

(7) 距離減衰式を用いた震源近傍での強震動の評価法

鹿島建設(株) 武村雅之^{*1}、池浦友則^{*2}、大野晋^{*2}、太田外気晴^{*2}

§ 1. はじめに

筆者らは、経験的側面に重点がある距離減衰式の物理的背景を明らかにし、未経験の大地震に対しても適用可能な式を作成するため研究をすすめてきた(武村他、1987; Hiehata et. al., 1988; 武村他、1989, 池浦他、1991)。それらの結果、地震のマグニチュードMと震源距離Xから地震動の振幅スペクトルO(f)をあらわす距離減衰式(1)式と断層モデルの点震源解(2)式との関係が明らかになった。

$$\log O(f) = a(f)M - (\log X + b(f)X) + c(f) \quad (1)$$

$$O(f) = (\pi \gamma f^2 Mo(f) / \rho Vs^3 X) \cdot \exp(-\pi f X / Qs(f)Vs) \cdot H(f) \quad (2)$$

ここで、a(f), b(f), c(f)は回帰係数、Mo(f), Qs(f), H(f)はそれぞれ震源スペクトル、伝播経路のQ値、地盤の増幅率である。また、 γ , ρ , Vsはそれぞれラディエーションパターン係数、密度、S波速度である。同一の強震記録に基づく解析結果によれば(池浦他、1991) (2)式のO(f)はフーリエスペクトルを示すが、(1)式でO(f)として、応答スペクトルを用いた場合でも、Qs(f)とH(f)はほぼb(f)とc(f)の値で表現でき、(1)式のO(f)にフーリエスペクトルを用いれば、コーナー周波数等細かな変動は表現できないがMo(f)も平均的にはa(f)とc(f)により表現されることが分っている。

以上のように、点震源解と距離減衰式の関係は明確になったが、実用的な距離減衰式の評価にあたっては、強震動予測で最も重要な震源近傍での地震動に対する表現ならびに震源からの地震波の方向性の考慮についてさらに検討をすすめる必要がある。

§ 2. 震源から発生する短周期地震波の性質

震源から発生する短周期地震波は、特に震源における不均質すべりの影響を強く受けており(例えば、池浦・武村、1991)、それらの影響の少ない長周期地震波と同一視することには問題がある。長周期地震動に対しては、震源からの地震波の方向性の原因として、主に震源メカニズムの影響、ドブラー効果に近似される破壊伝播効果の2つが指摘されており、いずれも地震動が強い指向性をもつ原因となっている。

しかしながら、近年の強震観測の結果や不均質すべりを伴う断層モデルの解析結果から、短周期地震動は断層面上の各点から生じる地震波の位相がランダムに近い状態で重なり合うことから長周期地震動とは少々異なる性質があることが指摘されている。震源メカニズムの影響についての理論は確立されていないが、断層面上でのメカニズム解の変動(小山、1987)や伝播経路における散乱の影響で、長周期地震動でみられる程明瞭にメカニズム解による方位依存性が認められないことが指摘されている(Liu and Helmberger, 1985; 工藤、1991)。一方、破壊伝播効果については理論的検討もなされている。例えば図1のような座標の断層が不均質すべりをする場合(池浦、武村、1991)の震源スペクトルは図2のようになり、0.01から0.05Hzのコーナー周波数付近では、破壊の進行方向($\psi = 0$ 度)と逆方向($\psi = 180$ 度)でスペクトルの値が異なるが、0.3 Hz以上の高周波数領域では、すべりの不均質性の影響で、方向性が無くなることが指摘されている。この結果を用い、さらに地震動の継続時間の方向性を考慮すると、最大振幅値Amaxの方位依存性は以下のようになる(池浦、武村、1991)。

$$A_{max} \propto \{L(1/VR - \cos \psi / Vs)\}^{-1/2} \quad (3)$$

ここでLは断層長さ、VRは破壊伝播速度である。長周期地震動の最大値は同様の関数であるが、右肩の指数が-1となることはよく知られた事実であり、最大値に関しても短周期領域の方位依存性は弱いことが分る。

以上の議論は、いずれも断層から遠く離れた地点に対する結果であるが、断層面に近付くと、観測点から見た断層面上の各点の方向が異なる分上記の効果はさらに弱まるものと考えられる。これに対し断層面上の

各点までの距離で決まる幾何減衰の影響による方向性（ここでは、断層面の広がりによる効果と呼ぶ）が震源近傍では支配的になる。図3は、1891年の濃尾地震の震度分布を示すが、震源から遠く離れた地点では円形に近い震度分布が、震源近傍では断層面を取囲むように細長くなることが分る。このような断層の広がり
の効果を距離減衰式に取入れるために、等価震源距離という新しい概念を導入する。

§3. 等価震源距離

前項の議論より、短周期地震動に関する振幅の方向性の主な原因は、断層面の広がり
の効果であり、その影響は震源近傍に限られていることが分る。そこで断層面を n 個の微小領域に分割し、そのそれぞれに(2)式
の点震源解が成立つとして、ランダム位相の仮定のもとで、それぞれの領域からの寄与を以下のようにた
しあわせる。

$$E_i(f) = O_i(f)^2 \quad (4)$$

$$E(f) = \sum_{i=1}^n E_i(f) \\ = [(\pi f^2 / \rho V_s^3) \cdot H(f)]^2 \cdot \sum_{i=1}^n [\gamma_i M_{oi}(f) / X_i \cdot \exp(-\pi f X_i / Q_s(f) V_s)]^2 \quad (5)$$

短周期地震動に対するラデイエーションパターン係数 γ_i は方位に依存せず一定 γ_0 とし、震源近傍では Q 値の影響が小さいため、 $\exp(\) = 1$ とすると(5)式は以下ようになる。

$$E(f) = C \cdot \sum_{i=1}^n [M_{oi}(f) / X_i]^2 \quad (6)$$

ここで、 C は i に依存しない部分を示す。 $E(f)$ は断層面から出る全ての地震波エネルギーを示しており、
($\sum_{i=1}^n M_{oi}(f)^2$)^{1/2} のモーメント密度をもち、震源距離 X_{eq} の点震源を考えると X_{eq} は以下ようになる。

$$X_{eq}^{-2} = \sum_{i=1}^n [M_{oi}(f) / X_i]^2 / \sum_{i=1}^n [M_{oi}(f)]^2 \quad (7)$$

X_{eq} を等価震源距離と呼ぶことにする。断層面上から一様にエネルギーが放出された場合は M_{oi} が i によらず
一定となり、(7)式は X_i^{-2} のみの和として表現できる。

簡単な例として、図4の様な円形断層 ($R=17\text{km}$) に対し X_{eq} を求める。この場合、(7)式の Σ を断層
面上の面積分に置換えると解析解を求めることができる(大野他、1990; Sigh et al., 1989)。 X_{eq} が振幅
の距離減衰に与える影響をみるため、次の3ケースの距離減衰項の2乗値を比較した(縦軸常用対数値)。
つまり点震源の距離減衰項そのままの場合 (a) $\exp(-\pi f X / Q_s(f) V_s) / X$ 、等価震源距離 X_{eq} による幾何
減衰項 (b) $1 / X_{eq}$ 、(a) の X の代わりに X_{eq} を用いた場合 (c) $\exp(-\pi f X_{eq} / Q_s(f) V_s) / X_{eq}$ である。
図5に結果を示す。横軸は震源距離 X (断層中心からの距離) である。(a) のケースは震源近傍で点震源の
効果が現われ振幅が非常に大きくなる傾向にある。これに対して (c) のように等価震源距離を用いると、震
源近傍では断層の広がり
の効果を反映する振幅の頭打ちが生じ、震源から離れると点震源の結果に漸近する
ことが分る。また (b) と (c) の結果の比較より、震源近傍での頭打ちの効果は、 Q 値の影響ではなく、幾何
減衰項の影響であることも分る。

以上のことは、等価震源距離を用いれば、点震源に対する式の形を変えることなく震源近傍での地震動の
距離減衰特性を表現できることを示している。このことは、通常観測される震源からやや離れた地震記録か
ら(1)式の係数を決め、その式を震源近傍に外そうする場合、震源距離の代わりに等価震源距離を用い
ればよいことを示唆するものである。

§4. 適用例

大野他(1990)はすでに1979年インベリアルバレー地震や1984年モルガンヒル地震の記録の応答スペクトル
に対し、等価震源距離を用いた場合に(1)式の $b(f)$ から適切な Q 値が求まり震源近傍から遠方までの記録の

応答スペクトルが合理的に説明されることを示している。ここでは、少々見方を変え、1979年インペリアルバレー地震の記録の水平動のS波フーリエスペクトルが断層面からの最短距離 X_{sh} と等価震源距離 X_{eq} に対してどのように変化するかを示す。図6は断層と観測点位置、および断層面上のすべり分布を示す。等価震源距離を求める場合(7)式のモーメント密度関数の分布 $M_{oi}(f)$ を与える必要があるが、各メッシュで点震源を想定していることから、 $M_{oi}(f)$ と各メッシュでの地震モーメントが単純に比例関係にあると考えて $M_{oi}(f)$ をすべり分布に置換えて計算した。図7に X_{eq} と X_{sh} の関係、図8にフーリエスペクトル振幅と X_{eq} 、 X_{sh} の関係を示す。フーリエスペクトル振幅は1から10Hzまでの平均値を用いた。図8から、 X_{sh} を用いた場合震源近傍でスペクトル振幅が折れ曲がるが、 X_{eq} を用いると、ほぼ X_{eq}^{-1} に比例した傾きを示し、断層近傍の観測点に対しても点震源と同様の形の幾何減衰が成立つようになることが分る。

§5. まとめ

点震源に基づく距離減衰式を震源近傍まで用いるため、震源から発生する短周期地震波の特性を踏まえ、等価震源距離を提案した。等価震源距離を用いると、点震源に基づく式の形を変えることなく、震源近傍の観測記録が説明できることが分った。一般に震源からやや離れた記録を中心に作成されることが多い距離減衰式を震源近傍まで外そうして用いる場合、等価震源距離は大変有効なパラメータである。

参考文献

- Harzell and Helmburger(1982) Strong-motion modeling of the Imperial valley earthquake of 1979, BSSA, 72.
 Hiehata, Takemura and Ohta(1988) Regression analysis on Fourier amplitude spectra of seismic ground motions in terms of earthquake magnitude, hypocentral distance and site condition, 9WCEE, vol. 2.
 池浦・加藤・武村・嶋(1991)地震動の回帰分析結果とその解釈、日本建築学会大会。
 池浦・武村(1991)不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価法、地震、第43巻。
 小山(1987)1983年日本海中部地震の時間依存モーメントテンソル、地震、第40巻。
 工藤(1991)強震動の方位依存性、地震学会春季大会。
 Liu and Helmburger(1985)The 23:19 aftershock of the October 1979 Imperial valley earthquake, BSSA, 75.
 村松(1988)大自然の力、退官記念誌。
 大野・太田・池浦・武村(1990)海外震源近傍記録の回帰分析による地震動スペクトル評価、日本地震工学シンポジウム、vol. 1。
 Sigh, Ordaz, Anderson, Rodriguez, Quaas, Mena, Ottaviani and Almora, Analysis of near-source strong-motion recordings along the Mexican subduction zone(1989)BSSA, 79.
 武村・太田・稗圃(1987)地震動の平均応答スペクトルを評価する経験式の物理的基礎、日本建築学会論文報告集、第375号。
 武村・釜田・小堀(1989)地震波の発生伝播理論を考慮した模擬地震動作成法、日本建築学会論文報告集、第403号。
 宇佐美(1987)新編日本被害地震総覧、東大出版会。

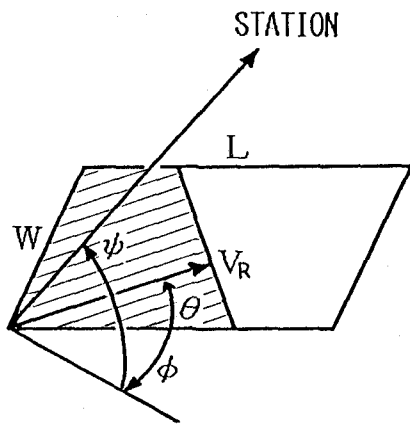


図1 図2の計算に用いた断層面の座標

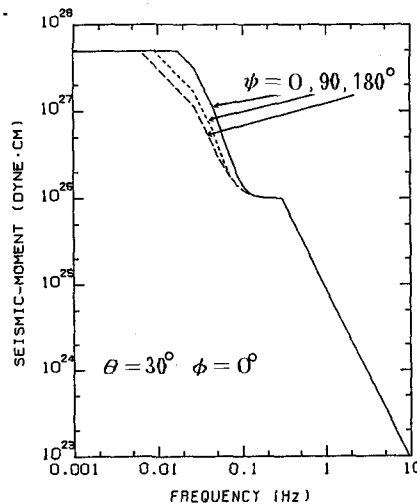


図2 1983年日本海中部地震を例にした震源スペクトルの方位特性(詳細は池浦・武村1991参照)

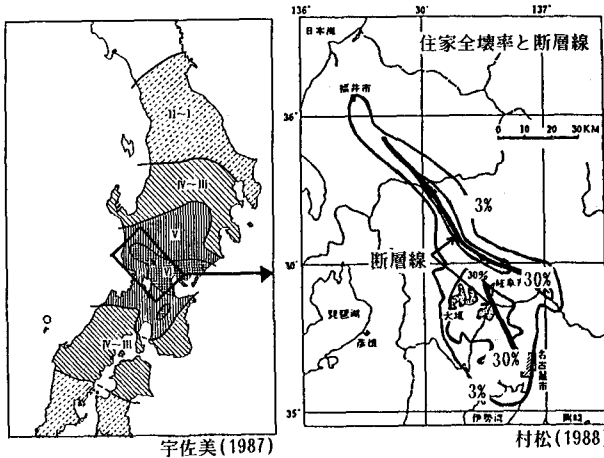


図3 1891年濃尾地震の震度分布

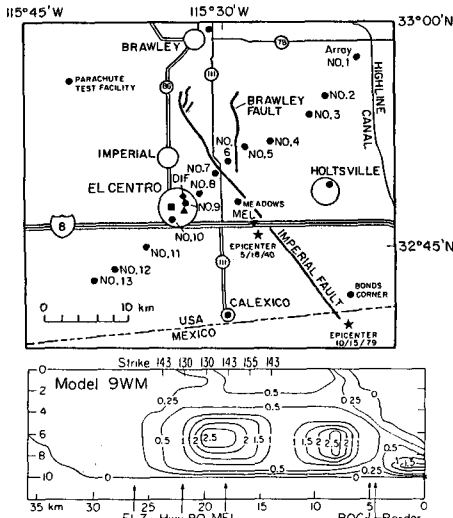
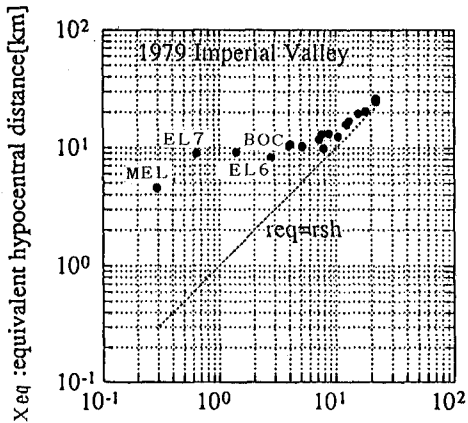


図6 1979Imperial valley 地震の断層とすべり分布 (Hartzull and Helmberger, 1982)



X sh :shortest distance from the fault[km]

図7 等価震源距離 Xeq と断層最短距離 Xsh

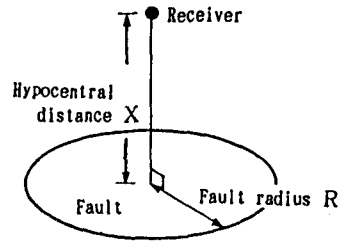


図4 円形断層モデル (大野他1990)

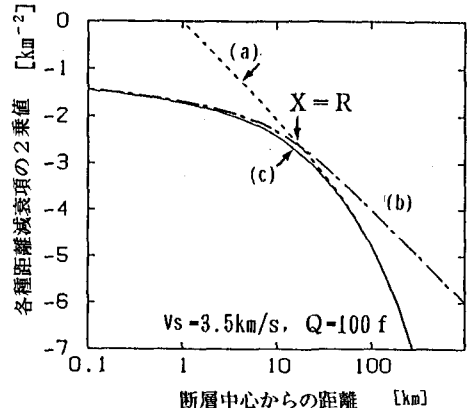


図5 各種距離減衰項の2乗値の比較
詳細は本文参照

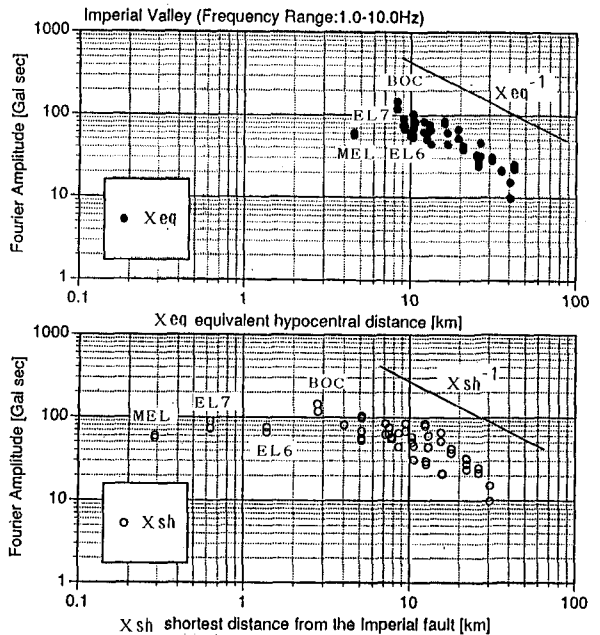


図8 等価震源距離 Xeq と断層最短距離 Xsh に対する強震動の平均スペクトル (1-10Hz)

*1 小堀研究室 港区赤坂6-5-13

*2 技術研究所 東京都調布市2-19-1