鉄骨高層建物の上下方向振動性状に関する検討

VERTICAL DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A HIGH-RISE STEEL BUILDING

護 雅史 ———*1
神原 浩 ———*2Masafumi MORI
Hiroshi KAMBARA

We measured micro-tremors of a high-rise steel building to research detailed vertical dynamic characteristics. In this paper, we make clear that there are some vertical modal shapes: axial extension mode of column, beam vibration mode, those coupled of each other, in a narrow frequency band. Furthermore, we verify our results by modeling comparisons of seismic motion results recorded in this building and eigenvalues by a 3-dimensional frame model. We conclude that it is necessary to propose a new analysis model to simulate vertical responses of buildings accurately.

キーワード：
上下方向の振動性状，常時微動計測，3次元立体解析，鉄骨高層建物

Keywords：
Vertical dynamic characteristics, Microtremor, 3-D frame analysis, High-rise steel building

1. はじめに

近年、建物の高層化、大スパン化に伴って、曲げ変形に伴う柱の変動軸力の検討や居住性に対する床の振動レベルの検討など、建物の上下方向応答性状が設計上重要な問題のひとつとなってきた。また、多くの建物に甚大な被害を与えた1995年兵庫県南部地震では、直下型地震の上下動特性と建物被害との関係が論じられるなど、研究的にも建物の上下方向の応答性状に関する問題意識は高まりつつある。

建物の応答解析を行う際には、まず、その振動性状を十分に検討した上で、実現現象をうまくシミュレートできるモデルを作成することが重要である。水平方向の場合、微動計測記録や地震観測記録を用いた分析が以前から行われており^{例えば、[5]、[10]、[12]}その振動性状はかなり明確にされてきている。また、このような実記録データの蓄積を背景として、一本棒の多質点系モデルは、水平方向の振動性状を十分に表現できる簡便な解析モデルのひとつとして、設計に研究に幅広く利用されてきている。一方、上下方向の場合を見てみると、水平方向に比べて微動計測記録等の分析事例等が少なく^{[11]、[6]}、建物全体としての上下方向の振動性状は十分に把握されていないのが実状である。例えば、上下振動の固有振動モードは一般的に柱の軸伸縮モードと床振動モードとして現れる梁の曲げモードに大別されるが、それらの卓越振動数や、両者の連成や水平方向との連成の有無は、建物の構造種別や構造形式、架構形式等によって異なるはずである。こうした中で、上下方向の振動解析においては、水平方向にある一本棒の多質点系モデルのような汎用的な簡易解析モデルがないため、個々人が問題に応じて工

学的判断を入れながら独自の解析モデルを作成している場合が多い。これは、解析対象が同じであっても、用いた解析モデルによって結果が大きく異なる危険性が考えられるため、今後上下応答に関する検討の必要性が増し、多くの研究者や設計者らが解析を行う場合にはあまり望ましいことではない。従って、建物全体としての上下方向の振動性状をうまく表現できる汎用的な簡易解析モデルが必要である。また、そのためには微動計測等による上下方向の振動性状に関するデータの蓄積が不可欠である。

このような観点から、上下方向の振動性状に関するデータの蓄積と、上下応答解析用簡易モデルの開発を目的として、某鉄骨高層建物において、上下方向を中心とした常時微動の水平・上下同時計測を行った。本論では、上下用簡易解析モデルの開発の前段階として、この微動計測結果に基づいて鉄骨高層建物の上下方向の振動特性(振動モードとその卓越振動数)についての詳細な検討を行う。さらに、その検討結果を検証するために、同建物で得られている地震観測記録を用いた検討と3次元立体解析モデルによる検討も併せて行う。

2. 建物概要・常時微動計測概要・対象地震

2.1 建物概要

対象建物は、東京都港区に1991年に竣工した地上24階、地下2階のセンターコア形式をとる鉄骨造事務所建物である(図1参照)。同建物はS棟とN棟からなるツインタワーで、地下部分は一体化されている。基礎構造は上総層群を支持基盤とした直接基礎としている。ま

*1 清水建設㈱和泉研究室 研究員
(〒100 千代田区内幸町2-2-2)

*2 清水建設㈱和泉研究室 研究員

*1 Researcher, Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

*2 Researcher, Izumi Research Institute, Shimizu Corporation

表1 検討に用いた地震の諸元

			NO.1	NO.2	NO.3	NO.4
			1992 Tokyo Bay	1993 Off Kushiro	South-West Ibaraki	Off Tokai-do
Date			2 Feb. 1992	15 Jan. 1993	21 May. 1993	12 Oct. 1993
Hypocenter			139 48E 35 12N	144 23E 42 51N	139 54E 36 03N	138 06E 32 06N
Magnitude			5.7	7.8	5.4	7.1
Depth(km)			90	107	61	390
Epicentral Distance(km)			40	893	46	422
Seismic Intensity in Tokyo			III	III	IV	IV
Max Acc. (cm/sec/sec)	NS	RF	35	10	14	21
		1F	38	4	9	16
	EW	RF	82	10	12	16
		1F	69	4	9	9
	UD	RF	45	10	24	17
		1F	27	3	10	5

図1 対象建物と地震計設置位置及び
微動計設置位置 (ケース4)

図2 計測点の概略図 (屋上階)

た、S棟の一方方向(X方向)にのみ粘弾性ダンパーを用いた制振装置が設置されている。

2.2 常時微動計測概要

今回の計測は、次に示す4ケースについて行った。

- (1) ケース1: Y方向柱(外柱と中柱)の多点同時計測
- (2) ケース2: X方向柱(外柱と中柱)の多点同時計測
- (3) ケース3: 屋上階床の多点同時計測
- (4) ケース4: 階段室内(図1参照)の多点同時計測

図2にケース1~3の屋上階の計測点を示す。なお、ケース1、2では建物内での増幅特性を調べるために、1階にも微動計を設置して同時計測を行った。また、水平成分との連成の有無を確認するために、全ての計測点において水平・上下同時計測を行っている。1ケースの計測時間は約22分とした。図3に計測システムを示す。本計測システ

図3 計測システムの概略図

図4 計測された常時微動波形 (A点)

図5 A点の1階に対する伝達関数 (水平2成分)

ムでは各計測地点にセンサー3台(水平2+上下)とレコーダー1台、さらにトランシーバー1台をセットする。センサーは東京測振製VSE-11/12を使用している。計測は別途設置するコントローラーからの無線信号によって同時にトリガーし同時計測され、ICカードに記録される。ケース4では、無線を用いる本システムが階段室内でも動作するかどうかの確認も併せて行っている。

2.3 対象地震

同建物では竣工当初から地震観測(図1参照)が実施されており、現在までに数十の地震記録が観測されている。これらの地震記録の内、東京で震度III以上を記録した4つの地震を本論では用いることにする。各地震の諸元を表1に示す。これらの地震の最大応答加速度の

表2 微動計測結果より得られた固有振動数(水平方向)

	X (NS) 並進			Y (EW) 並進	
	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)		固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)
①	0.43	2.3	①	0.41	2.4
②	1.3	0.77	②	1.2	0.83
③	2.3	0.43	③	2.1	0.48
④	3.3	0.30	④	3.0	0.33
⑤			⑤	3.7	0.27

表3 微動計測結果より得られた固有振動数(上下方向)

	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	モード種別
①	3.5	0.29	一様軸伸縮(全体)
②	3.7	0.27	X軸逆対称軸伸縮(全体)+Y方向並進+梁の曲げ
③	3.9	0.26	Y軸逆対称軸伸縮(全体)+梁の曲げ
④	4.6	0.22	一様軸伸縮(外周)+梁の曲げ
⑤	4.75	0.211	一様軸伸縮(コア)
⑥	4.8	0.208	Y軸逆対称軸伸縮(外周)+梁の曲げ

(a) ケース1 (A点、G点)

(b) ケース2 (A点、B点)

図6 ケース1、2におけるA、B、G点の1階に対する伝達関数

図7 A点、B点、G点、H点の1階に対する伝達関数 (3.0Hz～5.5Hz)

図8 ケース3におけるA、K、L、M点のパワースペクトル

1階に対する屋上階の増幅率は、上下方向で1.7～3.2倍、水平方向で0.9～2.6倍であり、いずれも上下方向が水平方向を上回っている。

3. 検討結果

3.1 微動計測結果に基づく分析

計測は全て日中に行った。その間、天気は概ね晴れ、風速1.0m前後あった。

図4にA点における代表的な常時微動波形(3成分)を示す。図5にA点の水平2方向の1階に対する伝達関数を、表2に得られた水平方向の固有振動数を示す。この結果は、同建物において過去に行われた常時微動計測結果、及び起振機試験結果¹⁰⁾と大凡一致していた。従って、今回用いた微動計測システムで、これまでと同じような計測結果が得られることがわかった。また、ケース4の計測によって、階

段室内でも無線による同時計測が可能であることも確認できた。

図6(a)、図6(b)はそれぞれ、ケース1、ケース2の建物コア部(計測点A)と建物外周部(計測点B、G)での1階に対する伝達関数である。伝達関数は12波のアンサンブル平均を用いている。これらの図から、3.5Hz～4.0Hzと4.5Hz～5.0Hzに複数のピークが近接して現れており、その数は建物コア部よりも建物外周部の方が多いことがわかる。これらは、上下方向の軸伸縮モード、梁の曲げモード、両者の連成、水平方向の振動モードとの連成等によって生じているものと考えられる。そこで、これらの振動数領域について詳細な検討を行うことにする。

図7は、各計測点の1階に対する屋上階の伝達関数を3.0Hz～5.0Hzで拡大して示したものである。なお、図にはH点の結果も併せて掲載してある。また図8は、ケース3におけるA、K、L、M点の上下方向のパワースペクトルである。ここで、図7、8で①の振動数に差が見られるのは、伝達関数(図7)とパワースペクトル(図8)の違いである。ただし、この差が地盤の影響によるものかどうかは、今回の結果からは判別できなかった。

まず図7を見ると、3.5Hz～4.0Hzでは、①約3.5Hz、②約3.7Hz、③約3.9Hzに顕著なピークがあり、②、③では外柱(それぞれG点、B点)の増幅が大きい。また、4.5Hz～5.0Hzでは、④約4.6Hz、⑤約4.75Hz、⑥約4.8Hzに顕著なピークがあり、4.6Hzでは外柱(B点、G点)が増幅、4.75Hzでは中柱(A点)が増幅している。4.8Hzでは中柱(A点)と外柱(B点)で増幅が大きい。次に図8を見ると、①と⑤以外ではA点でのパワーが他点に比べて小さくなっており、このことから、①と⑤以外では梁の曲げモードが明瞭に現れていると考えられる。

以上の結果と、計測点間の上下成分の位相差や、水平成分との相関

図9 微動結果より伝達関数を用いて求められた上下方向の振動モード図

図10 地震観測記録波形 (No.1)

図11 屋上階のパワースペクトル (3.0Hz～5.0Hz)

性の有無等を考慮すると、これら6つのモードは、

- ① 3.5Hz: 全体の一様軸伸縮モード
 - ② 3.7Hz: 全体のX軸逆対称軸伸縮モード+Y方向並進5次モード+梁の曲げモード
 - ③ 3.9Hz: 全体のY軸逆対称軸伸縮モード+梁の曲げモード
 - ④ 4.6Hz: 外周部の一様軸伸縮モード+梁の曲げモード
 - ⑤ 4.75Hz: コア部の一様軸伸縮モード
 - ⑥ 4.8Hz: 外周部のY軸逆対称軸伸縮モード+梁の曲げモード
- であると推定される。また、図5中の○印のピークの振動数と③の振動数が一致していることと、水平方向の検討結果から、図5中の○印のピークは上下方向の③の振動モードによって励起されるものであることがわかった。各計測点の伝達関数から求めた屋上階の振動モードを図9に、また同定結果を表3に示す。

3.2 地震観測記録による分析

次に地震観測記録を用いた場合の分析結果について示す。解析は先に示した4地震で行ったが、紙面の都合上ここでは、NO.1地震についての結果のみ示す。図10はNo.1地震の屋上階での観測記録波形であ

る。この地震は図からも明らかなように、(i)初動部と(ii)主要動部とに明瞭に区別できる。従って、初動部のみのスペクトルは上下並進モードが卓越し、主要動部のみのスペクトルでは逆対称軸伸縮モードが卓越することが予想される。図11は、それぞれの区間で切り出した波から求めた屋上階のパワースペクトルである。図中の実線が(i)初動部、点線が(ii)主要動部の結果である。この図から初動部では約3.5Hzに①に対応するピークが、主要動部ではこの他に約3.8Hz、約3.9Hzにそれぞれ②、③に対応するピークが現れている。これらの結果は、微動計測結果と良く一致している。また、黒丸で示したピーク(約3.3Hz)は微動計測結果では見られなかったが、X方向の4次の並進モードによってY軸逆対称軸伸縮モードが励起されたためであろう。一方、▼印のピーク(約4.8Hz)は図5を参照すると、Y方向の並進モードによって励起されたピークであると考えられる。

3.3 立体解析モデルによる検討

微動計測、及び、地震観測記録から同定された振動性状を確認するために3次元立体解析モデルによる固有値解析を行った。解析モデルは設計図書等を参考に作成している。架構は柱と大梁、及び小梁を梁

図12 立体解析モデルによる固有振動モード

要素でモデル化している。また、耐震壁はブレース置換している。節点は床振動を考慮できるように大梁上にも設け、質量は集中質量として各節点に与えている。ただし、質量については設計時にはやや大きめの積載荷重が設定されていたため、本解析では1次固有振動数が微動結果と一致するように修正した。また、実構造物ではねじれモードが現れるが、本解析では考慮しなかった。基礎は固定とした。水平方向には剛床仮定を用いている。解析には当社開発のDAC3N^[13]を用いた。なお、水平方向の固有振動数は4次モードまでは微動計測結果と大凡一致した。図12に上下方向に関する固有振動数、振動モード図を、紙面の都合上3.5Hz～4.0Hz間の4つについて示す。実線がモード形、破線が建物の原型を表す。図中には各振動モードに対応した図9の結果を併せて示してある。振動モードは、(1)から(3)のモードについては微動計測結果とおおよそ一致した結果が得られた。ただし、(4)のモードについては、微動計測結果からは明確に捉えられなかった。これはおそらく、図7の○印のピークに対応するものであろう。また逆に、微動計測で得られた⑤のモードを解析では捉えることができなかった。一方、固有振動数については①、②については大凡一致したが、それよりも高い振動数のモード(③、④、⑥)については微動計測結果よりも低い値となった。立体解析モデルにおいて、⑤のモードが得られなかったことや固有振動数のずれ等の問題を解決するには、床振動に大きく寄与すると考えられる床版や小梁の剛性と軸伸縮モードに寄与する間仕切り壁や外壁などの雑壁を適切にモデル化することが必要となろう。

4. まとめ

上下方向の振動性状に関するデータの蓄積と、上下応答解析用簡易モデルの開発を目的として、某鉄骨高層建物において上下方向を中心とした常時微動の水平・上下同時計測を行った。本報告では、上下応答解析用簡易モデルの開発の前段階として、この微動計測結果に基づいて鉄骨高層建物の上下方向の振動特性(振動モードとその卓越振動数)についての詳細な検討と、その検討結果を検証するための同建物で得られている地震観測記録を用いた検討と3次元立体解析モデルによる検討も併せて行った。その結果、今回対象とした建物の上下方向

の振動性状に関して次の点が明らかとなった。(1) 上下方向の振動性状に関する有用なデータが蓄積できた。(2) 上下方向の振動では、軸伸縮モード、梁の曲げのモード、あるいはその連成、さらには水平方向との連成と、多様な振動モードを示し、かつそれらの複数が近接して現れる。(3) 上下方向の振動モード(本報告では3.9Hz)により水平方向にピークが生じる場合がある。(4) 高次(今回の検討では4Hz以上)のモードを解析モデルで捉えるためには、床版や小梁、雑壁までの適切なモデル化か、新たな解析モデルを検討する必要がある。ただし、(4)についてはこれらの高次のモードが地震時の建物応答に与える影響の程度等をはじめに検討することが必要となろう。

謝辞：本報告で対象とした微動計測にあたっては、ビル管理事務所、清水建設(株)技術研究所の多くの方々に多大なる御協力を頂きました。また、本報告に作成にあたっては、清水建設(株)和泉研究室の林康裕氏に貴重な御意見を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 田中国彦 他：地震観測記録に基づく高層建物の上下方向の応答性状、大成建設技術研究所報、第27号、1994、pp.123-128
- [2] 高崎芳夫 他：地震観測に基づく鉄骨高層建物の振動性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994年9月、pp.665-666
- [3] 小出敏弘 他：大スパンラーメン架構を有する高層建物の振動性状、間組研究年報、1986年、pp.219-226
- [4] 平澤光春 他：建物内の上下動の増幅特性、多次元入力地震動と構造物多次元挙動に関するシンポジウム、1993年3月、pp.43-50
- [5] 斎藤知生 他：地震観測による鉄骨高層建物の振動特性の同定、日本建築学会大会学術講演梗概集、1994年9月、pp.673-674
- [6] 佐武直紀 他：水平・上下動同時測定による高層建物の振動特性評価、日本建築学会関東支部研究報告集、1995年
- [7] 森田高市、神田順：常時微動による減衰定数評価手法に関する考察、構造工学論文集、1996年3月、pp.553-560
- [8] 益永英治 他：複数の手法による常時微動時の減衰評価法、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996年9月、pp.987-988
- [9] 寺坂康成 他：建物の減衰評価におけるRD法の適用について、日本建築学会大会学術講演梗概集、1996年9月、pp.991-992
- [10] 横田治彦 他：振動試験および地震観測データに基づく鉄骨造高層建物の減衰性状、日本建築学会構造系論文報告集、1993年11月、pp.77-84
- [11] 藤原悌三、喻 徳明：立体構造物の上下地震応答と耐震設計、日本建築学会構造系論文報告集、第449号、1993年7月、pp.93-102
- [12] 日本建築学会：建築物の耐震設計資料、丸善、1981年
- [13] 渡辺宏一 他：三次元非線形振動解析システムDAC3Nの開発、第11回情報システム利用技術シンポジウム、1989年、pp.181-186

[1997年6月20日原稿受理 1997年9月1日採用決定]