常時微動から求めた建物の伝達関数が風の影響で見かけ上変化するメカニズムの検討

TRANSFER FUNCTION DEFORMATION MECHANISM DUE TO WIND FORCE EFFECT ON BUILDINGS DURING MICROTREMORS

内藤 幸雄*, 石橋 敏久**

Yukio NAITO and Toshihisa ISHIBASHI

System identification using a transfer function obtained from the spectral ratio for buildings during microtremors and with soil-structure interaction has advantages and disadvantages. The advantages are that the vibration modes and dynamic characteristics of the buildings themselves can be obtained under small wind velocity conditions. A disadvantage is that the wind force deforms the spectral ratio. This paper describes a study of this phenomena. Three factors were studied: the existence of upper input forces, simultaneous upper and lower input situation, and relation (dependence or independence) between two input forces. Furthermore, it was explained mathematically that the relative magnitudes of base movements due to the upper and lower input forces control this phenomena.

Keywords : microtremor, transfer function, damping factor, wind force

常時微動、伝達関数、減衰定数、風外力

1. はじめに

常時微動から建物の振動特性とくに伝達関数を推定しようとする場合、地盤・建物相互作用が存在する事、風外力が存在し、この分布状態の正確な測定が不可能な事、相互作用を含む視野で考えた場合の自由地表面の地動いわゆるばね外力に相当する地動を正確には知り難い事、等の原因が伝達関数の正確な推定を困難にしている。

本論では、構造物主要部や基礎の動きの観測結果から構造物の振動特性を推定する事に主眼がある。地盤・構造物の特性や入力を与えられ応答を求める問題の定式化としてはLucoの文献¹⁾があるが、本論はこれと逆方向のアプローチであると言う事ができる。本論の主眼を明確にするために、検討の対象とする系を図1の2自由度系に単純化し、Lucoの定式化にならったブロック線図を作ると図2を得る。図から上部入力 f_s がない場合すなわち地動入力または基礎加振の場合には上部構造の応答 $(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_b + \ddot{y})$ と基礎の応答 $(\ddot{x}_b + \ddot{y})$ から上部構造物の特性 $((2h_1\omega_s + \omega_p^2)/(s^2 + 2h_1\omega_s + \omega_p^2))$ が求まるが、上部質点への入力 f_s が存在ししかも測定不能である場合には、上部構造物の伝達関数を正確には知り得ない事が分かる。すなわち、(上部質点応答/基礎応答)をもって上部構造の伝達関数を求めようとしても、基礎応答以外のもう一つの入力(上部入力)を無視している事になり

不可能であると言える。一方 f_s が既知の場合には文献²⁾と同様の方法により、 $(\ddot{x}_1 + \ddot{x}_b + \ddot{y} - f_s/m_1)$ と $(\ddot{x}_b + \ddot{y} - f_s/m_1)$ の比から上部構造の特性が求まる。

以上の事から、下部(地動)入力以外に上部入力が存在しこれが不可知である時相互作用を有する系の上部構造のみの伝達関数を求める事はできない、と考えればこれ以上の議論はあり得ない訳であり上記が伝達関数が見かけ上変化するメカニズムのすべてであるが、本論では上部入力の影響を誤差と見なした場合の許容誤差の観点から、すなわち2入力がある場合でも応答比をもって近似的に伝達関数として使おうとの立場から、このメカニズムに関し検討する。具体的には、メカニズムの構成要素を、上部入力の存在、上部入力と下部入力の同時存在、両入力の関係(独立か非独立か)に分け、各要素と現象発生との関連性を検討する。許容誤差・適用限界を定量的に求める作業は本論以降の検討課題とし、本論では、各要素が種々の条件にある時にどのような現象が生ずるか、その理由はなにか、と言った点を中心に検討する。

構造物の特性を推定する方法としては応答比から伝達関数を求める方法の他、応答そのものからパワースペクトルやRD法³⁾により特性を推定する事も行われており、後者の応答そのものから推定す

* 鹿島技術研究所 主管研究員・工博

** 鹿島技術研究所 主任研究員・理修

Chief Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, Dr. Eng.
Senior Research Engineer, Kajima Technical Research Institute, M. Sci.

図1 検討対象を単純化した2自由度系

図3 測定対象建物

図5 シミュレーションモデル

る方法からは構造物-地盤連成系としての特性が求まる。しかしながら応答比による伝達関数は、1) 上部質点に測定不能な外力 f_s が加わらない場合には、構造物-地盤連成系ではなく上部構造のみの特性が求まる、2) 各点の振幅比のみでなく位相差も得られる事から振動モードが求まる、3) 入力ホワイトノイズ的か否かを心配する必要がない、等の利点を有しており、特性推定のため、できる限り応答比による伝達関数も用いるべきと考えている。

筆者らは既報^{4)~6)}で、風速の異なる条件下での18階建集合住宅(図3)の常時微動と頂部の風向・風速の観測と分析を行い、1) 風は主に建物の1次振動に影響を与える、2) 観測から得られる1次振動数は風速が変わっても殆ど変化しない、3) 頂部応答のパワースペクトルから得られる減衰定数は風速の影響を受けにくい、伝達関数(応答比)からハーフパワー法(1/√2)法で得た減衰定数は風速が大きいとピークの幅が広がるため増大する(図4)、4) スウェイ・ロッキングばねを持つ質点系モデル(図5)でこれらの現象が良く再現される、5) 二層地盤から成る波動モデル(図6)でも類似の現象が確認される、等の結論を得た。つまり、風外力による応答比の変化としては、ピーク振動数は殆ど変化しないものの減衰定数が見かけ上大きくなるようなピーク形状の変化が生ずる事およびこの現象は数学モデルで説明できる事が分かった、と言える。従って本論では、特にこの減衰定数の増大に関わるピーク形状の変化に関し検討する。

応答比による伝達関数が風外力の存在により変化する上記の現象は、前述のように図2のブロック線図すなわちシステムが本来持っている構造に由来し、そのメカニズムを構成する要素を本論では、上部入力の存在、上部・下部入力の同時存在、両入力間の関係の3者に分けた。この分解に基づき、以下の3つの状態を想定した解析

図2 検討対象の系のブロック線図

(a) 弱風時(風速1.5m/s) (b) 強風時(風速13.2m/s)

図4 実測結果による伝達関数

(a) 半無限二層地盤モデル (b) 地盤建物モデル

図6 建屋・地盤系の半無限二層地盤へのモデル化

図7 風外力のみを受ける系の伝達関数

的検討を行う。

- 1) 地盤・建物相互作用を有する系が上部入力（風外力）を受ける場合
- 2) 上部・下部の2入力（風外力と地盤の微振動）を受けこれらが独立でない場合
- 3) 上部・下部の2入力（風外力と地盤の微振動）を受けこれらが独立な場合

2. 上部入力のみが存在する系の応答と伝達関数

本章では質点系モデルを中心に検討し、また実測やシミュレーションモデルによる結果を基に高次振動までに関し論ずる。上部入力としては、風外力の場合と、頂部のみに正弦波入力を受ける場合を検討する。頂部正弦波は上部入力の極限的形態である。一方風外力は上部入力ではあるものの、質点間の相関（コヒーレンス・位相差）が規定されている分布荷重である事から、基礎を含め全質点に同位相の力が加わる下部入力との中間的な性格も有すると言える。

2.1 風外力のみを受けるスウェイ・ロッキングばね付多質点系

既報⁴⁾では図5に示したスウェイ・ロッキングばねを有する曲げせん断質点系モデルを用い、また地動加速度と風速の大きさの組み合わせを種々変化したシミュレーション解析を行い、実測結果の現象が良く再現される事を見た。従って本論で検討する現象の要因は、このモデルに含まれていると考える事ができる。ここでは、極端な例を解析的に検討し現象の理解を助けるため、風速が大きく

地動加速度による慣性力が相対的に無視し得る場合の極限的なシミュレーションの例として、風による外力のみを受ける上記の系の伝達関数を検討する。

多質点系⁴⁾の主な特徴は、1) 基礎（7640ton）と上部の19質点（18階部分）の総重量（6520ton）がほぼ等しい、2) 基礎固定時の1次共振点は1.05Hz、減衰定数1.0%、地盤と杭を考慮したスウェイ・ロッキングばね付で1次共振点1.02Hz、減衰定数1.4%である、等である。この多質点系モデルに、文献4)に示された、各層間のコヒーレンスと位相差を与えられた平均風速15m/s相当の風外力を加え頂部と基礎の水平動の比を取り伝達関数（以下、この比を伝達関数と呼ぶ）を求めたところ、図7の結果を得た。また比較のため、地動入力のみの場合、同じ15m/sの風外力および平均風速5m/sの風外力と同時に0.002Gal rms値の地動加速度を与えられた場合（文献4のケースb、ケースeに相当）、および風速3.6m/s、12.5m/s、13.2m/sの実測結果を図8に示した。

風速最大の13.2m/sの実測結果では約3.5Hz以上はS/N比が悪く、有意な情報を含んでいないと考えられる。この事から、強風時および弱風時の、高振動数域のS/N比の良い代表的なケースとして風速12.5m/s（図8. e）と3.6m/s（図8. d）の結果を選んで示した。これらの結果から以下の事が言える。

・ 風外力のみを受けるモデルの図7の結果において、基礎固定時1次共振点（1.05Hz）付近の状態は、図8の、強風時の実測(f)やシミュレーション(c)の結果との類似性を有する。即ち振幅のピー

図8 風外力が異なる場合の伝達関数の変化

表1 質点系モデルの概要

		19 質点系	4 質点系	1 質点系
上部構造	各質点重量 (ton)	300	1325	4735
	各質点ばね (tonf/cm)	1862	442	191
	減衰係数/ばね (sec)	0.0031831	0.0031831	0.0031831
基礎	重量 (ton)	8000	8000	8000
	スウェイばね (tonf/cm)	2905	2905	2905
	減衰係数/ばね (sec)	0.031831	0.031831	0.031831
1 次	共振振動数 (Hz)	0.965	0.965	0.965
	減衰定数 (%)	1.62	1.61	1.60

図10 質点系モデル上部正弦波入力の結果

クの広がり方は、風のためのシミュレーション（図7）、強風時シミュレーション（図8. c）、強風時実測（図8. f）の順で顕著であるが、無風時や弱風時（図8. a, b, d）に比較して極めて広がっている点で共通性がある。

- ・ 位相は、無風・弱風時には0°から180°（高次では0°から180°あるいは-180°から0°）に変化するのに対し、強風時には逆に0°から-180°、180°から0°に変化する点で図7、図8. c、e、fとも共通性がある。図7と図8. cでは全体にこの傾向が見られ、図8. fでは4Hz付近まで、また図8. eでは2Hz付近までこの傾向が見られる。さらにこうした強風時あるいは風外力のみによる位相の変化は、無風時や弱風時のような振幅のピーク付近ではなく、振幅の谷付近で生じている点で、図7、図8. c、e、fに共通性がある。

- ・ 以上、風外力のみを受ける系の頂部と基礎の応答比から伝達関数を求めると、強風時の伝達関数と同様にピークの幅が広がりまた振幅の谷で位相が基礎固定時とは逆方向に変化する現象が確認された。

2.2 頂部に正弦波入力を受ける系の応答と伝達関数

(1) モデルの概要

上部入力のもう1つの例として、頂部のみに正弦波入力を受ける系を考え、頂部と基礎の応答比から伝達関数を求める場合を検討する。これは、上部入力の最も極端な状態を検討する事により、地動と風外力がある場合の応答比のピーク形状の変化のメカニズム理解を助けようとするものである。図9に示すように、質点系モデルとしては、それぞれ19質点、4質点、1質点と基礎から成るせん断系を考える。以下では、19質点系など、基礎を省略して呼ぶ。これらの系では、水平自由度のみを考慮する。基礎重量は、シミュレーションモデル（図5）とほぼ同一である。スウェイばねは、文献7）の

考え方に従い、シミュレーションモデルのスウェイ・ロッキングばねを等価変換して求めた。等分布とした各質点重量は下記(1)式により、4質点系、1質点系が19質点系と等価になるように定めた。(1)式は、減衰定数が同じ場合、一次モードによる共振点のベースシャーが同一になるような考えに基づくものである。

$$\frac{M}{n} \left(\sum_{r=1}^n X_{r1} \right)^2 / \left(\sum_{r=1}^n X_{r1}^2 \right) = \text{const.} \quad (1)$$

ここで、
M : 上部質点総重量
n : 上部質点数
 X_{r1} : 1次モードのr番目質点の振幅

こうして求められた質量に対し、基礎固定時の共振点が振動数1Hz、減衰定数が1%になるように各層の剛性と減衰を定めた。表1にこれらの結果をまとめて示す。なお本論の他の部分の検討では粘性減衰を用いているが、本2.2章では高振動数域の性質を見るために複素減衰を用いた。

(2) 伝達関数と応答

上記の3種のモデルの頂部に1tonfの正弦波加力を行った。伝達関数を図10. aに、頂部質点の応答を図10. bに示す。応答の位相は、加振力に対する位相遅れを表す。これから以下が言える。

- ・ 19質点系の伝達関数は、図7の風外力のみの場合や図8. c、e、fの強風時の場合と類似性がある。基礎固定時の1次共振点に相当する1Hz付近の振幅の様子はピークが広がるのではなく消失してしまうなど若干異なるものの、振幅の谷が存在する振動数や状況、1Hz付近では位相が0に近く、振幅が谷となる振動数において主として位相が急変する点などに関しては類似性が強い。
- ・ 4質点系と1質点系の伝達関数では19質点系と比較し低振動数域で、図7の風外力のみの場合や図8. c、e、fの強風時の場合との類似性がある。
- ・ 頂部の応答（図10. b）は伝達関数とは様相が異なる。各モデルとも表1に示した連成系の1次振動数(0.965Hz)で振幅のピークを示す。
- ・ 以上、頂部に正弦波加力を受ける上部入力状態で頂部と基礎との応答比を伝達関数と見なし、図8. aのような真の伝達関数や図7、8の強風時、風外力のみを受ける場合との比較を行った。その結果、実測・強風時シミュレーション、風外力のみ、頂部正弦波加力と、現象が次第に極端になったり異なったりする傾向はあるものの、これらを通し一定の傾向が見られた。なお図10の1質点系伝達関数に関しては、図14、15に関連し後に再び論ずる。

2.3 上部入力時の伝達関数の検討結果のまとめ

以上の検討から下記が言える。

- ・ 上部構造に風外力のみが働く場合、頂部に正弦波入力がかかる場合を総合し、地盤・建物相互作用を有する系が上部入力を受けると、強風時に伝達関数の形状が変化するのと類似の現象が生ずる事が分かった。
- ・ 風外力のみが働く場合の結果では、振幅と位相の双方の形状に実測結果との類似がみられた。ピークが広がる振幅の形状の変化の程度は、風と地動が外力として働く実測結果と比較し、風外力のみの解析結果の方が大きい。
- ・ 頂部に正弦波入力がかかる場合の結果では、位相は実測結果と類似であるものの、1次の振幅の形状に関しては相違がある。しかしながら、無風時に得られる真の伝達関数から大きく変化し鋭いピークが見られなくなる点では共通性がある。

3. 上部と地動の正弦波入力が存在する系の応答と伝達関数

第1章で示した場合分けに従い、位相差を与えた、すなわち独立でない正弦波の2入力で伝達関数のピークが広がり位相も変化する現象が再現されるか否かを確認する。また19質点など多質点系モデルでは上部入力のみでも伝達関数の形状が変化する現象が再現されるのが前章で確認された事と、単純化のため、以降の検討は図11の1質点系で行う。モデルの定数は表1と同じである。地動は1 Gal, 頂部への加力は5tonf、10tonf、20tonf、あるいは50tonfとする。その他、入力間の位相差を5°づつパラメータとして変化させた。

(a) 伝達関数

(b) 頂部応答

図12 地動と頂部の正弦波入力による結果 (位相差0°、180°)

(a) 伝達関数

(b) 頂部応答

図13 地動と頂部の正弦波入力による結果 (上部入力20tonf)

まず、位相差0°あるいは180°で、上部加力が5、10、20、50tonfの場合の結果を図12に示した。また上部加力が20tonfで、位相差を段階的に45°づつ変化させた場合の結果を図13に示した。頂部応答の位相は地動に対する位相遅れである。これらから以下の事が言える。

- ・ 伝達関数のピークは振動数、振幅の大きさとも2入力により変化する。振動数の変化は上部入力が高い程顕著である。位相は地動入力のみの場合には0°から+180°に変化するのに対し、これと類似の変化の他、-180°方向への変化や、ピークより低振動数で一旦-180°側に变化した後0°付近にもどる等、複雑な性状を示す。これらは、2入力間の位相差により、それぞれの入力に対する応答にも複雑な位相差が生じた事によると考えられる。
- ・ 伝達関数の位相に関し、0°から-180°方向への変化が見られる点は実測結果と共通の傾向である。ただし、実測結果ではピーク付近より高い振動数で位相が変化するのに対し、ピーク付近で位相が変化している点が異なる。
- ・ 実測結果と似た傾向を示し注目すべき点として、2入力となる事により、また上部入力が高い程ピークが広がる点、0°から-180°方向への位相の変化が現れる点、があげられる。
- ・ 上部質点の応答は、上部入力の大きさによりピークの大きさは異なるが、ピークの振動数は表1に示した連成系の1次の振動数(0.965Hz)と一致している。

図14 位相差5° ごとの伝達関数の平均

(a) 伝達関数の平均 (b) 下部入力時伝達関数 (c) クロス／パワー

図15 異なる方法で求めた伝達関数の比較

図16 B₁, B₂の大小による積分結果

次に、上部入力5～50tonの各ケースに関し、地動と上部入力の位相差5° ごとの伝達関数を複素数として足し合わせ平均した。この平均操作は、ある面で実測結果のデータ解析の過程と類似性を有する。データ解析では1区間100秒(40.96Hzサンプリング)のデータを36区間用いアンサンブル平均を行っている。^{4),5)}ノイズと信号の独立性等を前提としている訳であるが、別の面から見れば有限区間長・有限区間数の平均を計算しているにすぎないとの見方も可能であり、区間ごとに上部・地動入力間の位相差は当然異なっている事から、本章で行った平均の計算と、データ解析における平均の計算に類似性があると言える。

位相差5° ごとの伝達関数の平均により図14の結果が得られた。この図から以下が言える。

- ・ 上部入力の存在によりピークの幅が広がる。その程度は、上部入力が高い程顕著である。広がり方は左右均等ではなく、やや高振動数側に片寄っている。
- ・ ピークの高さは、上部入力の大きさによらずほぼ一定である。
- ・ ピーク付近では位相は0° 付近から-180° へも変化する。位相が変化する振動数は、ピークの高振動数側の端部付近である。
- ・ 実測結果との共通点としては、上部入力が大きくなるとピークの幅が広がる点、位相が0° 付近から-180° へも変化する点、位相変化の振動数が基礎固定時の共振振動数より高振動数側に変わる点、これらの現象が上部入力が高いほど顕著である点、等があげられる。

さらに、図14の応答倍率において、低振動数側からある振動数までは下部入力の場合の伝達関数上にあり、ある振動数範囲で上部入力の場合の伝達関数上に移動した後、再び下部入力伝達関数上に戻る点に着目し、また伝達関数の平均でなく実測のデータ解析と同様のパワースペクトル・クロススペクトルに相当する量の平均を求めた後に比をとって得た伝達関数はどうなるか

を確認するため、図15に、(a)図14に上部入力時の振幅を加えたもの、(b)下部入力時、(c)上部・下部入力時応答の(クロススペクトル／パワースペクトル)を示した。これから以下が言える。

- ・ 伝達関数をとってから平均した場合の応答倍率は、下部入力時ピークのやや低い振動数までは下部入力時伝達関数上にあった後に上部入力時伝達関数上にジャンプし、下部入力時ピークのやや高い振動数で再び下部入力時伝達関数上に戻る。
 - ・ クロス／パワーによる伝達関数は、上部入力が高いほど幅が広い点、ピーク高さが上部入力のみの場合とほぼ一致している点など、伝達関数を平均したものとの類似点がある。また上部入力が高い程幅が広い現象は、実測結果と極めて類似している。
- 上記現象のメカニズムは、数学的に以下のように説明し得る。

(1) 伝達関数の平均の場合

ある振動数における平均Sは、無限個の平均として位相差θが0から2πまでの積分を考えると下記(2)式で表す事ができる。

$$S = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{T_1 e^{i\theta} + T_2}{B_1 e^{i\theta} + B_2} d\theta$$

$$= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{T_1}{B_1 + B_2 e^{-i\theta}} d\theta + \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{T_2}{B_1 e^{i\theta} + B_2} d\theta \quad (2)$$

ここで T₁: 上部入力時頂部応答 (複素数、以下同)

T₂: 下部入力時頂部応答

B₁: 上部入力時下部応答

B₂: 下部入力時下部応答

(2)式の積分は複素変数の積分に変換でき、(2)式第1項をS₁、第2項をS₂とするとS₁は|B₁|・|B₂|の大小により以下のように求まる。

1) |B₁| > |B₂| (B₁ + B₂e^{-iθ}が原点を含まない場合)

B₁ + B₂e^{-iθ} = ζ とおくと dθ = -dζ / B₂(sinθ + i cosθ) より

$$S_1 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{T_1 d\theta}{B_1 + B_2 e^{-i\theta}} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\gamma} \frac{T_1 d\zeta}{B_2 (\sin\theta + i \cos\theta) \zeta}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \oint_{\gamma} \frac{T_1 d\zeta}{i e^{-i\theta} B_2 \zeta} = \frac{1}{2\pi} \oint_{\gamma} \frac{T_1 d\zeta}{i (\zeta - B_1) \zeta}$$

$$= \frac{1}{2\pi} \cdot 2\pi i \frac{T_1}{i B_1} = \frac{T_1}{B_1} \quad (3)$$

図17 基礎の動きの大小関係の変換する振動数と基礎の動き

上記の最後の部分は、 $f(\zeta) = T_1 / i\zeta$ としてコーシーの積分表示

$$f(\alpha) = \frac{1}{2\pi i} \oint_C \frac{f(z)}{z - \alpha} dz \text{ を用いた事による。}$$

$$2) |B_1| < |B_2| \text{ (} B_1 + B_2 e^{-i\theta} \text{ が原点を含む場合)}$$

上記と同様の計算により、また積分が留数の和で表される事から

$$S_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot 2\pi i \cdot \frac{T_1}{iB_1} + \frac{1}{2\pi} \cdot 2\pi i \cdot \frac{T_1}{i(-B_1)} = 0 \quad (4)$$

S_2 に関しても同様の計算を行うと、 $|B_1| > |B_2|$ の場合 $S_2 = 0$ 、 $|B_1| < |B_2|$ の場合 $S_2 = T_2/B_2$ が得られ、これらを図示すると結局図16が得られた。また図14に関し B_1 、 B_2 に相当する量を求め、これらの大小関係が変換する振動数を図示すると図17となる。

(2) (クロススペクトルの平均) / (パワースペクトルの平均) の場合

この場合も、ある振動数における値 S' は、上記と同様に考え下式で与えられる。この式からは、上記のような簡明な結論を数学的に導く事は困難である。

$$S' = \frac{\int_0^{2\pi} (T_1 e^{i\theta} + T_2)(B_1 e^{i\theta} + B_2)^* d\theta}{\int_0^{2\pi} |B_1 e^{i\theta} + B_2|^2 d\theta} \quad (5)$$

以上、(1)、(2)の検討から、以下が言える。

- ・ 伝達関数の平均に見られる現象は数学的に説明可能である。下部入力による基礎の動きが上部入力による動きより大きい場合には下部入力時伝達関数と等しく、逆の場合には上部入力時の伝達関数と等しい。なお図15に見られる理論値との差は、連続関数の積分でなく 5° きざみの平均をとった事によると考えられる。また2入力間の位相差が $0 \sim 2\pi$ の間で均等に分布すると仮定し位相差に関する積分(平均)が数学的操作の中で重要であった事から、位相差の分布状態が現象の発生に重要な役割を果たす事が分

かったと言える。

- ・ クロス/パワーに見られる現象は、現段階では数学的に簡明な説明ができない。
- ・ 個々のデータ区間で伝達関数をとってから平均し推定精度を上げる方法も、それぞれ平均した後にクロス/パワー等を求める方法に類似のものとして、従来行われてきた。ここでは前者に関連するケースについては簡明な数学的説明ができた。後者に関しても、方法の類似性から間接的には数学的に説明し得たとも考えられるが、直接、数学的にも説明することは今後の課題と言える。

4. 上部入力と地動の独立ランダム2入力が存在する系の伝達関数

独立な2入力があるとき地動入力のみの場合と比較し伝達関数のピークが広がり位相も変化する現象がシミュレーションで再現される事は、筆者らの既報⁴⁾や飛田⁸⁾らにより確認されている。ここでは、前章と同じ1質点系モデルを用いて本論内での条件を統一し、上部と地動に独立ランダム2入力を与えた場合を検討する。ランダム波は $0\text{Hz} \sim 20\text{Hz}$ で一定のパワーを持ち、rms値で振幅を規定する。振幅としては地動が 1Gal 、上部の加振力が 5tonf 、 20tonf とした。また実測と同様 $100\text{秒} \times 36$ 区間の応答結果のアンサンブル平均により伝達関数を求めた。実測結果(図4と同一)、19質点スウェイ・ロッキングばね付シミュレーションモデルによる結果^{4),5)}と共に、結果を図18～20に示した。これらから以下の事が言える。

- ・ 上部と地動に独立2入力を与えると、1質点系モデルでも実測やシミュレーションモデルの結果と非常に類似の結果が得られた。
- ・ 従って、上下独立2入力は、強風時に伝達関数のピークが広がりまた位相の様子も変わるなど形状が変化し、見かけの減衰定数が大きくなる現象に大きく関与していると言える。
- ・ なお、上記の図14に関する検討で論じた点に注意すると、独立な2入力として設定した現象の性質のうち、2入力の同じ振動数成分間の位相差が時間により異なる、すなわち応答解析を行った36区間でそれぞれ異なる点が重要であると言える。実測結果においても、ランダムな現象であるため、アンサンブル平均の各区間で位相差は異なっていると考える事ができる。
- ・ 図18～20の現象は図15(c)と類似である。これは、クロス/パワーとして計算している点で共通性がある。
- ・ 上部入力の大さきに関しては以下のように考えられる。図19の実測における、風速 1.5m/s 時と風速 13.2m/s 時の建物頂部振幅rms値の比は約6 ($4.2 \mu\text{m} : 25.4 \mu\text{m}$)である。一方図18の 20tonf は地動入力による慣性力の約4倍(表1参照)となっている。この事から、図18の解析と図19の実測の2入力の大さきの比は、やや差があるもののほぼ等しいと言える。

5. 結論

本論の検討により以下の結論が得られた。

- 1) 上部・下部入力が存在し両者間の位相差が $0 \sim 2\pi$ 間で均等に分布する時、パワースペクトルとクロススペクトルのアンサンブル平均の比をとって伝達関数とする、観測データに対する処理法と同様の処理を行うと、実測の伝達関数と類似の現象が解析結果で見られた。またこの手法と類似な、伝達関数の平均をとる処理

図 18 独立ランダム 2 入力による伝達関数

図 19 実測結果による伝達関数

図 20 19 質点シミュレーション結果による伝達関数

によっても、実測の伝達関数と類似の現象が見られた。

- 2) 伝達関数の平均をとる場合には、位相差に関する平均により実測と類似の現象が現れる事を数学的に示した。またこの際、上部入力のみの場合の伝達関数が、見かけ上変化した伝達関数の頂部付近の値になる事、さらに、伝達関数の見かけ上の変化には2つの入力それぞれに対する基礎の応答の大小関係が重要で、下部入力に対する基礎の応答が大きい場合には下部入力のみの場合の伝

達関数と一致し、上部入力に対する基礎の応答が大きい場合には上部入力のみの場合の伝達関数と一致する事が分かった。

- 3) これらの事から、風外力が存在し伝達関数が見かけ上変化する現象に関し、伝達関数を平均する場合については現象のメカニズムを数学的に示したと言える。
- 4) また2入力有位相差を持った正弦波である場合の伝達関数が位相差によりどう変化するかの、上部入力のみの場合の複数のモデルに関する伝達関数も調べた。その結果これらの場合においても、伝達関数の変化に関し実測結果と類似の傾向が見られた。位相差に関し平均した場合の上記の結果と総合し、これらは、上部入力の存在により伝達関数が見かけ上変化するメカニズムに関する理解を助ける知見と言える。
- 5) 以上本論の検討により、上部入力の存在で伝達関数が見かけ上変化する際の、発生する現象と諸因子との関連が示され、またある部分に関してはその理由が数学的に明らかになった。今後、許容誤差の観点から、上部と下部入力の比を指標とし、一般的な建物に関する適用限界を定量的に求める予定である。

参考文献

- 1) Luco, J. E.: Linear Soil-Structure Interaction, Report UCRL-15272, Lawrence Livermore National Laboratory, 1980.
- 2) 佐藤耕司, 内藤幸雄, 内山正次, 前田達哉, 増田潔: 基礎が変形しロッキングする構造物の振動特性推定法, 鹿島技術研究所年報第43号, pp. 143 ~ 148, 1995. 12
- 3) 田村幸雄, 佐々木淳, 塚越治夫: ランダムな外力による強制振動時の減衰評価ーバフetting振動時の減衰定数について, 日本風工学会誌, 第47号, pp. 93 ~ 94, 1991. 4
- 4) 石橋敏久, 内藤幸雄: 常時微動による高層構造物の振動特性推定に及ぼす風の影響の検討, 日本建築学会構造系論文集, 第464号, pp. 71 ~ 80, 1994. 10
- 5) 石橋敏久, 内藤幸雄, 横山和人: 常時微動による構造物の振動特性推定に及ぼす風の影響 (その1), 鹿島技術研究所年報, 第40号, pp. 137 ~ 142, 1992. 10
- 6) 内藤幸雄, 石橋敏久, 横山和人: 常時微動による構造物の振動特性推定に及ぼす風の影響 (その2), 鹿島技術研究所年報, 第40号, pp. 143 ~ 146, 1992. 10
- 7) 山谷博愛, 内藤幸雄, 石橋敏久: 地盤・構造物相互作用が構造物の振動特性推定に及ぼす影響, 鹿島技術研究所年報, 第42号, pp. 169 ~ 174, 1994. 10
- 8) 飛田潤: 実応答記録に基づく建築構造物の振動システムの特性に関する研究, 東北大学学位論文, 1989. 1

(1996年10月9日原稿受理, 1997年2月25日採用決定)