内藤幸雄氏の討論に対する回答

THE AUTHOR'S ANSWER TO DISCUSSION BY YUKIO NAITO
(Yukio NAITO, J. Struct. Constr. Eng., AIJ, Vol. 78, No. 684, 405-406, Feb., 2013)笠井和彦^{*1}, 村田真一郎^{*2}, 加藤史人^{*3}, 引野剛^{*4}, 大木洋司^{*5}*Kazuhiko KASAI, Shinichiro MURATA, Fumito KATO,
Tsuyoshi HIKINO and Yoji OOKI*

The method proposed by the writers is based on the pioneering work of the discussor who earlier proposed a different system identification method. The validity and usefulness of the writers' method are accepted by the discussor. However, the writers' comments on other possible methods are criticized by the discussor. The present answer clarifies contrasting difference of concepts by both parties, and provides a challenging opinion: the writers consider importance of accuracy of the method, justifying the use of the input/output relationship not necessarily qualified by the discussor as the true "transfer function". Other points are also answered.

Keywords: shake table test, table rocking motion, system identification, transfer function, building modal properties

震動台実験, 震動台の回転, システム同定, 伝達関数, 建物モード特性

1. はじめに

討論者のご意見は、原著論文で筆者らが提案した同定法と式(11)の正当性・妥当性は認めるが、他の手法やそれらの式(15), (18)などに関する記述に異を唱えたいので注記した、という主旨であると解釈しました。筆者らの同定法は、討論者が先駆的に提案された同定法を原点としており、ご意見を頂き誠に光栄です。また、貴討論のおかげで、筆者らが以前感じました討論者との思想の違いも明らかになり、ここで議論できますことを喜ばしく思います。

以後の各節の番号は貴討論の節番号と合せ、各節の題は、貴討論の題に対応した表現としております。式番号は全て原著論文のものです。

2. 出力測定点の高さをとる方が自然で物理的根拠がある

原著 3.2 節「他の同定法」の方法(ii)に対し、貴討論は、式(18)は物理的根拠をもたない、また、(出力)/(入力)の演算が伝達関数として成り立つためには、その系の応答(出力)がその(入力)のみで規定されるとの条件が必要になるとしています。討論者の言われる「物理的根拠をもつ」の意味が不明ですが、以後は伝達関数として成立することと解釈致します。

方法(ii)は、演算の難しさのため提案を断念しましたが、討論者の批判以上の意義をもつと考えます。まず、この方法(ii)、筆者らが提

案した方法、討論者が提案した方法、震動台の回転を加味しない既往方法それぞれの基本式(18), (11), (21), (15)を、原著論文から抜粋して以下に並べ直します(各量の定義については、貴討論や原著論文を参照ください)。

方法(ii)の基本式:

$$G_k(\omega) = \frac{\ddot{u}_{tot,k}}{\ddot{u}_g + H_k \ddot{\theta}_g} \quad (18)$$

筆者らが提案した方法の基本式:

$$G_{k,j}(\omega) = \frac{\ddot{u}_{tot,k}}{\ddot{u}_g + H_{eq,j} \ddot{\theta}_g} \quad (11)$$

討論者が提案した方法の基本式:

$$G_j(\omega) = \frac{\ddot{q}_{0j} + \ddot{u}_g + H_{eq,j} \ddot{\theta}_g}{\ddot{u}_g + H_{eq,j} \ddot{\theta}_g} \quad (21)$$

震動台回転を加味しない既往方法の基本式:

$$G_k(\omega) = \frac{\ddot{u}_{tot,k}}{\ddot{u}_g} \quad (15)$$

方法(ii)で重要なことは、建物 k 層の絶対水平加速度応答と、台の水平・回転による k 層の絶対水平加速度をそれぞれ出力、入力と考えたために(式(18))、それらのスペクトル比が計測された物理量のみから構成されることです。

これと対比して、筆者らや討論者が提案した方法(式(11), (21))

*1 東京工業大学建築物理研究センター 教授・Ph. D.

*2 東京工業大学人間環境システム専攻 大学院生

*3 元 東京工業大学人間環境システム専攻 大学院生

*4 元 防災科学技術研究所兵庫県耐震工学センター 研究員

*5 東京工業大学人間環境システム専攻 特任助教

Prof., Structural Engineering Research Center, Tokyo Institute of Technology, Ph. D.
Graduate Student, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology
Former Graduate Student, Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology
Researcher, Hyogo Earthquake Engineering Research Center, NIED
Assist. Prof., Dept. of Built Environment, Tokyo Institute of Technology

が、どちらも j 次モード等価高さ H_{eqj} を入力部分に含み、また、討論者の同定法 (式(21)) は、さらに j 次モード加速度応答を出力部分に含んでいます。つまり、物理量の計測値だけ用いることと対比し、同定前のため予想せざるを得ないモード特性の値まで用いています。

原著論文どおり、等価高さの予想の精度は比較的安定しますが、 j 次のモード加速度応答の時刻歴は、通常は予想が困難です。このため、討論者の式(21) は仮定された出力を計測値としてスペクトル比の算定に用いていると言え、その結果生じる誤差は不明です。線形かつ比例減衰系のモードの仮定も含まれることもあり、入力・出力の変更を極力避けるべきと考えます。

その意味で、方法(ii)の式(18)は有意義であり、また、 k 層高さもモード分解できるため (原著式(8c))、スペクトル比 (原著式(20)) を周期・減衰定数・振動モードといったモード特性で構成された原著式(19)に既に変換できており、その演算の問題解決のみ残されている状態です。伝達関数として成立するか否かに拘ったのが討論者の式(21)ですが、上述の理由から、それを「物理的根拠」の条件とは考え難く、一方で出力測定点の高さとその測定データを変更なく用いる式(18)の方が、よりその意味を持つのではないかと思っています。

3. 基礎式(11)の正当性、妥当性として

討論者のご指摘通り、筆者らが提案しました基本式(11)と同定法は、原著式(8), (9)を活用して、スペクトル比の出力にあたる部分を完全に物理量で表すことに成功しましたため、既往同定法に比べ優位であると考えます。ただし、入力に関する部分は、前述のように概ね予測できるとはいえ、各モードの等価高さを用いていますため、今後改善を考えていきます。

4. 台回転を加味しない既往方法に関する追記

原著 3.2 節「他の同定法」のご指摘いただいた式(15)は、台回転を考えない周知の方法の式であり、使用すべきではない旨の記述を原著 1.1 節や複数の箇所で行っております。討論者のご指摘のように、原著論文が対象としたケースについては、「入力の要件（そのみで応答が規定される）が満たされないから原理的に誤りと断定」してよいと考えます。ただし、現在まで典型的に式(15)で行われてきた同定の結果が、どれほどの誤差を有するかを示すため、原著論文ではそれを詳細に述べております。

また、数学上のモデルと異なり、実際の複雑な構造物では、「入力」の定義自体が難しい場合もあります。原著論文では、台水平成分と回転成分のみで入力と考慮しましたが、台そのものが変形した場合も含め、他の物理量が出てくるケースもあると思います。さらに、前述の線形かつ比例減衰系のモードの仮定もあり、以上が入力・出力の値に複雑に影響しますので、その意味で、「実行してみて、結果が悪かったから」という理由は、現実的な判断として常に必要と思われる。

5. 参考文献

以後、断りの無い限り、貴討論の参考文献番号に言及します。文献 1 は討論者による論文で、原著論文で最も言及しました。また、文献 1 は文献 4, 5 に言及していましたので、それらも検討しました

が、本同定法の観点から原著論文には引用不要と考えました。文献 2, 3 については未調査でしたが、これらも含めいずれの論文も、文献 1 を除き、台回転を考えない周知の方法に多少の修正を施して台回転の影響を加味するという本研究の方向と対比して、かなり異なる内容のものでした。また、他の文献も調べ、例えば本回答書末尾に示しました文献 A1 が引用する同分野の多数の論文などでも、原著論文と内容が重複しないことは確認しました。

6. 補足的説明

討論者が言われる内容は、もちろん本検討の背景となったものであり、原著論文の 1 章で詳細に述べております。また、式(11), (15), (21) がどのように図 A, B, C と関連付けられるかについては、討論者の記述からだけでは理解できませんでしたことをご了承ください。なお、貴討論の末尾の「台の回転特性と試験体の振動特性が総合された特性が得られ・・・その観点からは有用なデータと言えます。」についても、台の水平・回転運動の制御機構が一定の特性を有していないため、有用性のほどは不確かであり、賛同いたしかねます。

7. おわりに

貴重なご意見・ご指摘に感謝いたします。

スペクトル比を計測された物理量のみで構成することの重要性を筆者らは主張しており、方法(ii)の記述で「より自然な伝達関数」と呼んだのは、以上の理由からです。ただし、討論者が言われる「その系の応答 (出力) がその (入力) のみで規定される」という条件は、「規定」の意味が不確かですが満たさないと考えられます。一方で出力と入力それぞれ複数存在するとき、それら個々の出力と入力の「伝達関数」と呼ぶことが可能と考えましたが、伝達関数ではなくスペクトル比と呼ぶべきであったかも知れません。

しかし、いずれにせよスペクトル比が真の伝達関数か否かという論議は重要ではなく、定式化と演算の考え方として、**周波数領域において、入力・出力などの物理量で構成された式と、周期・減衰定数・振動モードといったモード特性で構成された式との変換則を築き、それに物理量の計測値を代入してモード特性の値を得るという表現が適切**と思います。上記では「構成された式」と表現し、「構成された伝達関数」とは書いておりません。

すなわち、討論者の思想と異なり、伝達関数か否かにこだわりスペクトル比の形式を限定し、それに適合するよう入力・出力を同定前に変えるため精度が犠牲になるのであれば、伝達関数の定義に固執する必要は無いと考えます。同定法で最も重要なのは精度であり、数学的に間違いなく、かつモード特性値の簡便な算定を可能にする基本式を工夫により構成し、それを用いて精度が明らかな数学的方法のみで未知数（特性値）を決めることが肝要と考えます。

参考文献

A1) Chi-Chang Lin, Jer-Fu, Wang and Cheng-Hsing Tsai, Dynamic Parameter Identification for Irregular Buildings Considering Soil-Structure Interaction Effects, Earthquake Spectra, Volume 24, No.3, Pages 641-666, August 2008, Earthquake Engineering Research Institute

(2012年11月25日原稿受理, 2012年11月27日採用決定)