

論文 振幅依存性を考慮した RC 造高層煙突の振動特性評価に関する研究

菅野 裕晃*¹・荒川 利治*²

要旨：RC造高層煙突の常時微動時および人力加振後の自由振動波形における振動測定を行った。一般に、構造物の振動特性には振幅依存性がある。そこで、常時微動時と人力加振における振動特性を比較し、1次減衰定数、1次固有振動数に与える振幅依存性の影響を検討した。さらに、高さ方向の測定位置が振動特性評価に及ぼす影響についても検討した。その結果、常時微動時の振動特性と、地震や強風などの大振幅時の振動特性とは異なることがわかった。また、高さ方向の測定位置は固有振動数には全く影響を及ぼさず、減衰定数には測定位置の因果性がわずかに認められた。

キーワード：煙突, RC造, 常時微動, 人力加振, RD法, 減衰定数, 固有振動数

1. はじめに

近年、RC造高層煙突は、旧来のライニング型¹⁾から外筒部RC造の内筒型ダクト方式へと、その構造を大きく変化させている。しかしながら、新しい構造形式のRC造高層煙突に関する振動特性は明らかにされていない。そこで、RC造高層煙突における振動測定を行い、構造設計法の構築のために振動特性を評価することが本研究の目的である。

構造物の振動特性の評価として、自由振動波形を用いる方法がある。本研究では、常時微動時の測定波形にRD法を適用して自由振動波形を作成する方法、および人力加振を行い、構造物を自由振動させて測定波形を得る方法を用いた。

一般に、構造物の振動特性には振幅依存性があることがわかっている²⁾。常時微動時の振動特性が地震、強風などの大振幅時においても、適用可能かどうかを検討する。高さ方向の測定位置が振動特性評価に及ぼす影響についても検討する。

対象としたRC造高層煙突の振動特性の評価は、常時微動時については、10本の煙突に関する1次モードの減衰定数と、低次の固有振動数を中心に行った。また、人力加振を行った後の振動特性については、2本の煙突に関する1次モードの減衰定数と固有振動数の評価を行った。

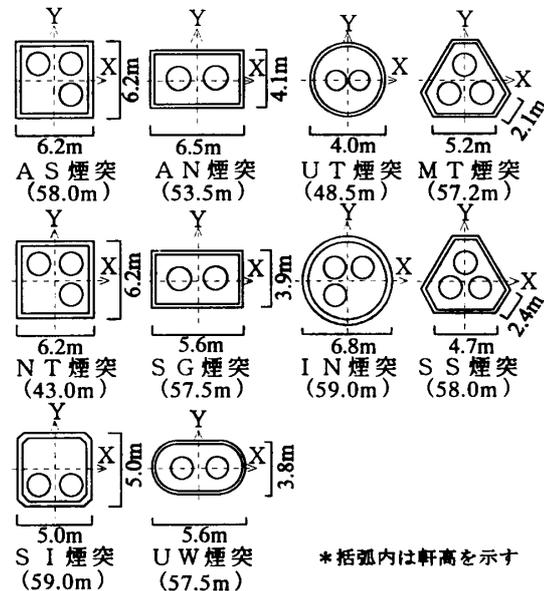


図1 煙突の平面図

2. 対象煙突および測定概要

測定を行った煙突の平面図と軒高を図1に示す。各煙突はいずれも外筒部RC造の内筒型ダクト方式の構造である。外筒部の壁厚は、頂部で16～25cm、地上部分で33～37cmであり、高さ位置によって壁厚は変化している。コンクリート強度は21～24N/mm²である。また、外筒部に配筋された主な鉄筋は、頂部でD16(縦筋)とD10(横筋)を、地上部分でD22, D25(縦

*1 明治大学大学院生 理工学研究科建築学専攻(正会員)

*2 明治大学助教授 理工学部建築学科 工博(正会員)

筋)とD10～D16(横筋)を用いている。鉄筋の強度はSD345,あるいはSD295である。

振動測定は最上部屋上を中心に,水平X, Y方向についてサーボ型の加速度計と速度計を用いて行った(図2)。

3. 振動特性の評価方法

3.1 常時微動時における自由振動波形の作成

常時微動時の測定波形を用いた減衰特性の評価には,近年,Random Decrement Technique(RD法)を用いることが多くなってきている。初期値をずらした小サンプルを重ね合わせて自由振動波形を作成する方法であるRD法の適用の際には,多くの解析パラメータが存在する³⁾。筆者らはこれまでにRC造高層煙突における常時微動時の振動特性を評価する場合のRD法のパラメータを検討してきている⁴⁾。図3のような常時微動時の測定波形にRD法を適用して,図4のような1次モードの自由振動波形を作成する。

3.2 人力加振における自由振動波形の評価方法

S I煙突およびIN煙突において3名ずつが頂部屋上で,1次モードの半周期間隔で交互に外筒の壁を押し合うことによって,20gal前後の振幅になるまで人力加振を行った。自由振動波形からの振動特性評価における振幅依存性の検討は,図5のように自由振動波形を26周期分で区切り,半分の13周期ごとにランニングさせて行った。b1～b4は作成した短い自由振動波形である。なお,振幅依存性の検討は最上部屋上で測定した自由振動波形を用いた。

3.3 減衰定数および固有振動数の評価方法

自由振動波形における1次減衰定数の算定には,図6に示す減衰評価方法を用いる。1)は自由振動波形の振幅の減衰から対数減衰率で減衰定数を算定する対数減衰率法であり,2)は自由振動波形の包絡線を指数関数にカーブフィットさせるカーブフィット法である。

常時微動時における測定波形のフーリエスペクトルの一例を図7に示す。1次モードが卓越しているが2次以上の成分も含んでいる。また,

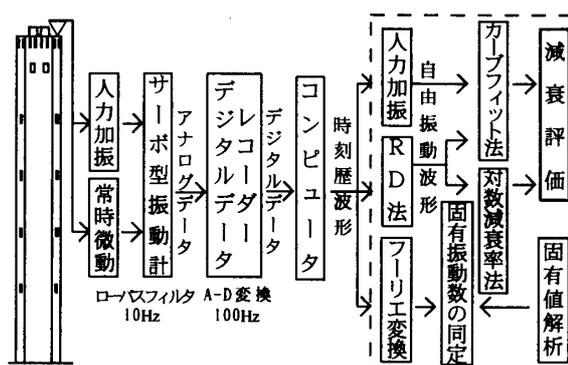


図2 測定方法と振動特性の評価方法

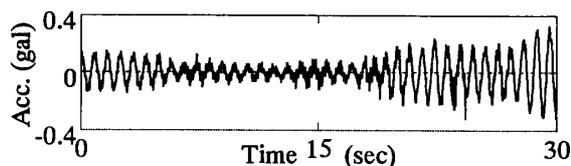


図3 常時微動時の測定波形の例

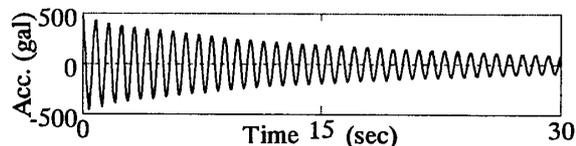


図4 RD法を用いて重ね合わせた自由振動波形

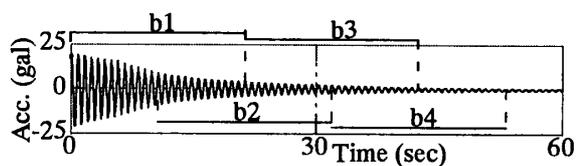


図5 自由振動波形のランニング

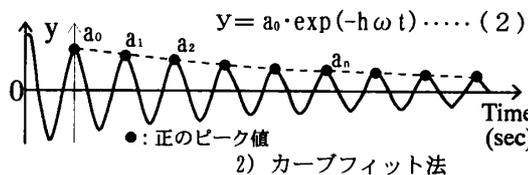
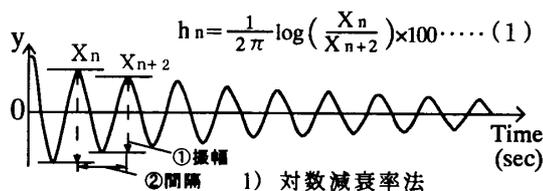


図6 減衰算定方法

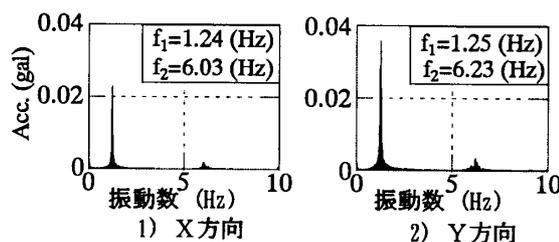


図7 測定波形のフーリエスペクトル(S I煙突)

平面形状に異方性がない煙突であっても測定した方向により、フーリエ振幅は異なっている。

人力加振後の1次固有振動数の評価は図8に示す算定方法を用いた。これは自由振動波形における振幅が0になる点の同位相の1サイクル分から求めた固有振動数 f_n を、半周期ごとに順次求める方法（以下1サイクル法と記す）である。

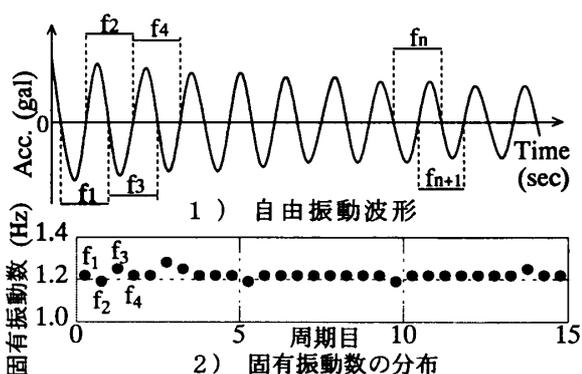


図8 1サイクル法

4. 常時微動時の振動特性

10本の煙突に関するX、

Y方向における常時微動時の1次減衰定数、1次固有振動数の総合的な評価を行った。

4.1 1次減衰定数

各煙突ごとの常時微動時における1次減衰定数の評価に関して、対数減衰率法は1周期の間隔で両振幅の比をとる方法、カーブフィット法は回帰する際の初期値を変動させ、データ数を10周期分に固

表1 常時微動時における1次減衰定数 (%)

煙突	測定方向	対数減衰率法		カーブフィット法		重ね合わせ回数
		平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	
AS	X	0.84	0.19	0.82	0.08	5000
	Y	0.77	0.09	0.75	0.07	5000
AN	X	0.86	0.35	0.90	0.16	4000
	Y	0.66	0.42	0.62	0.06	4000
UT	X	1.04	0.18	0.97	0.05	3000
	Y	0.89	0.16	0.87	0.14	3000
MT	X	0.72	0.20	0.73	0.09	6000
	Y	0.59	0.24	0.62	0.04	6000
NT	X	1.06	0.39	0.96	0.14	2000
	Y	1.01	0.56	1.03	0.33	2000
SG	X	0.65	0.38	0.67	0.14	1000
	Y	0.61	0.25	0.63	0.09	1000
IN	X	0.75	0.31	0.65	0.23	5000
	Y	0.89	0.34	0.79	0.16	5000
SS	X	0.59	0.30	0.70	0.14	2000
	Y	0.58	0.33	0.89	0.12	2000
SI	X	0.68	0.17	0.68	0.10	4000
	Y	0.81	0.20	0.77	0.18	4000
UW	X	1.34	0.24	1.47	0.28	3000
	Y	0.88	0.36	0.85	0.15	3000

表2 固有振動数 (Hz) の実測値と解析値

煙突	測定方向	1次		2次	
		実測	解析	実測	解析
AS	X	1.37	1.42	5.92	7.41
	Y	1.38	1.42	6.32	7.41
AN	X	1.49	1.58	6.83	8.31
	Y	1.15	1.10	5.29	6.01
UT	X	1.19	1.09	5.86	5.92
	Y	1.15	1.09	5.77	5.92
MT	X	1.37	1.29	6.28	6.86
	Y	1.38	1.29	6.34	6.86
NT	X	2.11	2.30	11.2	12.2
	Y	2.18	2.30	10.8	12.2
SG	X	1.20	1.20	6.01	6.43
	Y	0.94	0.90	4.93	4.93
IN	X	1.48	1.41	6.73	7.45
	Y	1.35	1.41	6.09	7.45
SS	X	1.10	1.25	5.09	6.64
	Y	1.10	1.25	5.13	6.64
SI	X	1.24	1.07	6.05	6.22
	Y	1.25	1.07	6.23	6.22
UW	X	1.20	1.17	5.93	6.36
	Y	0.94	0.81	4.89	4.45

定させる方法を用いた。表1は各煙突ごとに測定時刻の異なる3つの自由振動波形から求めた1次減衰定数の平均値と標準偏差を示したものである。対数減衰率法の方がカーブフィット法よりも標準偏差は大きいものの、どちらの減衰評価方法においても精度良く減衰を評価できることがわかる。ほとんどのRC造高層煙突において、常時微動時の1次減衰定数は1%を下回っている。

4.2 固有振動数

常時微動時の固有振動数については、測定波形のフーリエスペクトルから求めた実測値と曲げせん断変形を考慮した10質点モデルの固有値解析から得られる値との比較検討を行った。固有値解析においては、内筒の重量を考慮していない。表2は、1次および2次固有振動数の実測値と解析値を示したものである。各煙突の固有振動

数の解析値は実測値によく一致している。

5. 人力加振後の振動特性

人力加振における振動特性は、自由振動波形をランニングさせて、振幅依存性の検討を行った。振動振幅が異なる場合の1次減衰定数および1次固有振動数を求めて、振幅レベルと振動特性との関係を検討する。1次減衰定数の評価にはカーブフィット法を用いた。カーブフィット法は回帰する際の初期値を変動させて、データ数を5周期分に固定させる方法を適用した。1次固有振動数は1サイクル法によって評価した。

5.1 1次減衰定数

図9はランニングさせた各自由振動波形における振幅の最大値と1次減衰定数との関係を示したものである。振幅が減少するにつれて、黒

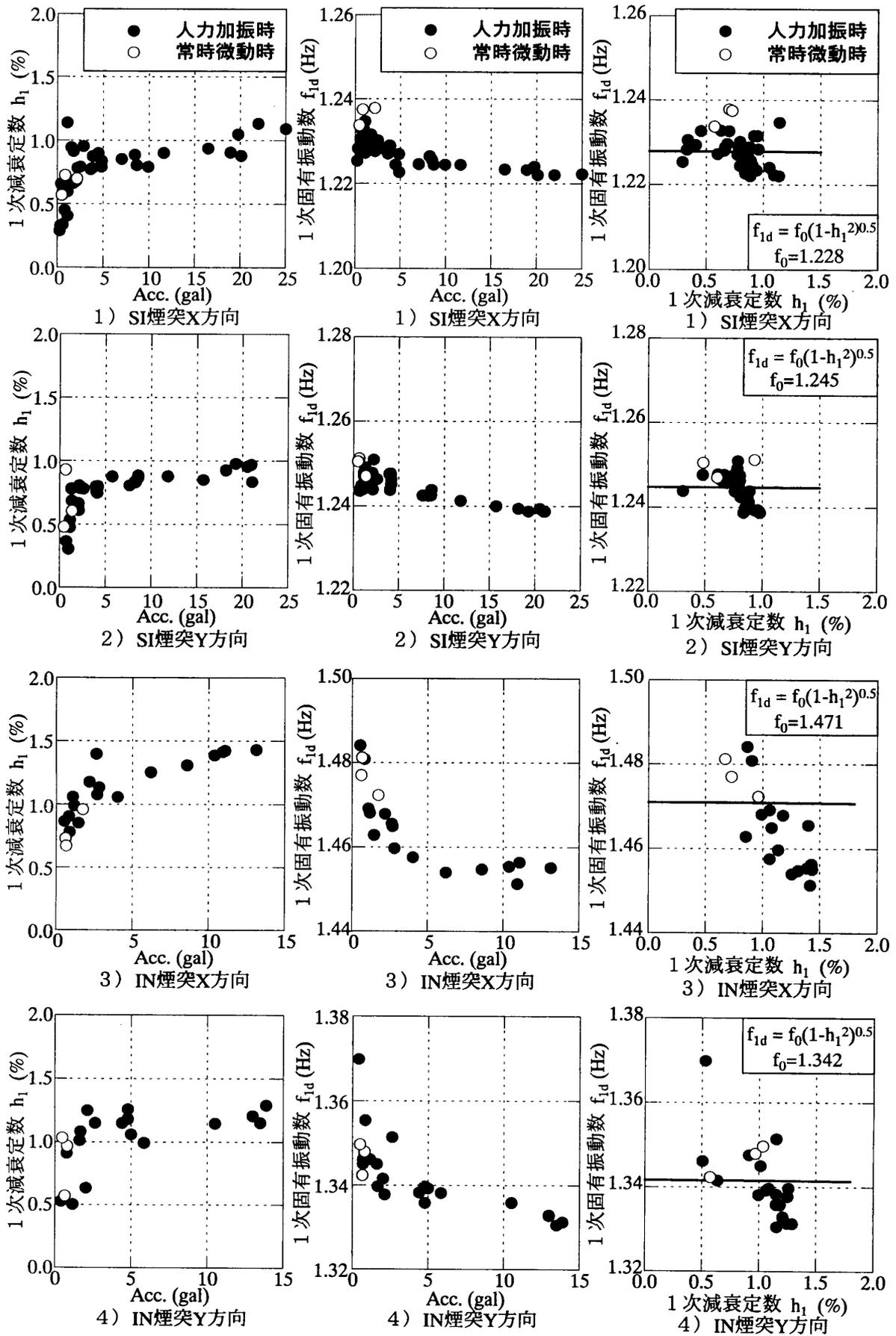


図9 振幅レベルと1次減衰定数

図10 振幅レベルと1次固有振動数

図11 1次減衰定数と1次固有振動数

丸の人力加振における減衰定数は小さくなっており、1次減衰定数は振幅依存性を受けていることがわかる。また、白丸の常時微動時の減衰定数は、ほぼ等しい振幅レベルの人力加振における減衰定数と概ね適合する。

5.2 1次固有振動数

図10はランニングさせた各自由振動波形における振幅の最大値と1次固有振動数との関係を示したものである。振幅が減少するにつれて、人力加振における固有振動数はわずかながら大きくなっており、1次固有振動数も振幅依存性を受けている。しかしながら、固有振動数の振幅依存性は設計時の応答解析に、ほとんど影響を与えない程度のものである。

5.3 振幅依存性と振動特性評価

図11は振幅毎の1次減衰定数と1次固有振動数の関係を示したものである。1次減衰定数が小さくなるにつれて、1次固有振動数は大きくなっているが、ばらつきがある。また、図11には、1次減衰定数 h_1 、非減衰1次固有振動数 f_0 、および減衰1次固有振動数 f_{1d} の1質点系モデルの理論式 $f_{1d} = f_0 \sqrt{1-h_1^2}$ を用いて f_{1d} を推定した回帰曲線を示している。実測の減衰定数と固有振動数との関係は、この回帰曲線からでは表現できていない。1質点系モデルの理論式を用いてRC造高層煙突に関する振動特性の評価をすることはできなかった。

6. 高さ方向の測定位置と振動特性

測定した高さによって振幅レベルが異なり、高さ方向の測定位置が振動特性に影響を与える可能性がある。そこで、測定高さが異なり、同時測定した常時微動時および人力加振における測定波形を用いて、1次減衰定数および1次固有振動数を測定位置ごとに求めて比較検討した。図12は高さごとの測定波形を示したものである。高さ方向の測定位置が低くなれば1次モード以外の振動数成分を多く含むようになっている。

6.1 1次減衰定数

表3はS I煙突X方向の人力加振後の自由振

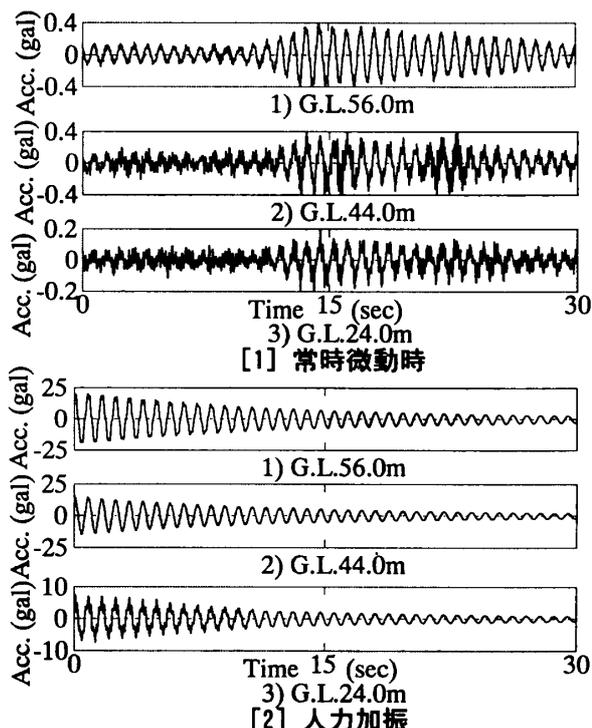


図12 高さ位置ごとの測定波形 [S I煙突X方向]

表3 測定位置ごとの振幅(gal)と減衰定数(%)

データ	自由振動波形 (周期目)	G.L.56.0m		G.L.44.0m		G.L.24.0m	
		h_1	Acc.	h_1	Acc.	h_1	Acc.
A	0~26	1.04	19.3	1.08	15.2	1.24	7.80
	13~39	0.85	8.20	0.85	5.65	0.86	2.43
	26~52	0.77	3.79	0.74	2.73	0.73	1.13
	39~65	0.68	2.02	0.71	1.76	0.67	0.73
	52~78	0.61	1.09	0.52	0.76	0.44	0.38
B	0~26	1.08	25.0	1.16	20.5	1.34	9.45
	13~39	0.90	11.6	0.87	7.81	0.80	2.56
	26~52	0.77	4.81	0.77	3.45	0.74	1.32
	39~65	0.82	2.50	0.84	1.79	0.72	0.65
	52~78	0.95	1.51	0.94	1.11	0.73	0.40
C	0~26	1.13	22.0	1.07	14.9	1.25	7.52
	13~39	0.89	8.44	0.87	5.69	0.89	2.39
	26~52	0.87	3.86	0.84	2.71	0.85	1.10
	39~65	0.68	1.73	0.55	1.16	0.49	0.52
	52~78	1.13	1.06	0.86	0.75	0.73	0.32

表4 測定位置ごとの振幅(gal)と固有振動数(Hz)

データ	自由振動波形 (周期目)	G.L.56.0m		G.L.44.0m		G.L.24.0m	
		f_1	Acc.	f_1	Acc.	f_1	Acc.
A	0~26	1.224	19.3	1.223	15.2	1.223	7.80
	13~39	1.227	8.20	1.227	5.65	1.227	2.43
	26~52	1.229	3.79	1.229	2.73	1.230	1.13
	39~65	1.229	2.02	1.230	1.76	1.231	0.73
	52~78	1.231	1.09	1.230	0.76	1.224	0.38
B	0~26	1.222	25.0	1.222	20.5	1.223	9.45
	13~39	1.225	11.6	1.226	7.81	1.227	2.56
	26~52	1.227	4.81	1.226	3.45	1.228	1.32
	39~65	1.230	2.50	1.231	1.79	1.232	0.65
	52~78	1.230	1.51	1.231	1.11	1.230	0.40
C	0~26	1.222	22.0	1.223	14.9	1.225	7.52
	13~39	1.226	8.44	1.227	5.69	1.227	2.39
	26~52	1.229	3.86	1.229	2.71	1.230	1.10
	39~65	1.229	1.73	1.228	1.16	1.230	0.52
	52~78	1.234	1.06	1.273	0.75	1.295	0.32

動波形から求めた測定位置ごとの1次減衰定数を示したものである。その際、自由振動波形をランニングさせて、振幅の最大値も示している。測定時刻の異なる3つの自由振動波形A, B, Cを用いた。同時刻に測定した自由振動波形において、高さ方向の測定位置が異なっても、減衰定数は近似している。また、どの測定高さにおいても振幅が減少するにつれて、減衰定数は小さくなり、振幅依存性が確認できた。

6.2 1次固有振動数

表4は人力加振後の自由振動波形をランニングさせて求めた測定位置ごとの振幅の最大値と1次固有振動数を示したものである。高さ方向の測定位置が異なっても、測定時刻が同じ場合の固有振動数は一致した。また、どの測定高さにおいても振幅が減少するにつれて、固有振動数は大きくなり、振幅依存性が確認できた。

6.3 振幅依存性を考慮した振動特性

図13は自由振動波形をランニングさせて評価した1次減衰定数と1次固有振動数との関係を示したものである。高さ方向の測定位置に関係なく、1次減衰定数が小さくなるにつれて固有振動数は大きくなっている。この種の煙突における振動特性は、振幅依存性を受けているものの、高さ方向の測定位置による影響は少ないことがわかった。

7. まとめ

常時微動時の振動測定を行い、RC造高層煙突の振動特性を評価した。また、人力加振後の自由振動波形からの振動特性における振幅依存性の影響を検討した。さらに高さ方向の測定位置が振動特性に及ぼす影響について検討した。その結果、明らかになった事項を要約する。

- 1) 現在主流の外筒部RC造内筒型ダクト方式の高層煙突における常時微動時の1次減衰定数は1%以下である。また、固有振動数は設計時に実際の値を正しく推定できる。
- 2) 人力加振後の自由振動波形において、振幅が減少するにつれて1次減衰定数は小さく

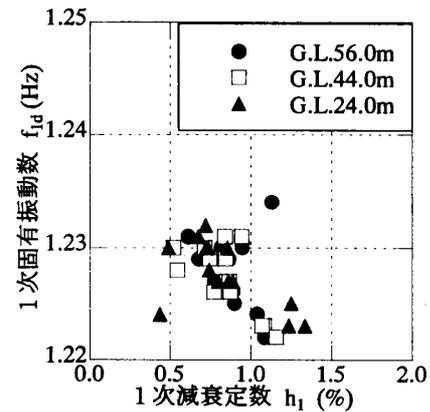


図13 高さ方向の測定位置と振動特性

なり、振幅依存性が確認できた。また、振幅が減少するにつれて1次固有振動数は大きくなり、振幅依存性が確認できた。しかしながら、固有振動数の変動量は微小であり、固有振動数の振幅依存性は工学的に意味をなさない程度である。

- 3) この種の煙突の1次減衰定数は振幅依存性があることが明らかとなった。地震応答解析に用いる1次減衰定数は振幅レベルを考慮した値を用いる必要がある。
- 4) 1次減衰定数は高さ方向の測定位置に関係なく近似していた。測定位置が低い場合は、測定波形に1次モード以外の振動数成分が多く含まれている。また、1次固有振動数は高さ方向の測定位置による影響を受けない。

本研究は1999-2000年度文部省科研費基盤研究C(課題番号11650595)の一部である。振動測定にご協力頂いた松島工業(株)を始めとする関係各位に感謝いたします。本報作成にあたり、河野慶志郎君の助力を得ました。

参考文献

- 1) 日本建築センター：煙突構造設計施工指針，1982
- 2) 佐々木淳，菅沼信也，須田健一，田村幸雄：実測データに基づく建築構造物の減衰性状(減衰性状の振動数依存性と振幅依存性について)，日本建築学会大会学術講演梗概集，B-2，pp.379-380，1998.9
- 3) 田村幸雄，佐々木淳，塚越治夫：RD法による構造物のランダム振動時の減衰評価，日本建築学会構造系論文報告集，No.454，pp.29-38，1993.12
- 4) 荒川利治，菅野裕晃：常時微動による鉄筋コンクリート造高層煙突の減衰特性，日本建築学会技術報告集，No.7，pp.27-32，1999.2