法

○採用自治体：青森県(16) 宮城県(04) 神奈川県(15) 岡山県(14) 広島県(13) 沖縄県(14) さいたま市(14) 広島市(13)

過去の地震で記録された205地点での加速度時刻歴を用いて計測震度 I を計算し、最大加速度 PGA (gal)、最大速度 PGV (cm/s)との関係式を求めた。

$$I = 2.01 \log_{10}(PGV) + 2.30$$

$$I = 1.89 \log_{10}(PGA) + 0.59$$

(3) 翠川ら(1999)の手法

○採用自治体：岩手県(04) 茨城県(18),

地表最大速度 PGV (cm/s)と計測震度 I の関係式は以下のとおり。

$$I = 1.72 \log_{10}(PGV) + 2.68$$

(4) 藤本・翠川(2005)の手法

○採用自治体：北海道(18) 茨城県(18) 栃木県(15) 広島県(13) 佐賀県(15) 広島市(13)

近年発生した地震による強震記録を加え、高震度域へも適用できる計測震度を推定するための関係式を提案した。最大加速度 PGA (gal)及び最大速度 PGV (cm/s)と計測震度 I の関係式は以下のとおり。

$$I = 1.905 + 0.381 \cdot \log(PGA) + 0.384 \cdot \log(PGA)^2 \pm 0.379 \quad (I \geq 4)$$

$$I = 2.002 + 2.603 \cdot \log(PGV) - 0.213 \cdot \log(PGV)^2 \pm 0.344 \quad (I \geq 4)$$

2. 液状化危険度の予測

自治体の被害想定で採用されている液状化危険度の予測手法は、

- (1) 地盤データを用いる手法
- (2) 地形・地盤分類データを用いる手法

の2つに大別されるが、(1)を採用している自治体が非常に多い。

地盤データを用いる手法では、液状化指数（以下「 P_L 値」）を求め、次の基準に従いその地点の液状化危険度を判定している自治体が多い（ P_L 法）。

$P_L = 0$	… 液状化危険度はかなり低い
$0 < P_L \leq 5$	… 液状化危険度は低い
$5 < P_L \leq 15$	… 液状化危険度が高い
$15 < P_L$	… 液状化危険度が極めて高い

P_L 値は、ボーリングデータ等の地盤データから求められる深さごとの液状化安全率（以下「 F_L 値」）から計算される（ F_L 法）。この時、予測の対象となる地盤は最大で地表面から深度20mまでである。 F_L 値は、土層の液状化に対する安全率を意味する値で、次のように定義される。

$F_L > 1.0$	… その深さでの液状化の可能性が少ない
$F_L \leq 1.0$	… その深さでの液状化の可能性はある

2-1. 地盤データを用いる手法

(1) P_L 法（岩崎ら(1980)の手法）

○採用自治体：青森県(16) 宮城県(04) 秋田県(13) 福島県(98) 茨城県(18) 栃木県(15) 群馬県(12) 埼玉県(14) 東京都(12) 神奈川県(15) 新潟県(21) 富山県(18) 福井県(12) 山梨県(05) 長野県(15) 岐阜県(19) 静岡県(13) 愛知県(14) 滋賀県(14) 京都府(17) 奈良県(05) 和歌山県(14) 鳥取県(18) 島根県(18) 岡山県(14) 広島県(13) 山口県(14) 香川県(14) 愛媛県(13) 福岡県(12) 佐賀県(15) 長崎県(06) 大分県(19) 宮崎県(20) 鹿児島県(14) 沖縄県(14) 札幌市(21) 仙台市(02) さいたま市(14) 千葉市(17) 横浜市(12) 川崎市(13) 京都市(03) 堺市(09) 岡山市(13) 広島市(13)

F_L 値はある深度における液状化の発生の可能性を示した値であるが、地盤全体の液状化の発生可能性を評価するものではない。地盤全体の液状化の可能性を把握するには、各層の液状化の可能性を足し合わせる必要がある。そこで、岩崎ら(1980)は、 F_L 値の分布を深さ方向に重み付けして積分した値（ P_L 値）を定義し、地盤全体の液状化の可能性の指標とした。

$$P_L = \int_0^{20} F \cdot w(z) dz$$

$$F = \begin{cases} 1 - F_L & F_L < 1.0 \\ 0 & F_L \geq 1.0 \end{cases}$$

$$w(z) = 10 - 0.5 \cdot z \quad (z: \text{地表面からの深さ(m)})$$

$w(z)$ は深さに対する重み関数であり、浅い部分に対してより大きな重みを与えている。

(2) F_L 法

日本道路協会「道路橋示方書V 耐震設計編」の液状化検討手法は、土木分野における最も代表的な手法であり、多くの自治体で採用されている。

①日本道路協会(1996)の手法

○採用自治体：青森県(16) 宮城県(04) 秋田県(13) 茨城県(18) 栃木県(15) 群馬県(12) 埼玉県(14) 東京都(12) 神奈川県(15) 富山県(18) 福井県(12) 山梨県(05) 長野県(15) 岐阜県(19) 静岡県(13) 愛知県(14) 滋賀県(14) 京都府(17) 奈良県(05) 鳥取県(18) 島根県(18) 岡山県(14) 広島県(13) 山口県(14) 香川県(13) 愛媛県(13) 福岡県(12) 佐賀県(15) 長崎県(06) 大分県(19) 宮崎県(20) 鹿児島県(14) 沖縄県(14) 札幌市(21) 仙台市(02) さいたま市(14) 千葉市(17) 横浜市(12) 川崎市(13) 京都市(03) 堺市(09) 岡山市(13) 広島市(13)

日本道路協会(1996)は、兵庫県南部地震による液状化の発生状況をふまえて、日本道路協会(1990)から以下の点を改訂している。

- ・液状化評価の対象土層を沖積砂質土層のみから洪積、礫質土まで範囲を拡大
- ・ N 値の高い部分での強度の過小評価を解消

液状化判定の対象としては、以下の3つの条件を満たす地層としている。

- ・地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- ・細粒分含有率 F_C が35%以下の土層、または F_C が35%をこえても塑性係数 I_P が15以下の土層
- ・平均(50%)粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下の土層

ここで、地下水位は、基本的にはボーリングデータから求める。

地盤内の各点における F_L 値は地層が有する動的せん断強度比 R と地層に作用する地震時せん断応力比 L によって定義する。

$$F_L = R/L$$

地盤内の動的せん断応力比 L は地表最大加速度 α から、次式で表される。

$$L = (\alpha/g) \cdot (\sigma_v/\sigma'_v) \cdot \gamma_d$$

ただし、 α : 地表最大加速度 (gal) g : 重力加速度 (=980gal)
 σ_v : 全上載圧 (kgf/cm²) σ'_v : 有効上載圧 (kgf/cm²)
 γ_d : 低減係数 = $1.0 - 0.015z$ z : 地表面からの深さ (m)

地盤内での動的せん断強度比 R は地盤の繰り返し三軸強度比 R_L を用いて、以下の補正式で求める。

$$R = C_w \cdot R_L$$

ただし、 C_w の値は考慮する地震動の性質によって以下のように定められている。

- 1) タイプ I の地震動：発生頻度が低いプレート境界型の大地震による地震動
 大きな振幅が長時間繰り返して作用する。

$$C_w = 1.0$$

- 2) タイプ II の地震動：発生頻度が極めて低い、規模の大きい内陸直下型地震による地震動

$$C_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

繰り返し三軸強度比 R_L は、以下の式から経験的に定める。

$$R_L = \begin{cases} 0.0882\sqrt{N_a/1.7} & (N_a < 14) \\ 0.0882\sqrt{N_a/1.7} + 1.6 \times 10^{-6}(N_a - 14)^{4.5} & (14 \leq N_a) \end{cases}$$

ただし、埋め立て土の場合はこの式から0.05を減じる

N_a : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

砂質土の場合の補正 N 値 N_a は、

$$N_a = C_1 \cdot N_1 + C_2$$

$$C_1 = \begin{cases} 1.0 & (0\% \leq F_C < 10\%) \\ (F_C + 40)/50 & (10\% \leq F_C < 60\%) \\ F_C/20 - 1 & (60\% \leq F_C) \end{cases}$$

$$C_2 = \begin{cases} 0 & (0\% \leq F_C < 10\%) \\ (F_C - 10)/18 & (10\% \leq F_C) \end{cases}$$

F_C : 細粒分含有率(%)

であり、礫質土の場合は以下のとおり。

$$N_a = \{ 1 - 0.36 \cdot \log_{10}(D_{50}/2.0) \} \cdot N_1$$

ただし、 $N_1 (= 1.7N/(\sigma'_v + 0.7))$: 1 kgf/cm²の有効上載圧に対する基準化 N 値
 N : 標準貫入試験から得られる N 値
 D_{50} : 平均粒径 (mm)

②日本道路協会(2017)の手法

○採用自治体：新潟県(21) 札幌市(21)

以下の3つの条件を満たす地層を液状化判定の対象としている。

- ・地下水位が現地盤面から10m以内にあり、かつ現地盤面から20m以内の深さに存在する飽和土層
- ・細粒分含有率 F_C が35%以下の土層、または F_C が35%をこえても塑性係数 I_P が15以下の土層
- ・平均(50%)粒径 D_{50} が10mm以下で、かつ10%粒径 D_{10} が1mm以下の土層

地盤内の各深度における液状化に対する抵抗率 F_L 値は、地層が有する動的せん断強度比 R と作用する地震時せん断応力比 L により定義し、この値が1.0以下の土層は液状化するとみなした。

$$F_L = R / L$$

$$L = \gamma d \cdot \text{KhgL} \cdot (\sigma_v / \sigma'_v)$$

$\gamma d = 1.0 - 0.015x$: 地震時せん断応力比の深さ方向の低減係数

x : 地表面からの深さ (m)

KhgL : 液状化の判定に用いる地盤面の設計水平震度とされているが、ここではメッシュごとに求まっている地表最大加速度を重力加速度で割った値とする。

σ_v : 地表面からの深さ x (m) における全載圧 (kN/m²)

σ'_v : 地表面からの深さ x (m) における有効載圧 (kN/m²)

$$R = C_w \cdot RL$$

C_w : 地震時特性による補正係数

(プレート境界型地震の場合) $C_w = 1.0$

$$(内陸直下型地震の場合) \quad C_w = \begin{cases} 1.0 & (R_L \leq 0.1) \\ 3.3R_L + 0.67 & (0.1 < R_L \leq 0.4) \\ 2.0 & (0.4 < R_L) \end{cases}$$

RL : 繰り返し三軸強度比

$$RL = \begin{cases} 0.0082\sqrt{(0.85Na + 2.1)/1.7} (0.4 < R_L)(Na < 14) \\ 0.0082\sqrt{Na/1.7} + 1.6 \times 10^{-6} \cdot (Na - 14)^{4.5} (Na \geq 14) \end{cases}$$

Na : 粒度の影響を考慮した補正 N 値

(砂質土 ($D_{50} < 2\text{mm}$) の場合)

$$Na = C_{FC} \cdot (N_1 + 2.47) - 2.47$$

$$N_1 = 170N / (\sigma_{vb}' + 70)$$

$$C_{FC} = \begin{cases} 1.0 & (0\% \leq F_c < 10\%) \\ (F_c + 20) / 30 & (10\% \leq F_c < 40\%) \\ (F_c - 16) / 12 & (40\% \leq F_c) \end{cases}$$

(礫質土 ($D_{50} \leq 2\text{mm}$) の場合)

$$Na = (1 - 0.36 \log_{10} (D_{50} / 2)) \cdot N_1$$

N : 標準貫入試験から得られる N 値

N₁ : 有効上載圧 100kN/m² 相当に換算した N 値

F_c : 細粒分含有率 (%)

σ_{vb}' : 標準貫入試験を行ったときの地表面からの深さにおける有効上載圧 (kN/m²)

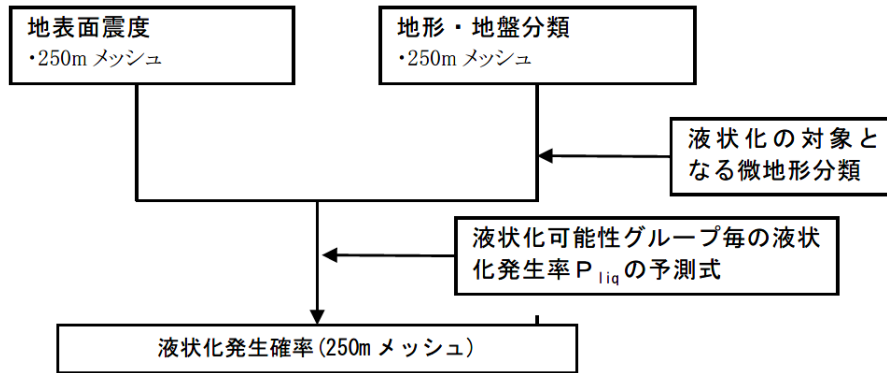
C_{FC} : 細粒分含有率による N 値の補正係数

2-2. 地形・地盤分類データを用いる手法

(1) 松岡・若松・橋本(2011)の手法

○採用自治体：北海道(18) 青森県(16)

松岡・若松・橋本は250mメッシュ地形・地盤分類データから液状化危険度を推定する手法を提案した。これは鳥取県中部地震(2000)～岩手宮城内陸地震(2008)の9地震の液状化発生状況に基づく。以下に北海道(2018)の説明を抜粋する。



図Ⅱ-2-2-1 液状化危険度の算定の流れ(北海道, 2018)

①液状化の対象となる地形・地盤分類

液状化発生確率の判定対象とする地形・地盤分類は、発生確率の非常に低い山地・台地(group5)を除いた250mメッシュ(group1～4)とする。

表Ⅱ-2-2-1 グループと地形・地盤分類(北海道, 2018)

グループ	微地形分類					
group1	NTL 自然堤防	LSD 砂丘末端緩斜面	LDB 砂丘間低地	ARC 旧河道	REC 干拓地	FLL 埋立地
group2	ALF 扇状地 (>=1/100)	AFS 扇状地 (<1/100)	BAR 砂州・砂礫州			
group3	BKM 後背湿地	DEL 三角州・海岸低地	DUN 砂丘			
group4	VBP 谷底低地 (>=1/100)	VPS 谷底低地 (<1/100)	GVT 砂礫質台地			
group5	上記以外					

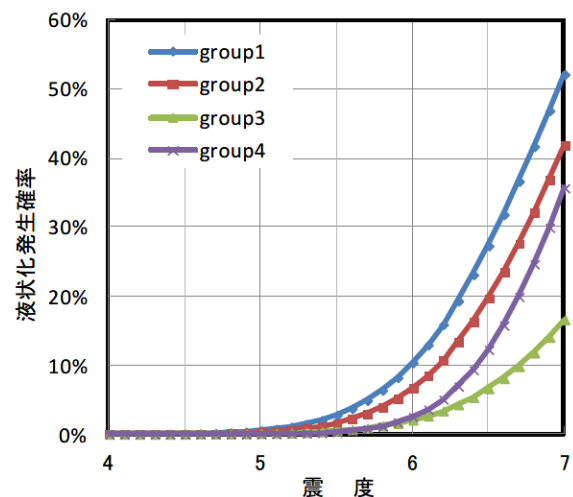
②液状化可能性グループごとの液状化発生確率の予測

液状化発生率 P_{liq} の予測式は次のとおり。

$$P_{liq}(I) = \Phi\left[\frac{I - \mu}{\sigma}\right] \quad \mu \text{ 平均値} \quad \sigma \text{ 標準偏差}$$

group1 $\mu=6.96$ $\sigma=0.761$ group2 $\mu=7.16$ $\sigma=0.773$

group3 $\mu=7.906$ $\sigma=0.933$ group4 $\mu=7.231$ $\sigma=0.628$

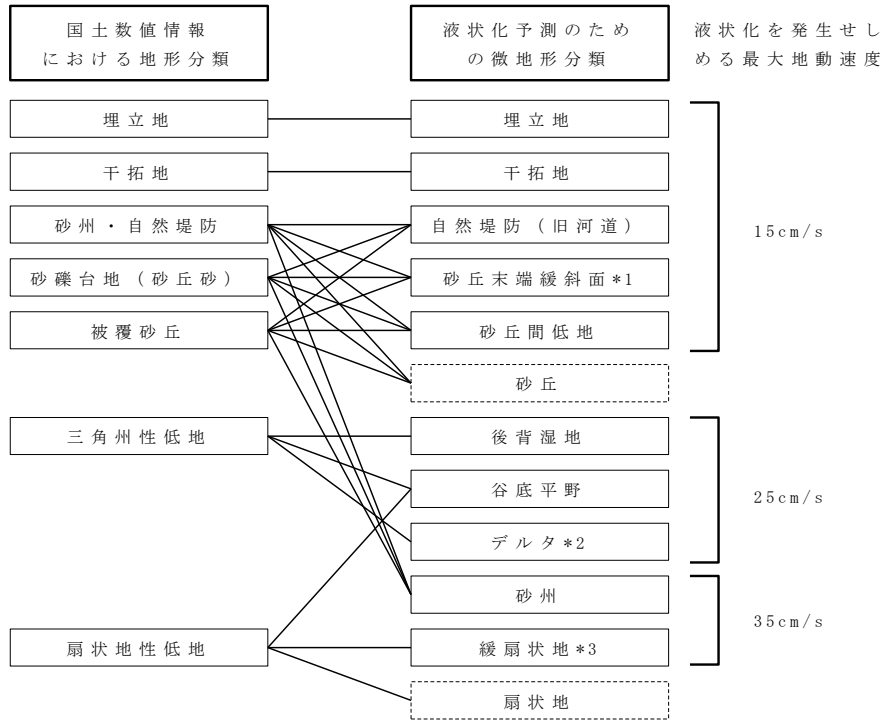


図Ⅱ-2-2-2 震度と液状化発生確率との関係(北海道, 2018)

(2) 松岡ら(1993)の手法

○採用自治体：岩手県(04) 山形県(06)

松岡ら(1993)は、微地形分類と地表最大速度から液状化危険度を評価する手法を提案した。この手法による千葉県東方沖地震(1987)時の液状化危険度の分布再現結果と、実際の液状化発生地点が比較的良好に対応していることが確認されている。



- *1 砂丘と低地部との境界付近であり、砂丘縁辺部を含む
- *2 デルタ地帯と呼ばれる地形分類のうち、埋立地、干拓地などを除いた狭義のデルタを指す
- *3 扇頂から扇端までの平均縦断勾配が10/1000程度以下の扇状地を指す

図 II-2-2-3 国土数値情報の地形分類と液状化予測のための微地形分類との対応(松岡ら, 1993)

表 II-2-2-2 液状化危険度の評価基準(松岡ら, 1993)

液状化危険度	地表最大速度
	液状化が発生せしめる最大地動速度
高い	1.25以上
やや高い	1.00~1.25
低い	0.75~1.00

2-3. 液状化に伴う地盤沈下量の予測

○採用自治体：青森県(16) 秋田県(13) 茨城県(18) 千葉県(16) 長野県(15) 愛知県(14) 広島県(13) 山口県(14) 香川県(14) 千葉市(17) 広島市(13)

東北地方太平洋沖地震の後、地盤沈下量をパラメータとして液状化による建物被害を予測する自治体が出てきている。ここでは、地盤沈下量の予測手法について、秋田県(2013)の説明を抜粋する。

液状化に伴う地盤沈下量は、「建築基礎構造設計指針」(日本建築学会, 2001)に示されている補正N値と繰返しせん断ひずみ γ_{cy} の関係をを用いて、補正N値と応力比のプロット点に対応する繰返しせん断ひずみを、隣接する γ_{cy} 曲線の対数補間により求める。

【補正N値 (Na) の算出方法】

$$N_a = N_l + \Delta N_f$$

$$N_l = C_N \times N$$

$$C_N = \sqrt{98/\sigma'_z}$$

N_a : 補正N値

N_l : 換算N値

ΔN_f : 細粒分含有率に応じた補正N値の増分 (右図)

C_N : 換算N値係数

σ'_z : 検討深さにおける有効土被り圧 (kN/m²)

N : 実測N値

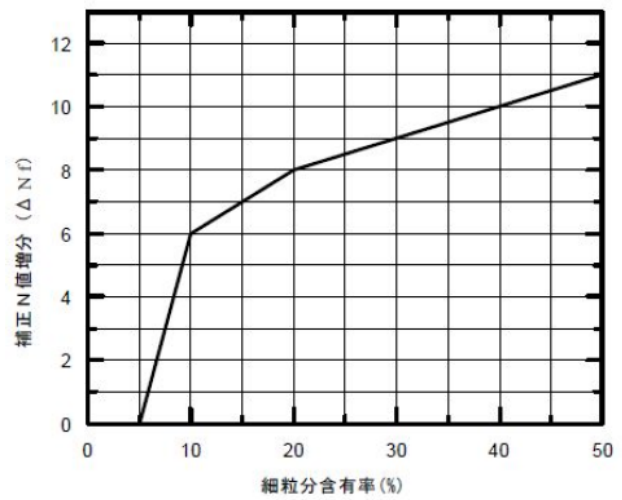


図 II-2-3-1 細粒分含有率 (Fc) と補正N値増分 (ΔNf) の関係(秋田県, 2013)

【沈下量の算出方法】

繰返しせん断ひずみ γ_{cy} を下記グラフから読み取る際、繰返しせん断ひずみ8%の曲線より左側にプロットされる場合には $\gamma_{cy}=8\%$ とし、0.5%より右側にプロットされる場合には $\gamma_{cy}=0.5\%$ とする。繰返しせん断ひずみ γ_{cy} を体積ひずみ ε_v として読み替える。そして、沈下量 S を次のようにして推定した。

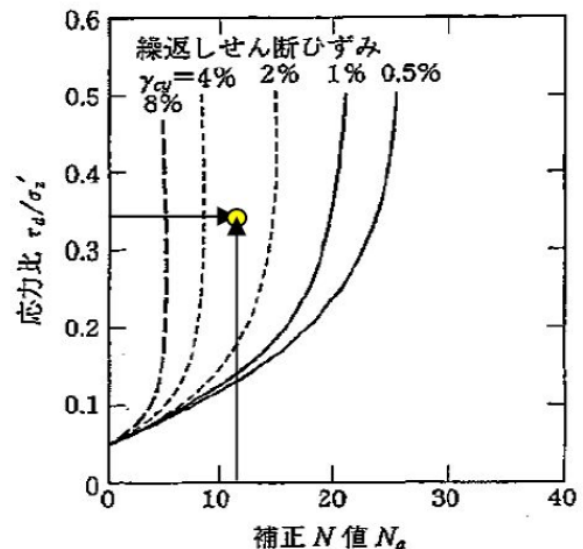
$$S = \sum_{i=0}^n (H_i \times \varepsilon_{vi})$$

ここに、 S : 沈下量

H_i : $F_L < 1.0$ となる土層 i の層厚

ε_{vi} : $F_L < 1.0$ となる土層 i の体積ひずみ

n : $F_L < 1.0$ となる土層数



※本検討では、図中の縦軸「応力比 τ_d/σ'_z 」に「地震のせん断応力比 L 」を適用する。

図 II-2-3-2 補正N値と繰返しせん断ひずみの関係(秋田県, 2013)

(出典：建築基礎構造設計指針, 2001, 日本建築学会)

3. 地盤崩壊危険性の予測

本節では、斜面崩壊危険度と宅地造成地の被災危険度の予測手法について整理する。

3-1. 斜面崩壊危険度

地震時の斜面の崩壊危険性の評価対象には、急傾斜地崩壊危険箇所、土石流危険渓流、地すべり危険箇所などがあるが、ここでは、急傾斜地崩壊危険箇所の予測手法を中心に整理する。

(1) 急傾斜地震災対策危険度判定に基づく評価

○採用自治体：青森県(16) 秋田県(13) 栃木県(14) 茨城県(18) 神奈川県(15) 福井県(12) 長野県(15) 静岡県(13) 愛知県(14) 大阪府(13) 鳥取県(18) 島根県(18) 岡山県(14) 広島県(13) 山口県(14) 佐賀県(15) 長崎県(06) 熊本県(13) 大分県(19) 宮崎県(20) 札幌市(21) さいたま市(14) 広島市(13) 熊本市(14)

既往の地震による斜面崩壊事例を統計的に調査した結果にもとづき、急傾斜地震災対策危険度判定基準が作成され、各急傾斜地の危険度判定が行われている。各自治体では、この判定結果を参考に地震力の大きさの違いを考慮した評価基準を設定している。

急傾斜地震災対策危険度判定基準は、「素因要素」「管理要素」「参考要素」から構成されるが、自治体の被害想定で使われるのは、「素因要素」と「管理要素」（あるいは「素因要素」のみ）である。

表Ⅱ-3-1-1 急傾斜地震災対策危険度判定基準(秋田県, 2013)
(素因要素)

項目	小項目名	点数
①斜面高(H)m	H < 10	3
	10 ≤ H < 30	7
	30 ≤ H < 50	8
	50 ≤ H	10
②斜面勾配(α)	α < 1:1.0	1
	1:1.0 ≤ α < 1:0.6	4
	1:0.6 ≤ α	7
③オーバーハング	構造物のない斜面のオーバーハング	7
	構造物のある斜面のオーバーハング	4
	なし	0
④斜面の地盤	斜面の表面に転石・浮石が多い	10
	切土法面に玉石が多い	7
	風化変質・亀裂の発達した岩	6
	礫混じり土砂	5
	風化変質した岩	4
	亀裂の発達した岩	4
	土砂	4
	粘質土	1
亀裂の発達していない岩	0	
⑤表土の厚さ	0.5m以上	3
	0.5m未満	0
⑥湧水	有	2
	無	0
⑦落石・崩壊頻度	年1回以上	5
	年1回未満	3
	なし	0
合計		

表Ⅱ-3-1-1 急傾斜地震災害対策危険度判定基準(秋田県, 2013) (つづき)
(管理要素)

項目	小項目名	点数	備考
⑧斜面の異常・変状	あり	a	
	なし	c	
⑨斜面安定工の異常・変状	あり	a	
	なし	c	
⑩家屋等に被害を与えた落石、崩壊	あり	a	
	なし	c	
⑪斜面上の有害行為	顕著である	a	
	若干みられる	b	
	なし	c	
⑫斜面安定工による斜面の安定度	やや低い	a	
	普通	b	
	高い	c	

表Ⅱ-3-1-2 斜面崩壊危険度判定基準(秋田県, 2013)

素因要素7項目の合計		13点以下	14～23点	24点以上
管理要素 ⑧～⑫	aが1つ以上	(A)	(A)	(A)
	bが1つあとはc	(B)	(A)	(A)
	全部がc	(C)	(B)	(A)

(A)、(B)、(C)は、表Ⅱ-3-1-4以降の(A)、(B)、(C)に対応

①東京都(2006)の手法

○採用自治体: 福井県(12) 大阪府(13) 鳥取県(18) 岡山県(14) 佐賀県(15) 熊本県(13) 宮崎県(20) さいたま市(14) 岡山市(13) 熊本市(14)

宮城県(1997)の手法を東京都の斜面データに合わせて作成し、素因要素7項目の合計点と想定震度の関係から判定している。

表Ⅱ-3-1-3 急傾斜地震災害対策危険度判定基準(東京都, 2006)

大項目	小項目		
	データ項目	点数	
①斜面高(H)m	・斜面の高さ	$50 \leq H$	10
		$30 \leq H < 50$	8
		$10 \leq H < 30$	7
		$H < 10$	3
②斜面勾配(α)	・傾斜度	$59^\circ \leq \alpha$	7
		$45^\circ \leq \alpha < 59^\circ$	4
		$\alpha < 45^\circ$	1
③オーバーハング	・地表の状況	オーバーハングあり	4
		オーバーハングなし	0
④斜面の地盤	・地表の状況	亀裂が発達、開口しており転石、浮石が点在する	10
		風化、亀裂が発達した岩である	6
		礫混じり土、砂質土	5
		粘質土	1
		風化、亀裂が発達していない岩である	0
⑤表土の厚さ	・表土の厚さ	0.5m以上	3
		0.5m未満	0
⑥湧水	・湧水	有	2
		無	0
⑦落石・崩壊頻度	・崩壊履歴	新しい崩壊地がある	5
		古い崩壊地がある	3
		崩壊地は認められない	0

表Ⅱ-3-1-4 震度による危険度ランク判定基準(東京都, 2006)

震度	基準要素点	13点以下	14~23点	24点以上
6強以上		A	A	A
6弱		B	A	A
5強		C	B	A
5弱		C	C	B
4		C	C	C

出所：宮城県急傾斜地崩壊危険箇所カルテを用いた地震時斜面危険度予測方式(昭和62年、宮城県)
 ※点数と危険度ランクの関係は、道路震災対策委員会(昭和61年)による法面・斜面耐震判定方法に基づく

②中央防災会議(2006)の手法

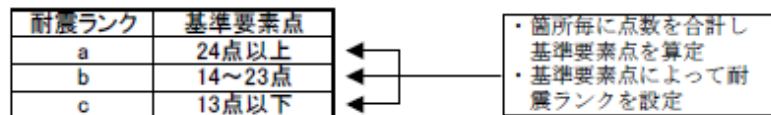
○採用自治体：茨城県(18) 栃木県(14) 京都府(17) 広島県(13) 山口県(14) 広島市(13)

「急傾斜地崩壊危険箇所調査」(2002年度公表)を地形地質状況をもとに点数付けし、その合計点数(基準要素点)に応じて耐震ランクを設定している。

表Ⅱ-3-1-5 耐震ランクの設定手法(広島県, 2007)

大項目	小項目		点数
	データ項目		
①斜面高(H)m	斜面の高さ	$50 \leq H$	10
		$30 \leq H < 50$	8
		$10 \leq H < 30$	7
		$H < 10$	3
②斜面勾配(α)	傾斜度	$59^\circ \leq \alpha$	7
		$30^\circ (45^\circ) \leq \alpha < 59^\circ$	4
		$\alpha < 30^\circ (45^\circ)$	1
③オーバーハング	横断形状	オーバーハングあり	4
		オーバーハングなし	0
④斜面の地盤	地表の状況	亀裂が発達、開口しており転石、浮石が点在する	10
		風化、亀裂が発達した岩である	6
		礫混じり土、砂質土	5
		粘性土	1
		風化、亀裂が発達していない岩である	0
⑤表土の厚さ	表土の厚さ	0.5m以上	3
		0.5m未満	0
⑥湧水	湧水	有	4(2)
		無	0
⑦落石・崩壊頻度	崩壊履歴	新しい崩壊地がある	5
		古い崩壊地がある	3
		崩壊地は認められない	0

※()内の数値は中央防災会議(2006)で使用された値



表Ⅱ-3-1-6 危険度ランク判定テーブル(広島県, 2007)

震度	耐震ランク	a	b	c
6強以上		A	A	B(A)
6弱		A	B(A)	B
5強		B(A)	B	C
5弱		B	C	C
4		C	C	C

A：発生する可能性が高い
 B：発生する可能性がある
 C：発生する可能性は低い
 (注) ()内は中央防災会議(2006)で使用された値

③宮城県(1997)の手法

○採用自治体：神奈川県(15) 長野県(15) 静岡県(13) 愛知県(14) 島根県(18)

素因要素(表Ⅱ-3-1-1) 7項目の合計点と想定震度の関係から判定している。

表Ⅱ-3-1-7 震度による判定ランクの振り分け(宮城県, 1997)

震度\基準要素点	13点以下	14~23点	24点以上
6強~7	A	A	A
6弱	B	A	A
5強		B	
5弱	C	C	B
4			C

A：落石・崩壊の可能性が高い
 B：可能性あり
 C：可能性が低い

④大分県(2007)の手法

○採用自治体：青森県(16) 富山県(18) 長崎県(06) 大分県(19)

急傾斜地地震対策危険度判定基準および計測震度を加味した判定ランクを示している。

表Ⅱ-3-1-8 急傾斜地地震対策危険度判定基準(大分県, 2019)

項目	小項目名	点数	備考
①斜面高(H)m	H<10	3	
	10≤H<30	7	
	30≤H<50	8	
	50≤H	10	
②斜面勾配(α)	α<1:1.0	1	
	1:1.0≤α<1:0.6	4	
	1:0.6≤α	7	
③オーバーハング*	構造物のない斜面のオーバーハング*	7	岩の斜面などで一見してオーバーハングと見られるもの
	構造物のある斜面のオーバーハング*	4	
	なし	0	
④斜面の地盤	斜面の表面に転石・浮石が多い	10	上位のものを用いる。例えば、土砂で表面に転石・浮石が多いものは10点とする。
	切土法面に玉石が多い	7	
	風化変質・亀裂の発達した岩	6	
	礫混じり土砂	5	
	風化変質した岩	4	
	亀裂の発達した岩	4	
	土砂	4	
	粘質土	1	
亀裂の発達していない岩	0		
⑤表土の厚さ	0.5m以上	3	表土とは表面の腐植土・表土有機質を指す。但し、表土下に非常にルーズな崩石があれば、それも含める。
	0.5m未満	0	
⑥湧水	有	2	常時見られる湧水を指す。
	無	0	
⑦落石・崩壊頻度	年1回以上	5	道路交通または道路構造物に損傷を与えない程度の軽微な落石・法崩れ等を指す。
	年1回未満	3	
	なし	0	
合計			

表Ⅱ-3-1-9 急傾斜地地盤危険箇所における耐震性危険度判定ランク(大分県, 2019)

耐震性危険度ランク	a	b	c
評価点	24点以上	14~23点	13点以下

表Ⅱ-3-1-10 急傾斜地地盤危険箇所における地震時危険度判定ランク(大分県, 2019)

耐震性危険度ランク	計測震度別危険度ランク			
	～5弱	5強	6弱	6強～
a	C	B	A	A
b	C	C	B	A
c	C	C	B	B

ランクA：地震による崩壊の危険が高い(50%が崩壊の可能性ある)
 ランクB：地震による崩壊の可能性ある(10%が崩壊の可能性ある)
 ランクC：地震による崩壊の可能性はほとんどない

⑤川崎市(2010)の手法

○採用自治体:横浜市(12) 川崎市(13)

素因要素(表Ⅱ-3-1-1) 7項目の合計点から定めた斜面の危険度ランクと想定震度の関係から判定している。

表Ⅱ-3-1-11 急傾斜地の斜面及び震度による危険度ランク判定基準(川崎市, 2010)

斜面 震度	斜面の危険度ランク		
	a 24点以上	b 14～23点	c 13点以下
震度6強以上	A	A	A
震度6弱	A	A	B
震度5強	A	B	C
震度5弱	B	C	C

ランクA：相対的に危険が高い
 ランクB：相対的に危険と考えられる
 ランクC：相対的に危険性が低い
 斜面对策工が概成している場合はランクCとする

○横浜市(12)では、川崎市の判定表をもとに、震度4.5未満を追加している(全てランクC)。

⑥千葉県(2008)の手法

○採用自治体：千葉県(16) 東京都(12)

地震時の崖崩れ等の被災危険性を、降雨による危険度判定結果に地震動による影響を加えて評価している。

表Ⅱ-3-1-12 急傾斜地の危険性評価(千葉県, 2008)

斜面の危険度 ランク 計測震度	斜面の危険度ランク		
	3 = (C)	2 = (B)	1 = (A)
6.0以上	A	A	A
5.5以上6.0未満	B	A	A
5.0以上5.5未満	C	B	A
4.5以上5.0未満	C	C	B
4.5未満	C	C	C

<地震時ランクの説明>
 ランクA：危険性が高い
 ランクB：危険性がある
 ランクC：危険性が低い
 対策工が既成の場合は地震時ランクCとする

(2) 日本道路協会 道路震災対策委員会(1986)の手法

○採用自治体：北海道(18) 宮城県(04) 群馬県(12) 埼玉県(14) 新潟県(21) 愛媛県(13) 鹿児島県(14) 沖縄県(14) 千葉市(17)

日本道路協会 道路震災対策委員会(1986)による法面・斜面耐震判定方法をもとに、各自治体の斜面の特徴を考慮した急傾斜地崩壊危険箇所の地震時崩壊危険度評価を行っている。

下表の7項目の採点基準を定め、合計点数と想定震度の関係から崩壊危険度を判定している。

表Ⅱ-3-1-13 斜面崩壊危険度判定基準（一次判定）（北海道, 2018）

項目	小項目名	点数	
斜面高	50m以上	10	
	30～50m	8	
	10～30m	7	
	10m未満	3	
斜面勾配	60° 以上	7	
	45° ～60°	4	
	45° 未満	1	
オーバーハング 遷急線 縦断形状	オーバーハングあり 遷急線が非常に明瞭	7	
	遷急線が明瞭 凸型斜面	4	
	遷急線は不明瞭 直線型、凹型斜面	0	
地表の状態	亀裂が発達、開口しており、転石・浮石が点在する	10	
	風化、亀裂が発達した岩である	6	
	礫混じり砂、砂質土	5	
	粘性土	1	
	風化、亀裂が発達していない岩	0	
表土の厚さ	0.5m以上	3	
	0.5m未満	0	
湧水	有	2	
	無	1	
崩壊履歴	当該斜面に新しい崩壊地あり	5	
	当該斜面に古い崩壊地あり	3	
	崩壊地は認められない	0	
第一次判定ランク			
合計点数		24以上	a
		14～23	b
		13以下	c

表Ⅱ-3-1-14 斜面崩壊危険度判定基準（二次判定）（北海道, 2018）

二次判定	一次判定ランク		
	a	b	c
対策工なし、未完成	a'	b'	c'
対策工既成	c'	c'	c'

表Ⅱ-3-1-15 地震時の斜面崩壊危険度判定ランク（北海道, 2018）

第二次判定ランク	震度階級				
	～4	5弱	5強	6弱	6強～
a'	C	B	A		
b'	C		B	A	
c'	C			B	

A：危険度が高い、
B：危険度がやや高い、
C：危険度は低い

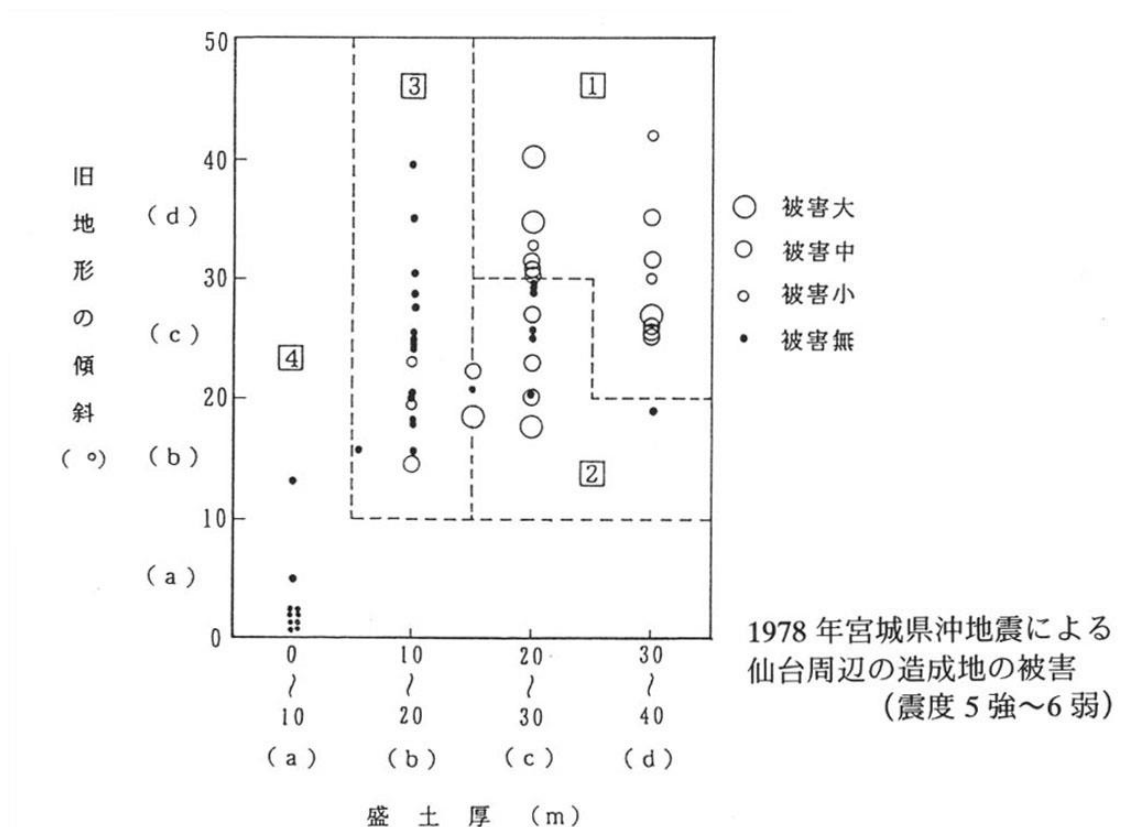
3-2. 宅地造成地の被災危険度

宮城県沖地震において仙台市の宅地造成地に大規模な被害が発生し、造成地の地震被害への関心が高まった。兵庫県南部地震でも、神戸市灘区から兵庫区の六甲山麓の宅地造成地で被害が発生している。被害としては、造成地の盛土部分や盛土と切土の境界で発生しやすく、旧地形の傾斜が大きいほど被害が大きいといわれている。

(1) 宮城県(2004)の手法

○採用自治体：宮城県(04) 秋田県(13)

面積10ha以上の大規模宅地造成地を想定対象とし、旧地形の傾斜度、盛土厚、震度により被害を予測している。



図Ⅱ-3-2-1 旧地形の傾斜、盛土厚と家屋の被害率の関係(宮城県, 2004)

表Ⅱ-3-2-1 造成地被害の判定基準(宮城県, 2004)

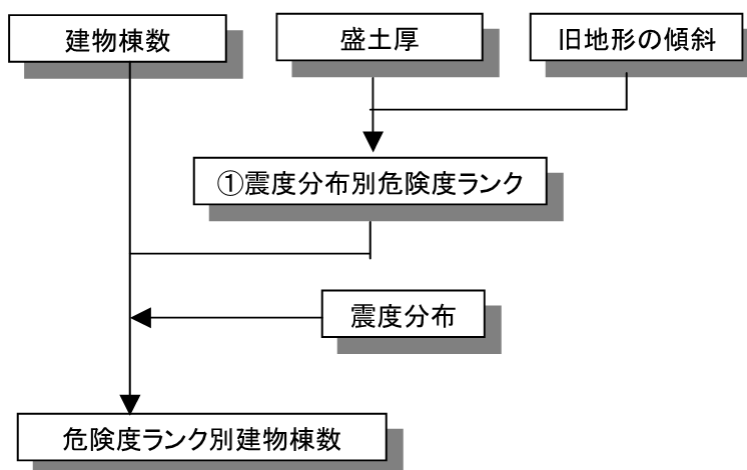
分類	震 度				
	～4弱	4強～5弱	5強	6弱	6強～7
1	C	B	A		
2	C		B	A	
3	C			B	A
4	C				B

(注) □内の数字は図Ⅱ-3-2-1と対応。

表Ⅱ-3-2-2 被害のおよその内容(宮城県, 2004)

判定	家屋	地下埋設物	地盤
A	倒壊する家屋あり	被害あり	崩壊、亀裂などがみられる
B	倒壊する家屋のする可能性あり	被害の可能性あり	小亀裂、小崩壊などの可能性あり
C	被害の可能性小	被害の可能性小	被害の可能性小

○中央防災会議(2006)では、下図のフローにしたがい、地震時に危険と判断される宅地造成地上にどれくらいの建物があるか(危険度ランク別建物棟数)を評価している。
宅地造成地の危険度ランクの評価方法は宮城県(2004)の手法とほぼ同じである。



図Ⅱ-3-2-2 評価フロー(中央防災会議, 2006)

4. 津波の予測

津波の予測は、概ね下図のフローに沿った形で行われている。

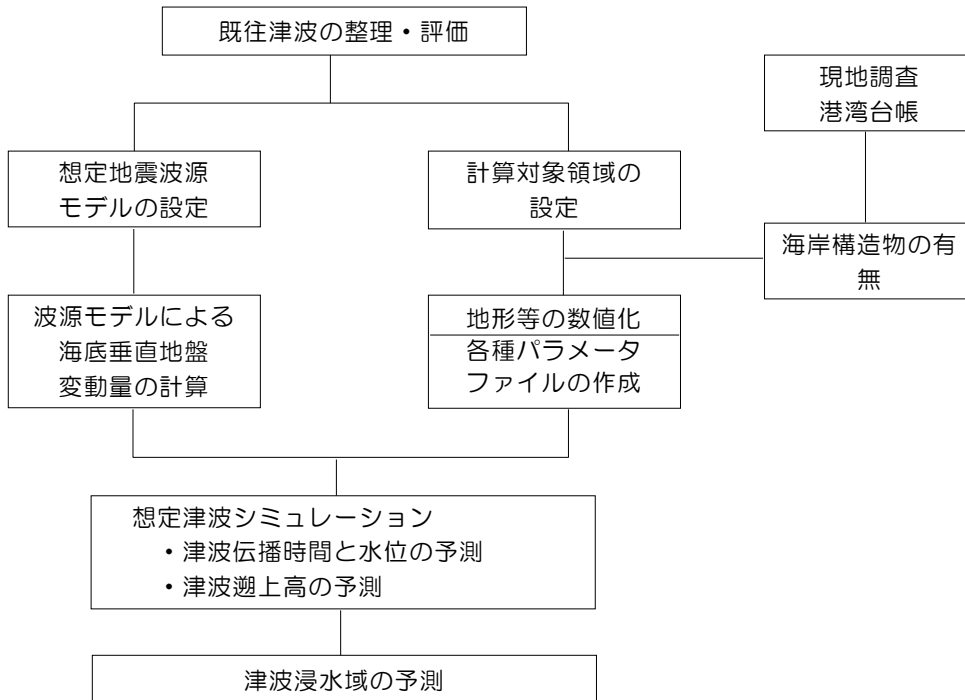


図 II-4-1 津波予測計算の流れ

津波数値シミュレーションは、大きく長波理論と分散波理論の2種類に分けられるが、現在は前者を用いる自治体がほとんどである。河川遡上時の波状段波（波長の長い津波先端部が短周期の複数の波に分裂（ソリトン分裂）しながら段波形状を呈し遡上していく）を考慮した手法として、非線形分散長波式を基本方程式とする手法もあるが、詳細な河川地形を取り入れたモデルを用いた細かい計算時間間隔での解析が必要となるため、実際の被害想定で採用している例はまだない。

(1) 基礎方程式として長波理論を用いる手法

○採用自治体：岩手県(11) 秋田県(13) 茨城県(12) 埼玉県(14) 東京都(12) 神奈川県(15) 静岡県(13) 京都府(17) 和歌山県(14) 岡山県(13) 広島県(13) 山口県(14) 徳島県(13) 愛媛県(13) 鹿児島県(14) 沖縄県(13) 横浜市(12)

津波の予測では、長波理論に基づく方程式を差分スキームにより展開し、数値的な計算を行っている。津波は水深に比べて波長が長いことから、長波理論によって表される。この時、津波の伝播速度 $C_g(\text{m/s})$ は、

$$C_g = \sqrt{g \times h} \quad g : \text{重力加速度} (\text{m/s}^2) \quad h : \text{水深} (\text{m})$$

で表される。

浅海域の長波を扱う浅水理論は、波高 H と波長 L の比 H/L 、および水深 h と波長 L の比 h/L がいずれも小さいものとして導かれる。この近似では、圧力は静水圧分布となり、水平流速 (u, v) は鉛直方向に一様な分布となる。

津波数値シミュレーションの基礎方程式としては、非線形長波理論式が用いられる傾向にある。

<運動方程式>

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2 M \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{gn^2 N \sqrt{M^2 + N^2}}{D^{7/3}} = 0$$

<連続の式>

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0$$

η : 水位 (海底地殻変動により変位する水位)

M, N : x, y 方向の流量

D : 全水深 (=水深+水位)

n : マニングの粗度係数

出典 : 鹿児島県 (2014)

これらの式の表記方法は様々であるが、ここでは、鹿児島県(2014)のものに依った。
マニングの粗度係数 n は、

$$n = \sqrt{\frac{fD^{1/3}}{g}}$$

で定められる。具体的には、粗度係数として以下の2種類を採用している自治体が多い。

表 II-4-1 津波・高潮ハザードマップマニュアル
(内閣府, 2004) 準抛の粗度係数 (石川県, 2012)

分類	粗度係数
建物用地	0.060
工業地等	0.040
森林林地	0.030
田畑	0.020
海域水域	0.025

表 II-4-2 小谷ら(1998)の粗度係数
(千葉県, 2011)

分類	粗度係数
水深 150m以深の海底	0.025
水深 150m以浅の海底	0.030
海域水域	0.025
水田	0.020
その他の農園地	0.020
森林	0.030
工場	0.040
建物用用地 (住宅地: 低密度)	0.040
建物用用地 (住宅地: 高密度)	0.080
その他 (空地・緑地)	0.025

また、基本的には非線形長波理論式で計算するが、最外洋域では線形長波理論式を採用している自治体もある。

これらの基礎方程式を差分化することにより数値的な処理を行う。差分化手法としては、Leap-frog法(後藤・小川, 1982)が多く用いられる。これは、水位 η 、流量 M 、 N の計算点を空間的に1/2格子、時間的に1/2時間ステップずらして配置する。