

7. 長周期地震動のための緊急地震速報の高度化

倉橋奨・入倉孝次郎・正木和明

1. はじめに

現在の気象庁による緊急地震速報は、マグニチュードと震源距離の情報から対象サイトの地盤条件を考慮して地震動を予測する方法をとっている。地震規模が大きくなると震源域の広がりも無視できなくなる。この方法は、破壊が止まるまでは原理的に精度ある情報が決まらないため、長周期地震動による被害が問題になるような大規模地震に対しては、早期に精度ある情報を伝達するのは極めて困難である。従って、長周期地震動のための緊急地震速報の高度化には、マグニチュード、破壊域の広がり、震源距離などを決めることなく、リアルタイムで観測された地震動情報から、大きな揺れがまだ届いてない地域の揺れを予測する方法がこの問題を一気に解決することができる。本研究は、Hoshiba (2013) により提案されている実時間地震動予測方法について長周期地震動の予測のための適用性を検討する。

2. 予測手法の構築

2.1 伝達関数の考え方

揺れがまだ到着していない地点Pの地震動は、すでに揺れの到着した地点rを含む表面SがPを取り巻く閉空間を構成している(図1)と考えると、Kirchhoff-Fresnel積分方程式で以下のように表わせる。

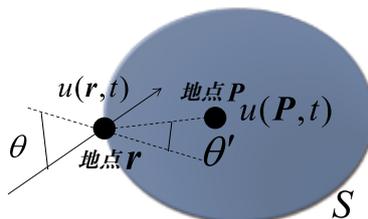


図1 すでに揺れが到達した波形から揺れが到達していない地点の地震動との関係図

$$u(P, t) = \int \frac{1}{v(r)} \cdot (\cos \theta + \cos \theta') \cdot G(P - r, t) * \dot{u}(r, t) dS \quad (1)$$

この式の適用は、地震動の波長がuやGの空間的揺らぎよりも小さい、という条件が必要とされる。さらに、地震動の波長が、観測点および予測点の震源からの距離に比べて小さい場合、地震動は平面波で近似できるので、以下のような簡単な式で表わされる。

$$u(P, t) = G(P, r, t) * u\left(r, t - \frac{P - r}{v} \cos(\theta' - \theta)\right) \quad (2)$$

震源点 r_0 、観測点r、および予測点Pが一直線に並んでいると仮定できるとき、予測点Pと観測点rの相互相関は、以下で表わされる。

$$u(P, r_0, t) * u(r, r_0, -t) = T(P, r, t) * S(r_0, t) \quad (3)$$

(3)の式のTは2点間の伝達関数を表わすが、地震動が一次的に伝播する平面波と考えられるときは、予測点Pと観測点r間のGreen関数とほぼ同じと考えてもいい (Wapenaar et al., 2010)。ここでは、より一般的な適用可能性を検討するため、伝達関数で定義している。(3)の式のSは、震源時間関数の自己相関関数として定義される。

$$S(\mathbf{r}_0, t) = s(\mathbf{r}_0, t) * s(\mathbf{r}_0, -t) \quad (4)$$

予測点Pが強震動観測点である時は、事前に小規模の地震の強震動記録を用いて、(3)の関係から2点間の伝達関数を求めておくことができる。その場合、観測点rで入射方位を検出し、伝達関数は入射方位に応じて事前評価しておく必要がある。観測記録がない場合でも、理論的なシミュレーションからTの推定は可能である。

大規模地震が起こったときには、震源域に近い側の観測点rでの観測記録と伝播方位の情報に基づき、まだ観測されていない地点Pの長周期地震動の予測が可能となる。超高層ビルや大規模石油タンクなどの被害に関係する長周期地震動は、周期が2～10秒、その波長は数kmから数十kmと比較的短いため、長周期地震動が問題となる多くの地震で(2)や(3)が適用可能と考えられる。(P - r)が(r - r0)に比べてあまり小さくない場合には、(1)に戻った計算が必要となる。

上記のロジックより、長周期地震動のための緊急地震速報は以下のように計算できると考えられる。

1. 事前に小規模の地震の強震動記録を用いて、式(4)の関係から2点間の伝達関数を求めておく。
2. 大規模地震が起こったときに、震源域に近い側の観測点rでの観測記録と伝播方位の情報に基づき、まだ観測されていない地点Pの長周期地震動を予測する。

3. 解析事例

上記の方法を、中規模地震に利用して、2011年東北地震の再現を試みる。ここでは、ターゲットサイトをTKYH02(東京)として、リファレンスサイトをIBRH17およびIBRH18として解析を実施した。使用した地震は、茨城沖で発生したMw6.2の地震である。この地震は、震源メカニズムが東北地震と近似していること、東北地震の震源域内で発生していること、また、破壊開始点とリファレンスサイトとターゲットサイトがほぼ一直線上に並ぶことから、検証として適した地震であると判断した。

解析は、以下の操作を行った。

- ①中規模地震のリファレンスサイト (IBRH17) の変位記録とターゲットサイト (TKYH02) の変位記録の相互相関を計算。
- ②IBRH17地点の変位記録の自己相関を計算。
- ③①の相互相関と②の自己相関の比がIBRH17地点とTKYH02地点の伝達関数となる。
- ④IBRH17における巨大地震 (ここでは2011年東北地震) 記録から、上記の伝達関数を用いてTKYH02の地震動記録の再現を試みる。

3.1 中規模地震の再現

図2に、中規模地震記録を利用した2観測点間の伝達関数の結果を示す。ここでは、ターゲットサイトであるTKYH02観測点とリファレンスサイトのIBRH17観測点のものを示す。図2左には、IBRH17観測点の観測記録とTKYH02観測点の観測記録を示している。四角で囲ってある部分が、解析に使用した部分で、S波到達付近から30秒間を対象としている。図2右側には、伝達関数を計算する過程で必要となるIBRH17観測点の自己相関、IBRH17観測点とTKYH02観測点の相互相関関数および、それらの商である伝達関数を示している。

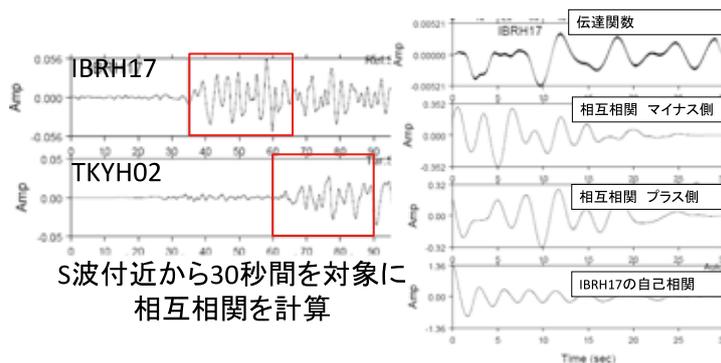


図2 (左図) IBRH17とTKYH02の中規模地震の観測波形と (右図) 伝達関数の計算に必要なIBRH17の自己相関、IBRH17とTKYH02の相互相関および、伝達関数

この伝達関数を利用して中規模地震の再現を試みる。すなわち、IBRH17観測点の中規模地震観測記録に伝達関数をコンボリューションして、TKYH02観測点の中規模地震記録との比較を行う。図3にIBRH17観測点とTKYH02観測点の中規模地震観測記録および、TKYH02観測記録と予測波形の比較図を示す。なお、波形の比較をするため、予測波形の時間軸は観測波形と合うように移動してある。全く同じ波形とはならないが、位相や振幅は、概ね再現できていることが確認できた。

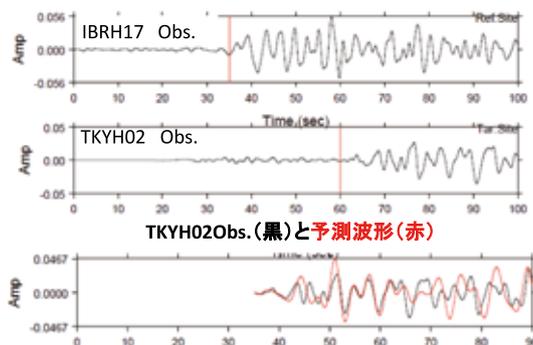


図3 (上段、中段) IBRH17とTKYH02の観測波形と、(下段) TKYH02の観測波形と予測波形の比較

3.2 東北地震の再現

次に、2011年東北地震の観測記録と予測波形との比較を行う。伝達関数は、上記の中規模地震記録からあらかじめ求めたものを利用する。IBRH17観測点の2011年東北地震の観測記録に伝達関数をコンボリューションして得られた予測波形とTKYH02観測点の観測波形とを比較する。図4にその図を示す。なお、波形の比較をするため、予測波形の時間軸は観測波形と合うように移動してある。もともと両観測点の記録は非常に大きな違いがみられないこともあるが、伝達関数を考慮した予測波形は、TKHY02観測点の観測記録と大きな違いのある波形にはなっていないことがわかる。

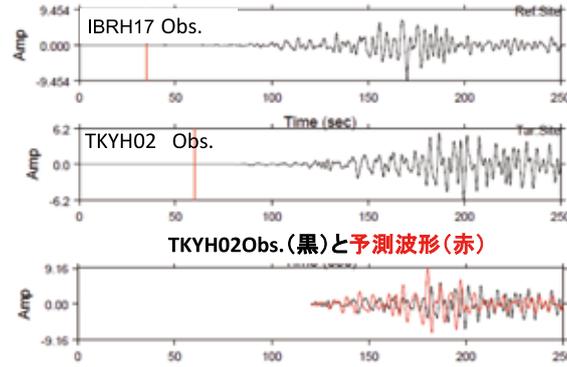


図4 (上段、中段) IBRH17とTKYH02の観測波形と、(下段) TKYH02の観測波形と予測波形の比較

3.3 IIRフィルタを利用した予測波形

前章で記述したように、あらかじめ計算した伝達関数と観測記録のコンボリューションから、ターゲットサイトの観測記録を概ね再現できることを示した。しかしながら、緊急地震速報に利用するためには、すでに観測された記録にリアルタイムで逐次的に計算する必要がある。そこで、これらの周波数特性を再現したIIRフィルターを作成した。本研究では、Hoshiba (2013) の方法を踏襲する。ただしこの部分に関しては、昨年度の年次報告書に記載しているため、詳細の記述は割愛する。

IIRフィルターを利用して解析した例を図5に示す。IIRフィルター化したことで、波形の一致度は低下している。しかしながら、ターゲットサイトとなるTKYH02観測点の観測記録を概ね再現することができている。また、時間の利得も得られていることが確認できた。

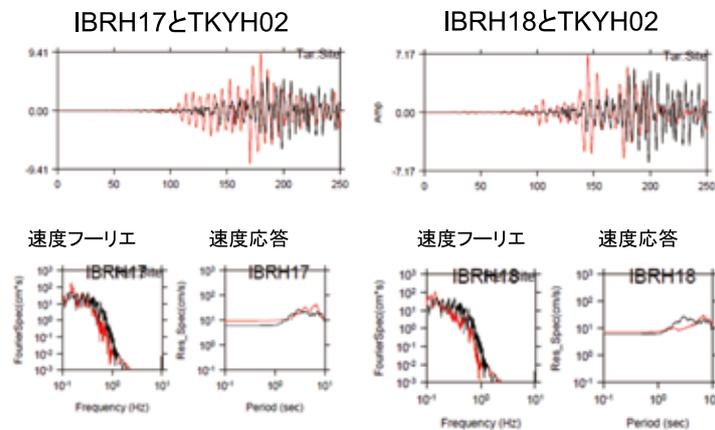


図5 観測波形と予測波形、観測速度フーリエスペクトルと予測波形の速度フーリエスペクトルおよび観測速度応答スペクトルと予測波形の速度応答スペクトルの比較 (右図) IBRH17とTKYH02、(左図) IBRH18とTKYH02の比較

4. まとめ

長周期地震動の即時予測を目的として、中規模地震の観測記録から、リファレンスサイトとターゲットサイト間の伝達関数を事前に求め、巨大地震(ここでは、東北地震)に対するターゲットサイトの地震動波形の予測の可能性の検討を試みた。ターゲットサイトにおける長周期地震動の予測のための伝達関数を精度よく推定するには、リファレンスサイトとターゲットサイトで、同一モードの表面波が卓越していることがのぞましい。一方で、時間利得を得るには、リファレンスサイトとターゲットサイトができるだけ離れてることがのぞましい。両者はTrade-offの関係となる。

伝達関数をIIRフィルター化することで、波形の一致は悪化するが、疑似速度応答で時間利得を得ることができる。