

### 3.3 地域に考えられる地震の検討（手法Aによる）

#### 3.3.1 予測手法

##### （1）概要

地震現象は、震源断層の破壊によって発生した地震波動が伝播し、サイト近傍の地盤構造の影響を受けて構造物を揺らせるものである（図 3.3-1）。このとき、規模の小さい地震の震源は断層面積およびすべり量が小さく、規模の大きい地震は大きな面積の断層が大きくなることになる。

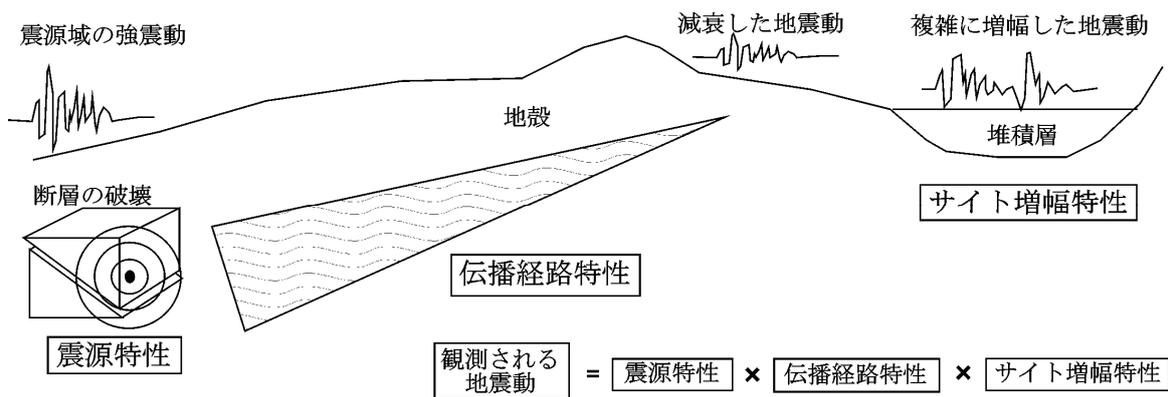


図 3.3-1 地震動を構成する要因

一般に、規模の大きい地震ほど強い地震波が震源から放射される。規模の大きい地震は地震断層も大きく、破壊の開始から停止までにかかる時間も長くなる。これが、震源から放射される地震波の平均的な特性（放射特性、方位特性を平均化し、非一様滑りを考えない）であり、そのスペクトルを理論的に表現することも可能である。

大地震と小地震による断層破壊の違いは、図 3.3-2 に示すように破壊面積（地震断層の大きさ）の違いとすべり量の違いである。このため、断層面上での平均的なすべり速度をほぼ一定と考えると、小地震に較べて大地震のほうが時間をかけて大きくすべることになる。

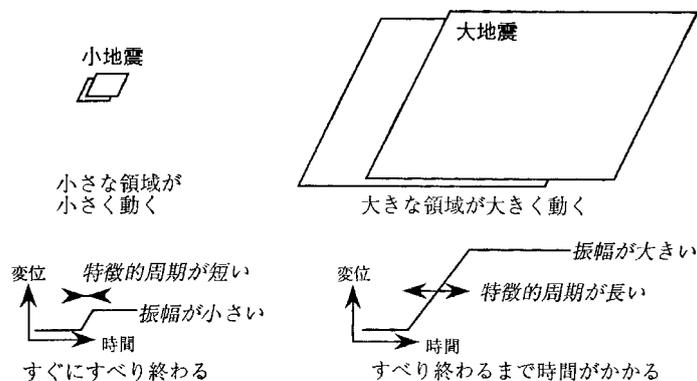


図 3.3-2 大地震と小地震

上記のように考えると、大地震に比べて小地震の震源断層は小さく、その観測記録は点に力が加わった場合の伝播経路およびサイト周辺地盤の応答と近似的に考えることができる（物理用語ではグリーン関数）。そこで、断層面を幾つかの小断層に分割すると、断層全体が破壊する大地震は小断層がそれぞれ破壊する小地震の集合として評価することができる。すべりの成長と断層破壊の伝播による時間遅れと、地震波が生じた場所（小断層）から地震動を評価する地点との距離による震幅の違いを考慮して小地震による波形を順に足し合わせると、大地震による波形を合成することができる。これが強震動評価の基本的な考え方である。このとき、適用条件に応じて小地震の記録（グリーン関数）をどのように仮定するかにより、次の各手法に分類される。

- 1) 経験的グリーン関数法（観測小地震波形を用いる）
- 2) 統計的グリーン関数法（スペクトルに適合させた人工地震波を用いる）
- 3) 理論計算法（波動伝播理論に基づく計算波を用いる：3次元差分法など）
- 4) ハイブリッド法（2）、3の長所を活かし短所を補うように合成）

これらのうち、対象断層に起因する適切な小地震記録が対象サイトで得られている場合には経験的グリーン関数法の精度が良く、適当な記録はないものの、観測記録の再現性の良い地盤構造モデルが構築されている場合にはハイブリッド法の適用が可能である。ハイブリッド法は広い周期帯域に適用可能な地震動を評価する手法として近年多用されており、本検討でも手法 B において利用する。図 3.3-3 にハイブリッド法のフローを示す。

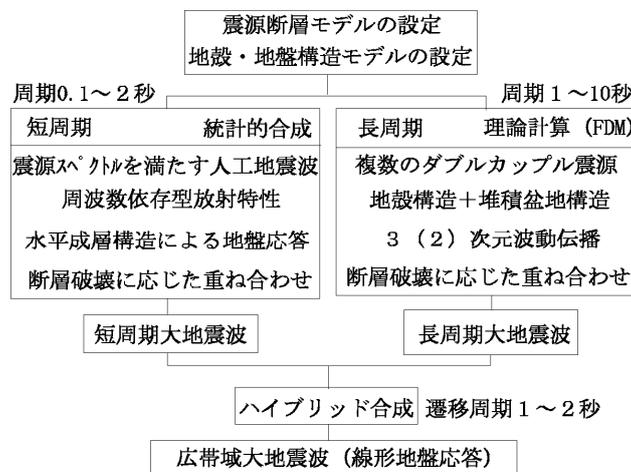


図 3.3-3 ハイブリッド法のフロー

## (2) 統計的グリーン関数法

手法 A では、このうち統計的グリーン関数法 [釜江・入倉(1990)] を用いて周期 2 秒程度より短周期（計測震度に影響する範囲）の地震動を評価した。統計的グリーン関数法では、震源理論に基づいた人工地震波である統計的グリーン関数 [Boore(1983)] を用い、小断層破壊が大きな断層面に広がって大地震へと成長する断層破壊過程を考慮して大地震記録を合成する。この予測法は、図 3.3-3 では左側のフローを単独で実施することに相当する。統計的グリーン関数法の概要を図 3.3-4 に示す。

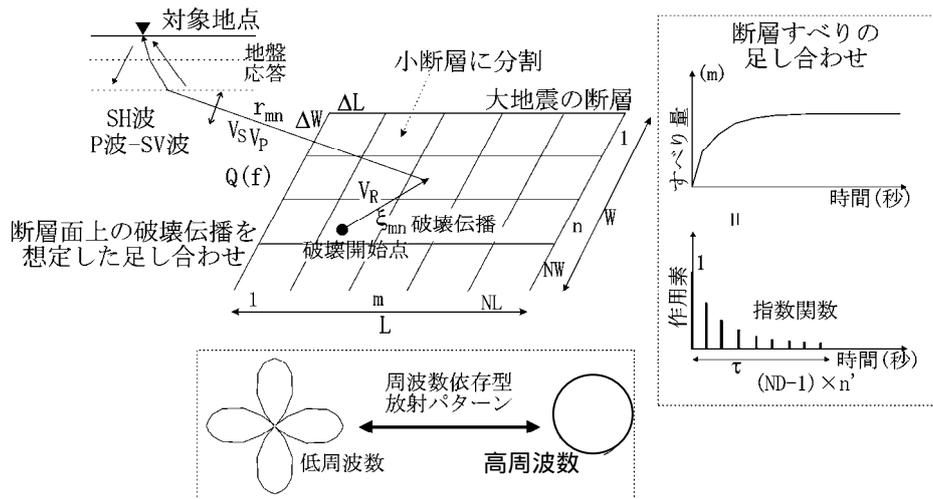


図 3.3-4 統計的グリーン関数法の概要

ここで採用する統計的グリーン関数法 [ 香川(2004) ] では、方位による地震動の放射強度 (Radiation Pattern) が低周波数では強く、高周波数では弱くなるように導入 (ここでは遷移周波数を 0.5 ~ 5.0 Hz とした) されており、震源域の地震動の特徴を反映した予測が可能である。

なお、一般的な統計的グリーン関数法の方法論では地震動の遠地項のみを考慮しているが、震源ごく近傍では近値項および中間項を考慮する必要があることを、堀家・大西(2004)が指摘している。彼らの試算では、震源距離が近いほど水平成分は特に 1 Hz より低周波数でやや過大評価、上下成分は 3 Hz より低周波数でかなりの過小評価となっている (図 3.3-5)。

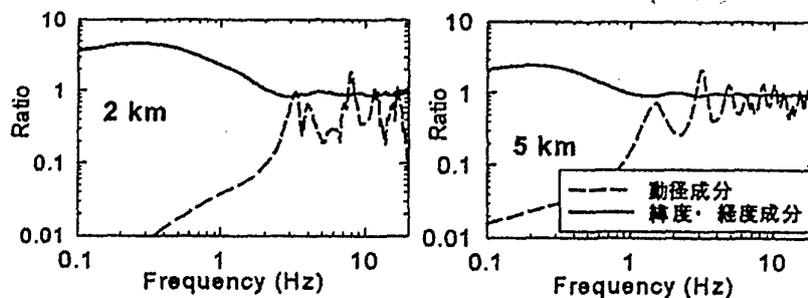


図 3.3-5 遠地項のみの場合と近値項・中間項も考慮した場合のスペクトル比 (堀家・大西, 2004)

しかし、今回の評価では断層上端を地下 3 km 程度とし、大きな地震動を放射するアスペリティは浅い位置にはない、という考え [ Kagawa et al.(2004) ] にたつて地震動放射の重心 (アスペリティ) を深く置くため、特に水平動については、この影響は小さいと考える。ただし、上下動については特に長周期成分で過小評価気味となることが懸念される。

そのため、手法 A の成果としての計測震度、水平最大加速度、水平最大速度の分布には問題は無いが、上下動を含む 3 成分波形を用いた耐震検討に際しては、長周期成分を 3 次元差分法 [ Graves(1996), Pitarka(1999) ] に置き換えた手法 B (ハイブリッド法) の結果を用いるなど、注意が必要である。

(3) 表層地盤応答の評価

手法 A の検討では、大阪盆地構造の 3 次元深層地盤モデルから評価点直下の情報を取り出した水平成層地盤モデルで工学的基盤 (S 波速度 400m/s 以上) における地震動をまず計算する。深層地盤モデルは深さ 50m 毎にモデル化されているが、ここでは深い構造は数層を束ねたより厚い平均モデルで近似した。その後、工学的基盤から地表面までの表層地盤モデルを用いて、非線形地盤応答に配慮しつつ地表面地震動評価した。とはいえ、非線形応答計算に必要な地盤の動的変形特性が調査されている事例は少なく、平均的な値や推定値を用いざるを得ない。また、面的な地震動を計算する必要から、少ないパラメータで安定した計算ができる手法が望まれる。

そこで、本検討では一般に広く用いられている等価線形化手法を用いる。非線形地盤応答時の地盤物性は通常地盤ひずみの時間変化に応じて変動する。等価線形化手法では、地盤中に発生した最大のひずみ量に応じて、解析の初めから終わりまで同じ値を仮定して地盤物性を変化させる。このため、地盤ひずみに応じた物性変化 (図 3.3-6) を導入していることを除けば、計算自体は線形で行われる。図 3.3-7 にその概念を示す。この考え方に沿って開発されたプログラムが SHAKE[Schnabel et al.(1972)]である。

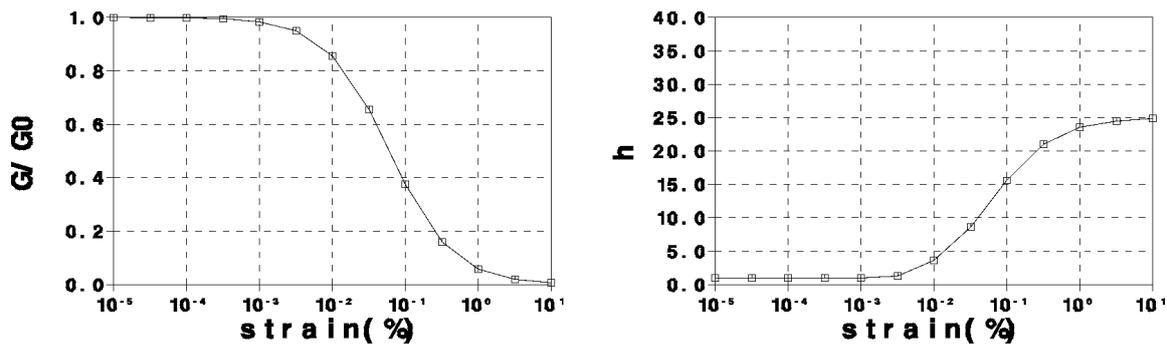


図 3.3-6 地盤ひずみによる剛性低下 (左) と減衰係数の増大 (右)

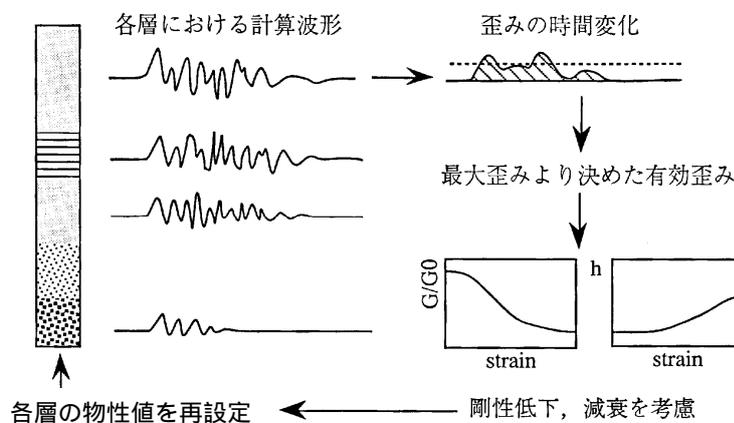


図 3.3-7 等価線形化法の概念

手法 A および次の手法 B における地表面地震動計算にあたっては、SHAKE の概念にひずみの周波数依存性を導入した手法を用いた。SHAKE では全ての周波数において同じひずみを仮定しており、そのため高周波数の減衰が過大評価となることが指摘されている。それを克服する手法として、ひずみの周波数依存性を導入した手法が提案されている[ 杉戸・他 (1994) ,Yoshida et al. (2002) など ]。ここでは、このうちひずみの周波数依存性の物理的概念を背景にモデル化されている Yoshida et al. (2002)の方法 (DYNEQ) に準じた手法を用いた。

SHAKE では層の中間で計算される最大ひずみに係数 (0.6 ~ 0.65 程度) を掛けたものを有効ひずみとし、これを全ての周波数で用いている。DYNEQ では、最大ひずみ  $\gamma_{max}$  に対して次式で周波数毎の有効歪み  $\gamma_{eff}$  を定義している。

$$\begin{aligned} \gamma_{eff} &= \gamma_{max} & f &\leq f_p \\ \gamma_{eff} &= \gamma_{max} \left\{ 1 - \left( \frac{\log f - \log f_p}{\log f_e - \log f_p} \right)^m \right\} & f_p &\leq f \leq f_e \\ \gamma_{eff} &= 0 & f &\geq f_e \end{aligned}$$

ここに、 $f_p$  はせん断ひずみが最大となる際の振動数、 $f_e$  はこれ以上の振動数では弾性挙動する限界の周波数である。また、経験に基づき  $m=2$  とされている。この歪みに応じて、地盤ひずみに対する剛性の低下 (初期剛性に対する比) と減衰定数を周波数毎に設定する。ここでは  $f_p=0.15\text{Hz}$ 、 $f_e=15.0\text{Hz}$  を採用している。

また、履歴減衰に加えて散乱減衰を考慮した内部減衰を与える。このとき、内部減衰には次式で与えられる関数形を仮定する。

$$h = h_i f^\gamma + \alpha f^2 e^{-\beta f}$$

千葉県の大東生産研アレーにおける観測結果について解析されている結果を参考に、ここでは  $h_i=0.017$ 、 $\alpha=0.055$ 、 $\gamma=1.0$ 、 $\beta=0.18$  を用いた。

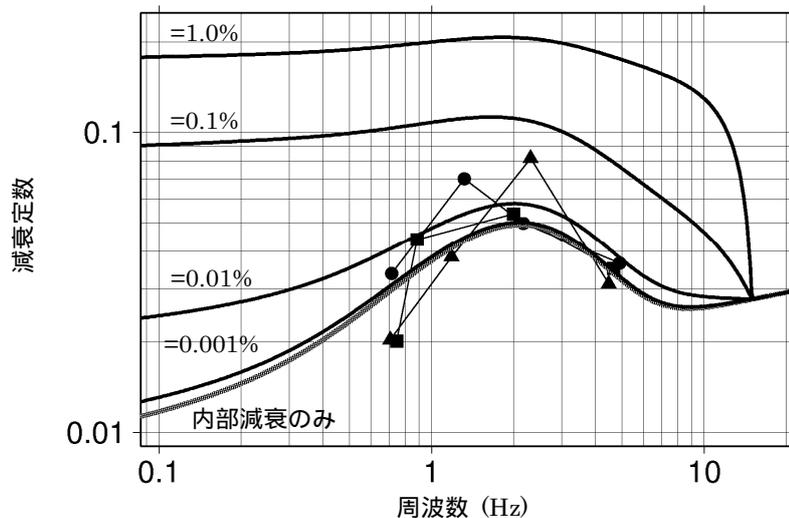


図 3.3-8 減衰の周波数依存性の総合特性 (背景の離散点が観測記録の分析結果)

これら減衰の総合特性の例を図 3.3-8 に示している。実際に表層応答計算に用いた非線形地盤特性を、図 3.3-9 に示す。

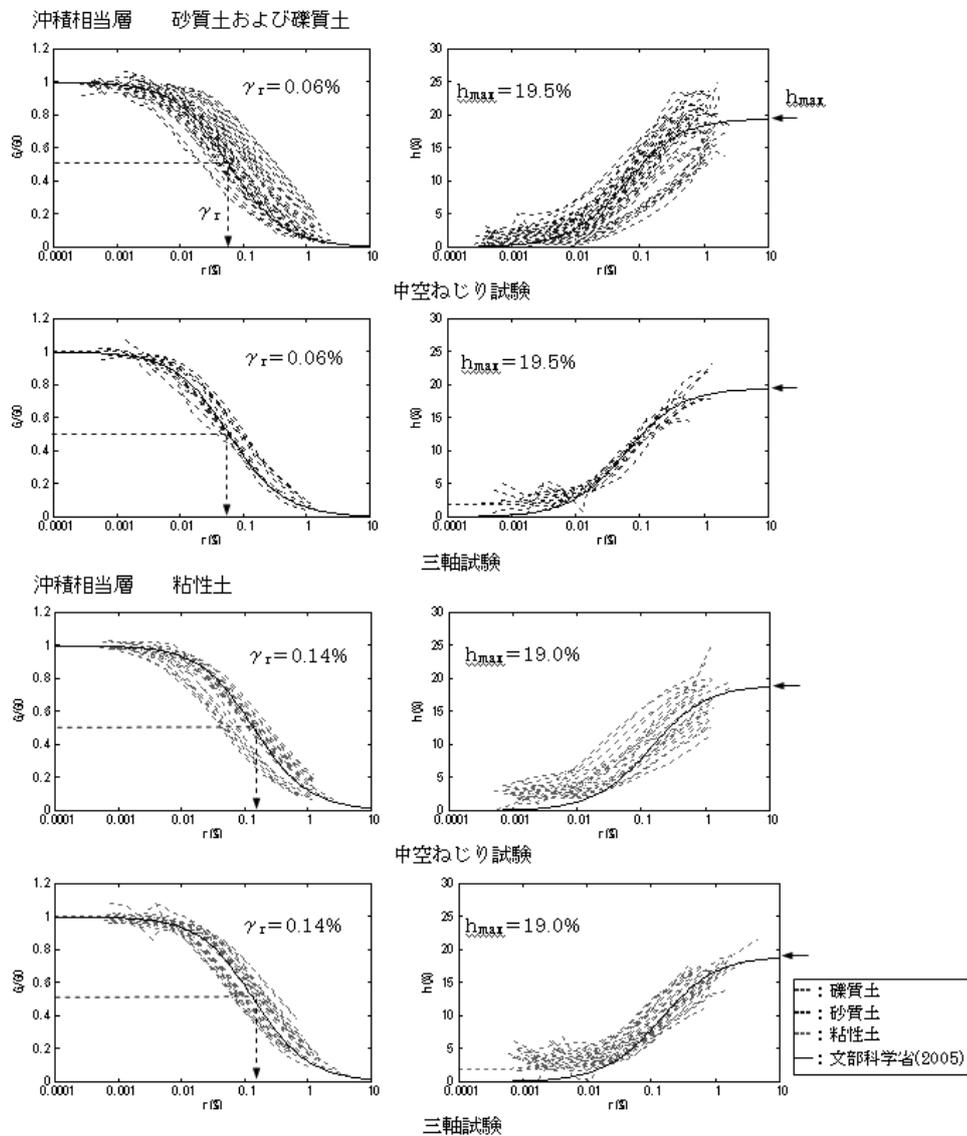


図 3.3-9 大阪地盤のボーリングデータから推定した非線形応答特性（大阪府，2007）

### 3.3.2 地域に考えられる地震（断層破壊シナリオの設定）

手法 A の検討では入倉・三宅(2001), Irikura et al.(2004)による断層破壊設定法に倣って非一様破壊シナリオを複数想定し,以下の計 11 断層破壊ケースの地震動分布を統計的グリーン関数法によって計算した。図 3.3-10～図 3.3-19 にアスペリティ配置を示す。各代表ケースの計測震度等の予測結果は,巻末の資料 1 に示した。

なお,手法 A の予測結果は,大阪堆積盆地が地震動に及ぼす影響は含まれないが,地域に影響の大きいシナリオとしての震度分布などが得られる。

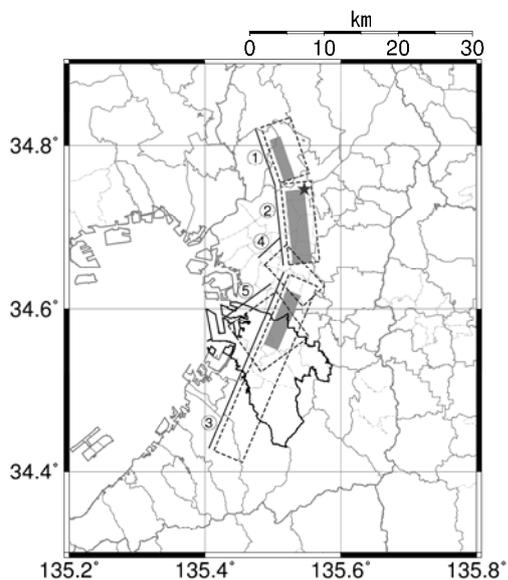
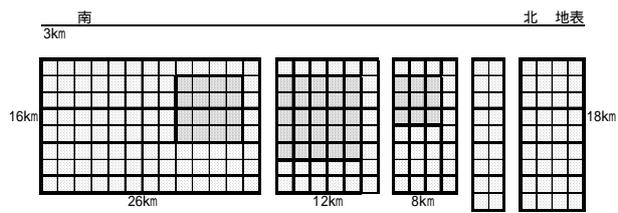


図 3.3-10 断層破壊シナリオ  
【上町断層帯地震 1 (S17)】

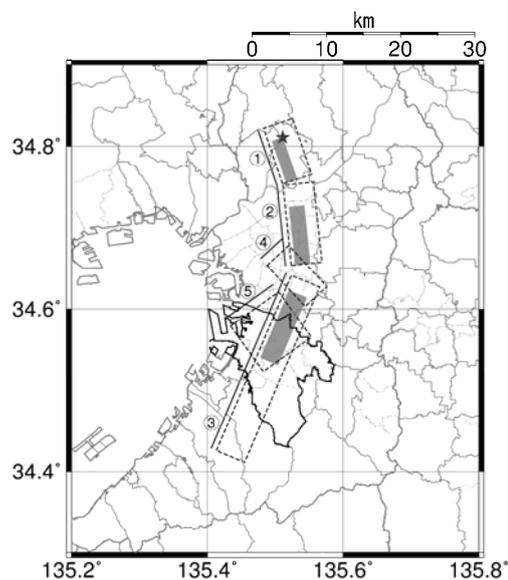
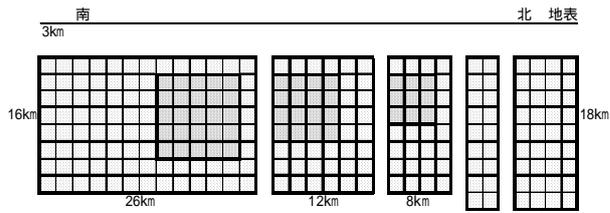


図 3.3-11 断層破壊シナリオ  
【上町断層帯地震 2 (S05)】

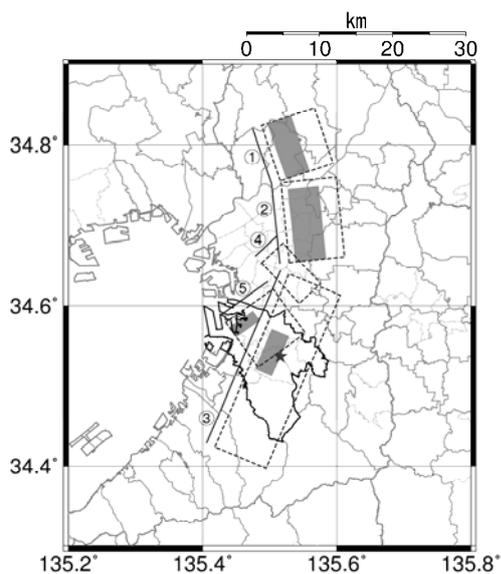
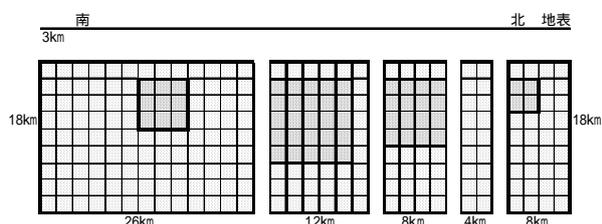


図 3.3-12 断層破壊シナリオ  
【上町断層帯地震 3,5 (S14,S10)】

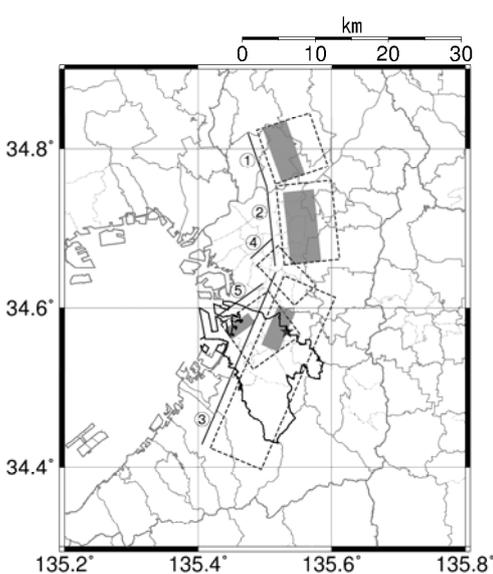
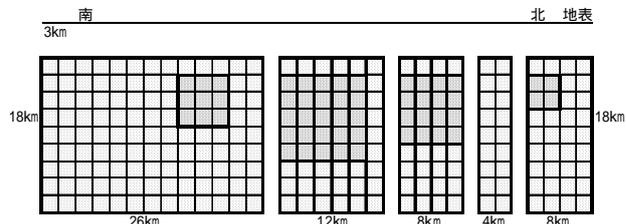


図 3.3-13 断層破壊シナリオ  
【上町断層帯地震 4 (S15)】