「波動伝播理論と震源の動力学に基づく耐震設計用地震動予測モデルの研究」

(河野允宏著 日本建築学会構造系論文報告集, 第424号, 1991年6月掲載)

「耐震設計用地震動予測モデルの有効性の検証(1)」に対する討論

(河野允宏著 日本建築学会構造系論文報告集, 第423号, 1991年5月掲載)

DISCUSSION ON "FORWARD PREDICTION MODEL OF EARTHQUAKE GROUND MOTION FOR SEISMIC DESIGN OF STRUCTURAL SYSTEMS ON THE BASIS OF WAVE PROPAGATION THEORY AND SOURCE DYNAMICS"

(Masahiro Kawano, Journal of Struct. Constr. Engng., AIJ, No.424, June, 1991)

"VALIDATION STUDY OF FORWARD PREDICTION MODEL OF EARTHQUAKE GROUND MOTION FOR SEISMIC DESIGN OF STRUCTURAL SYSTEMS (1)"

(Masahiro Kawano, Journal of Struct. Constr. Engng., AIJ, No.423, May, 1991)

佐藤俊明*

Toshiaki SATO

This paper presents the discussion to Prof. Kawano's papers (1991) in which a fundamental equation of theoretical ground motions was different from that has been established in long-period earthquake ground-motions in seismology. The discussed points are as follows:

① Why was a Green's function used instead of its spatial derivative that is equal to a double couple which expresses a dislocation on a fault?

② Why was a spatial derivative of a displacement source-function on a fault used instead of the displacement source-function?

Keywords: earthquake ground motion for seismic design, theoretical ground motion, fault model, Green's function, double couple

設計用地震動, 理論地震動, 断層モデル, グリーン関数, ダブルカップル

1. はじめに

耐震設計用地震動予測モデル作成を目的として, 波動伝播理論と震源の動力学に基づいた理論地震動の作成方法を示し, さらに実際に観測された地震動を対象としてその有効性を検証した上記2編の論文は, 理論的・物理的アプローチが少ない耐震設計用地震動予測モデルの研究の将来像, 方向性を示唆するものとして, 大変参考になりました。しかし, その内容に関しまして, 若干, 疑問な点がございましたので, お教え頂ければ幸いです。

なお, 以下の記述では, 1991年6月に掲載された「波動伝播理論と震源の動力学に基づく耐震設計用地震動予測モデルの研究」と題する論文を「第一の論文」, 1991年5月に掲載された「耐震設計用地震動予測モデル有効性の検証(1)」と題する論文を「第二の論文」と呼ぶ

ことにします。

2. 理論地震動の基礎式について

「第一の論文」の(9)~(10)式および「第二の論文」の(10)~(11)式は, 理論地震動を合成する際に出発点として用いた基礎式であります。これは長周期地震学の分野で従来から用いられている kinematic な式と異なっております。

具体的には, 「第一の論文」の18ページの(10)式を(9)式(「第二の論文」では24ページの(11)式を(10)式)に代入し, 断層長さ方向の summation を積分に置き換えて表示すると, 貴論文の震源モデルによる理論地震動の基礎式は次式となります。

* 清水建設(株)大崎研究室 研究員・工博

Research Engineer, Ohsaki Research Institute, Shimizu Corp., Dr. Eng.

$$Y_d(p:t:r) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_0^L \mu W[d(r', \tau)]_{,r'} \cdot G_d(p:t-\tau:r-r') dr' \dots (9)'$$

貴論文で、断層面上の点の位置を r_i としているところを上式では r' とし、 $0 \sim t$ の時間積分を $-\infty \sim \infty$ としています。その他の変数、記号については貴論文と同じです。したがって、 y_d, μ, L, W, d は、それぞれ観測点 r における変位、断層領域のせん断剛性、断層長さ、断層幅、断層上の点 r' における断層変位を表すものであり、記号 $[\]_{,r'}$ は空間に関する微分を表すものです。また、 G_d は、「第一の論文」の付録の (A1)～(A2) 式、および「第一の論文」の 111 ページの「5. 地震動の合成」中の記述に従えば、断層面上の点 r' にシングルフォースが作用したときの観測点 r における変位となります。

一方、「地震動は断層面上の変位の食い違いによって生じる波動である」と考えた場合の kinematic な理論地震動の基礎式は、例えば Aki, K. and P. G. Richards (1980) の Vol.1 の 39 ページの (3.2) 式あるいは 50 ページの (3.17) 式で記述されます。これらの式を貴論文の表記に従って、上記の (9)' 式に対応する形で表現すると次のようになります。

$$Y_d(p:t:r) = \int_{-\infty}^{\infty} d\tau \int_0^L \mu W[d(r', \tau)] \cdot [G_d(p:t-\tau:r-r')]_{,r'} dr' \dots (9)''$$

上記の (9)' 式と (9)'' 式とを見比べますと、次の二つの点で異なっていることがわかります。第一点はグリーン関数 G_d にかかわる問題であり、第二点は震源関数 d にかかわる問題です。

3. グリーン関数について

グリーン関数にかかわる数式上の相違は、(9)'' 式で $G_d(p:t-\tau:r-r')$ の空間に関する一階微分 $[G_d(p:t-\tau:r-r')]_{,r'}$ として表現されているところが、(9)' 式では $G_d(p:t-\tau:r-r')$ となっている点です。

この数式上の相違は物理的、現象論的な相違をもたらします。断層面における変位の食い違いと等価な物体力は、Aki, K. and P. G. Richards (1980) の Vol.1 の Chapter 3 に詳述されていますように、シングルフォースではなくダブルカップルで表されます。カップルは、シングルフォースを空間に関して一階微分することによって表現できます。したがって、理論地震動の基礎式においては、シングルフォースが震源に作用した時の観測点における応答を表す G_d ではなく、シングルフォースを震源位置で一階微分してカップルとした場合の観測点における応答を表す $[G_d]_{,r'}$ を用いるのが通例です。

これは地震動特性の観点から見ると次のようなことに

関係します。地震動の空間変化を規定する大きな要因の一つとして、断層面上における変位の食い違い（滑り）の方向すなわち震源メカニズムと観測点との幾何学的位置関係によって決まる地震波振幅の放射特性（ラディエーションパターン）があります。長周期領域では巨視的な震源メカニズムによる振幅の腹と節が明瞭に現れることは観測事実として確認されております。

理論地震動の計算に際して (9)'' 式ではなく (9)' 式を用いることは、ダブルカップルによるラディエーションパターンではなく、シングルフォースによるラディエーションパターンを表現することになると考えられます。

以上のことから、まず、「第一の論文」、「第二の論文」に共通することとして、次の点についてご教示頂ければ幸いです。

(a) 理論地震動の基礎式である「第一の論文」の (9), (10) 式あるいは「第二の論文」の (10), (11) 式において、グリーン関数の空間に関する一階微分ではなく、グリーン関数そのものを用いている点に関しまして、積極的な理由あるいは利点がありましたら、お教え頂ければ幸いです。

次に、「第一の論文」に関することとして、次の点についてご教示願えれば幸いです。

(b) 111 ページの右段に、「グリーン関数は、Fig. 2 の断層面において任意の方向に滑りがある場合、一般に付録 (A2) 式の U_r, U_s, U_z の線形結合で表現される。ここでは、Fig. 2 の断層面上で X を A' から B' へのみ滑りが発生する場合の U_r を想定している。」という記述から、滑りの方向がグリーン関数のシングルフォースの方向と対応すると解釈されます。断層面上における変位の食い違い、すなわち「滑り」は断層面を境にした hanging wall と footing wall との相対的動きとして規定されますが、論文中で述べられている「滑り」の方向、すなわちシングルフォースの方向は hanging wall と footing wall のどちらの wall を規準にして考えればよろしいのでしょうか。

さらに、「第二の論文」に関することとして、次の点についてお教え頂ければ幸いです。

(c) 19 ページの Fig. 5, 6 の「滑り力」は物理的にはどのように解釈すればよろしいのでしょうか。

4. 震源関数について

震源関数にかかわる数式上の相違は、(9)'' 式で $d(r': \tau)$ として表現されているところが、(9)' 式では $d(r': \tau)$ の断層位置 r' における空間微分 $[d(r': \tau)]_{,r'}$ となっている点です。

この数式上の相違も物理的、現象論的な相違をもたらします。(9)' 式の $[d(r': \tau)]_{,r'}$ は、断層変位 $d(r': \tau)$

の空間座標 r' に関する微分ですから、断層面におけるある時刻の滑りの空間変化を表すものです。したがって、(9)' 式で評価される地震動には、この滑りの空間変化分のみが寄与することになります。このことをスペクトルで考えますと、(9)' 式では、断層面における平均的な滑りの影響が大きくなる周期、すなわちコーナー周期付近からより長周期領域になるに従って、地震動レベルを過小評価することになると考えられます。また、その極限である振動数 $\omega=0$ におけるスペクトル値は地震モーメントに対応しますが、(9)' 式では、断層長さ L に関する積分を実行し $\omega=0$ とした場合、地震モーメント $\mu L W d$ は保存されないのではないかと思います。ちなみに、(9)" 式では $\mu L W d$ ($\omega=0$) が保存されます。

以上のことから、「第一の論文」および「第二の論文」に共通することとして、次の点についてご教示願えれば幸いです。

(a) 理論地震動の基礎式である「第一の論文」の(9)、(10)式あるいは「第二の論文」の(10)、(11)式において、断層変位そのものではなく、断層変位の断層上における一階微分を採用している点に関しまして、積極的な理由あるいは利点がありましたならば、お教え頂ければ幸いです。

さらに、「第二の論文」に関することとして、次の点についてご教示願えれば幸いです。

(b) 22 ページの「4.3 震源過程の Inversion と地震動の合成」の記述では、震源過程のインバージョンに用いた以下の(6)式

$$S_d(t) = \sum_{j=1}^N q_j S_{ej}(t - t_j) \dots \dots \dots (6)$$

の q_j を断層面要素 j 番目における有効力降下量としています。すなわち、震源過程のインバージョンでは、断層面上における有効力降下量 $q(x)$ が求められることとなります。しかし、滑り $d(x)$ を有効力降下量 $q(x)$ の関数として定義した(3)式を理論地震動の基礎式(10)、(11)式に代入した結果では、(6)式の q_j は有効力降下量の断層面上における一階微分に対応します。 q_j はどのような量と考えたらよろしいのでしょうか。

5. まとめ

耐震設計用地震動を考える上で重要な地震動の短周期領域の取り扱い方は、理論的な面では既に確立された長周期領域の取り扱い方とは異なり、いまだ研究途上であり、不明な点多々ある状況と認識しております。さらに、地震動の短周期領域では長周期領域で確立された概念が逆に悪さをすることも考えられます。上記で述べたことは、地震動の長周期領域ではいくつかの問題点を生じさせる可能性が考えられますが、地震動の短周期領域を対象とした場合にはどのようなことになるのか分かりません。このような観点から、上記で述べたことに関してお教え頂ければ幸いです。

参考文献

- 1) Aki, K. and P.G. Richards: Quantitative seismology theory and methods, W.H. Freeman & Company, Vol. I, 1980

(1992 年 5 月 28 日原稿受理)

論文集委員会

質疑討論に対する回答を著者に求めたところ、著者から回答が無かったので、4 人の審査員に所感を依頼した。その内、1 名より寄稿があった。

波動伝播理論と震源の動力学に基づく耐震設計用地震動予測モデルの研究
(日本建築学会構造系論文報告集, 第 424 号, 1991 年 6 月掲載)

A 審査員 寄稿があった。

B 審査員 寄稿がなかった。

耐震設計用地震動予測モデルの有効性の検証 (1)

(日本建築学会構造系論文報告集, 第 423 号, 1991 年 5 月掲載)

A 審査員 寄稿がなかった。

B 審査員 寄稿がなかった。

著者の論文は、耐震設計用の地震動予測モデルに関する研究であり、現在、関係学会の主要な研究テーマとなっている。著者の研究は、著者の「ある着想」に基づいたものであり、その着想を検証する意味で、簡単なモデルによって説明を行い、現実の地震動特性の構成のある程度の見通しを示すことにあった。

著者は、質疑討論に対する回答を辞退しているが、著者の研究を更に進展させることによって、今回の質疑に答えようとするものであると述べている。

自然現象である地震動を予想するモデルの確立の難問と取り組んでいる著者の現段階における回答辞退を肯定し、次の論文が回答ともなることに期待したい。