

強震動シミュレーションのための周波数・震源距離依存型 ラディエーション係数モデルに関する検討

港湾空港技術研究所 正会員 ○長坂 陽介
港湾空港技術研究所 正会員 野津 厚

1. はじめに

強震観測により得られた波形は特定の方向に特に強く揺れていることがあり、このような揺れの方向性はラディエーション係数と関係がある。ラディエーション係数は震源メカニズムから理論的に求めることができるが、強震動シミュレーションでは平均的なラディエーション係数を用いることも多い。また、観測結果に見られる揺れの方向性は周波数依存性を示し、低周波数ほど理論的、高周波数ほど平均的ラディエーション係数に近い挙動であることが知られている。そこでラディエーション係数の挙動をより適切にモデル化できれば耐震設計の有用なツールとなり得る。

そこで著者らは2005年7月23日に発生した千葉県中部の地震を対象とし、周波数・震源距離依存性を考慮したラディエーション係数モデルを用いた強震動シミュレーションを行ってきた²⁾。提案方法は以下の式(1)、(2)で表される。

$$(R_{\theta\phi} \cdot PRTITN)^2 = \alpha(R_{\theta\phi}^{theoretical})^2 + (1-\alpha)(\overline{R_{\theta\phi}} \cdot \overline{PRTITN})^2 \quad (1)$$

$$\alpha = \exp(-\pi f / Q_R V_S) \quad (2)$$

ここで、 $R_{\theta\phi}$ は予測ラディエーション係数、 $PRTITN$ は地震動のエネルギーを水平2成分に分けるための係数、 $R_{\theta\phi}^{theoretical}$ は理論的ラディエーション係数、 $\overline{R_{\theta\phi}}$ は平均的ラディエーション係数、 $\overline{PRTITN}$ は地震動のエネルギーを水平2成分に等分する係数、 α は重みづけ係数($0 \leq \alpha \leq 1$)である。式(2)については伝播経路の非弾性減衰との類推から、ラディエーション係数は対象地点までの波のサイクル数($\pi f / V_S$)に従って平均値に近づくと考えモデル化した。 Q_R はラディエーション係数のQ値の役割を果たし、この値により周波数・震源距離依存の程度が決定される重要な係数である。しかし、2005年7月23日の千葉県中部の地震は震源深さが68km(F-net)と深く、観測記録は

ほぼ平均的ラディエーション係数で説明できた。そのため Q_R の決定やモデルの検証には必ずしも適している地震ではなかった。

そこで本検討では、過去にいくつかの研究でラディエーション係数に関する検討の対象となっている2000年鳥取県西部地震を取り上げ、まず独自にラディエーション係数の周波数依存性と震源距離依存性の程度(つまり Q_R の値)を調べ、さらに既往研究と特徴を比較することとした。

2. 周波数・震源距離依存程度の決定

鳥取県西部地震は $M_w 6.6$ であり震源域の有限性を本来は考慮すべきだが、ここでは簡単のためTakemura et al.(2009)³⁾などと同様に点震源として扱う。 $R_{theoretical}$ を計算するための震源情報は表1の通りとした。

表1 用いた震源情報

緯度	133° 22.36'	気象庁
経度	35° 15.50'	
深さ	11 km	F-net
走向	150°	
傾斜	85°	
すべり角	-9°	

$\overline{R_{\theta\phi}} = 0.63$, $\overline{PRTITN} = 0.71$ とし、 V_S は3.55km/s(F-net)として統一的に与えた。以上より、 Q_R を与えれば式(2)から各地点の震源距離 r を用いて α が周波数 f の関数として求まり、 α を式(1)に代入することで各地点・各成分の予測ラディエーション係数が求まる。

Q_R の決定のため、ここで揺れの方向性はラディエーション係数のみによって決まり、観測記録のフーリエスペクトル比(Transverse/Radial)がラディエーション係数比(同)と等しいと仮定する。これより、観測フーリエスペクトル比と予測ラディエーション係数比の誤差が最小となる Q_R を求めればよい。なお、本検討ではSV波のラディエーション係数をRadial成分に対応させた。

対象地点は震源から100km以内のK-NET, KiK-netの

キーワード ラディエーション係数, 強震動シミュレーション, 2000年鳥取県西部地震

連絡先 〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所 地震動研究グループ TEL 046-844-5085

79 地点とし、観測フーリエスペクトル比と予測ラディエーション係数比の両対数軸上での差の 2 乗の周波数積分値(0.2-10Hz)を求め、79 地点の平均誤差が最小となる Q_R を求めた。その結果 $Q_R=40$ が最適値となり、このときの重みづけ係数 α (式(1)) の挙動を図 1 のようになる。対象 79 地点の平均震源距離の $r=64\text{km}$ では約 2Hz 以上ではほぼ平均的なラディエーション係数を示すことが分かる。また、低周波数でも完全に理論的なラディエーション係数とはならない。震源距離が大きくなると α は小さくなり、同じ周波数でもより平均的なラディエーション係数を示すようになる。

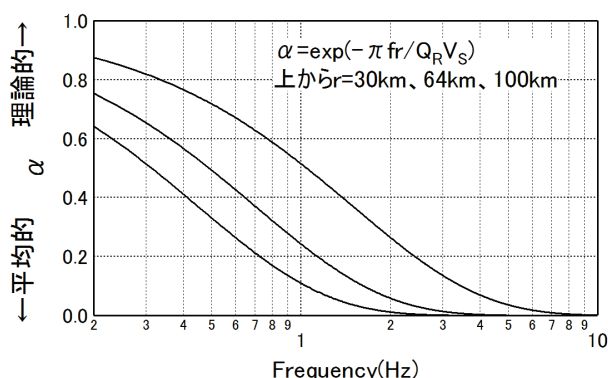


図 1 α によるラディエーション係数の周波数・震源距離依存性

3. 既往研究との比較

2000 年鳥取県西部地震を対象としたラディエーション係数の既往研究として、本検討では佐藤(2002)⁴⁾, Takemura et al. (2009)³⁾を取り上げる。この 2 つは本検討と同様に観測記録からラディエーション係数の性質を調べたものであり、共に周波数・震源距離依存性を考慮している。各研究の概要を表 2 にまとめた。佐藤(2002)はラディエーション係数比の予測モデルを提案しており、周波数依存の離散的な係数 b, c を用いている。

まず周波数依存性について比較すると、佐藤(2002)では

3Hz で等方的性質が強まり、6Hz で完全等方化している。佐藤(2002)が用いた地点の震源距離の重心⁴⁾が約 50kmであることを考えると、本検討よりもより高周波数まで理論的な傾向が残る結果となっている。Takemura et al. (2009)では、2Hz では 4 象限型のパターンがはっきり見えるが、5Hz 以上では等方的であるとしており、さらに理論値に近い挙動を示す結果となっている。本検討では後続波を含めて分析したためより平均的に近い挙動となった可能性がある。

震源距離依存性については、佐藤(2002)はモデルに震源距離(X)を組み込んでいるものの、その依存性は弱いとしている。Takemura et al.(2009)では周波数帯ごとに震源距離依存性を調べており、0.05-2Hz の低周波数では依存性は見られないが 4-8Hz の高周波数では依存性を示しており、震源距離依存性が見られるとしている点では本提案モデルと調和的である。

今後は多くの地震について同様の分析を行い、強震動シミュレーション等で本モデルの妥当性を検証することや、予測問題への適用に向けた Q_R の値の決定が課題となる。

謝辞：本研究では、K-NET, KiK-net の強震観測記録を使用しました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Aki, K. and P. G. Richards: Quantitative Seismology, Second Edition, University Science Books, 2002.
- 2) 長坂陽介, 野津厚, 若井淳: 2005 年 7 月 23 日千葉県中部の地震を例とした疑似点震源モデルの誤差要因に関する検討, 土木学会論文集 A1 (構造・地震工学), Vol.71, I_815-I_822, 2015.
- 3) Takemura, S., Furumura, T., Saito, T.: Distortion of the apparent S-wave radiation pattern in the high-frequency wavefield: Tottori-Ken Seibu, Japan, earthquake of 2000, Geophys. J. Int., Vol.178, pp.950-961, 2009.
- 4) 佐藤智美: Kik-net 強震記録に基づく鳥取県西部地震とその余震のラディエーションパターン及び f_{max} の評価, 日本建築学会構造系論文集, 第 556 号, pp.25-34, 2002.

表 2 2000 年鳥取県西部地震を対象としたラディエーション係数に関する研究

	対象地震	対象地点 震源距離範囲	対象波形	提案モデル
佐藤(2002)	本震, 余震	8~170km	S 波	$\log R/T = \frac{\exp(-X/c) \log R/T_t}{1 + b \log R/T_t}$ $\log R/T$: ラディエーション係数比(Radial/Transverse) (添え字なしは予測値, 添え字 t は理論値), X: 震源距離, b, c: 係数
Takemura et al.(2009)	本震, 余震	<100km	S 波	ラディエーション係数のモデル化はなし。観測に見られるラディエーション係数を再現できるような地盤の不均質モデルを求めている。
本検討	本震	<100km	波形全体	連続的な関数としてモデル化 (式(1), 式(2))