

# 人力加振法を用いた建物振動実験についての一考察

此上典文 金子正孝  
角田智彦 渡辺清治

## Vibration Test of Building Using Manual Excitation

Norifumi Konoue Masataka Kaneko  
Tomohiko Tsunoda Seiji Watanabe

### Abstract

Vibration tests of buildings using manual excitation have been employed to confirm vibrational characteristics (e.g., natural frequency, vibrational mode, damping coefficient, etc.) since they can be carried out conveniently. However, vibration tests have been carried out with points remaining unclarified with regard to the mechanism of excitation and the extent of vibrating force affected by exciting posture and timing of excitation.

This paper discusses a proposal for quantitatively resolving these problems and describes the results of examinations through an experiment taken as an example.

### 概要

人力加振による建物の振動実験は、簡便に実施できるため、建物の1次振動を対象とした固有振動数、固有モードおよび減衰定数などの把握を目的とした古くから存在する建物振動実験法の一手法である。しかるに、その加振力の発生機構や加振姿勢、加振タイミングなどに左右される加振力の大きさについては未だ不明な点が残されたまま実験が実施されており、このため、実験計画段階での加振のための人員計画などは専ら今までの経験に基づいた判断によっているのが現状のようである。本報は、こうした問題点を定量的に説明する一提案を示すとともに、一つの実験を例にとってその検討結果を述べたものである。

## 1. はじめに

高層建物の振動実験においては、従来の起振機あるいは振り子などを用いた実験では建設用重機の使用が必要となり、このため実験実施時期が工事期間中ということに限定されるとともに、コスト面でも高額になる場合が多い。この人力加振法は、建物を押す力は人間の体重移動などによる慣性力を利用するものであって、重機などの使用は不必要である。このため、実験実施は建物竣工直前にも可能であり、設計値との対応の点でもより実状に即していると思われ、古くからこの手法が用いられている。本報は、この人力加振法の簡便さを再認識し、1次のみならず2次（場合によっては3次）振動まで実施可能であることを示すとともに、人力による加振力の発生機構や加振力の大きさなどを推定する一方法を示し、一つの実験を例にとっての検討結果について述べたものである。表-1は著者らが実施した実験例の概要であり、このうちEホテルについての検討結果を以下に述べる。

## 2. 実験例と結果の概要

図-1に当該建物の断面および基準階平面図を、図-2には短辺方向の常時微動測定波形のフーリエスペクト

建 物	規模	構造	軒高 (m)	実施時期	固有振動数と減衰定数 ( )内数値は起振機実験結果
				加振人員	
A ビル (大阪)	B2F	S	65	S51.12	1次 X:0.66Hz(0.66Hz),0.35%(0.55%) Y:0.69Hz,1.20%
	16F			6	
B ビル (大阪)	B3F	S	110	S55.7	短辺方向 1次:0.29Hz(0.31Hz),1.43%(0.90%) 2次:0.93Hz(0.96Hz),1.62%(1.22%) 3次:2.04Hz(2.22Hz),3.01%(2.89%)
	30F			20	
C ビル (東京)	B5F	S	89	S56.6	1次 X:0.70Hz(0.70Hz),0.63%(0.85%) Y:0.624Hz(0.624Hz),0.39%(0.49%) ねじり:0.735Hz(0.735Hz),0.57%(0.63%)
	19F			5	
D ホテル (札幌)	B2F	S	88	S56.9	短辺:1次:0.55Hz,1.36% 2次:1.65Hz,1.25% 長辺:1次:0.71Hz,1.47% 2次:2.05Hz,1.23%
	23F			19	
E ホテル (熊本)	B2F	S	78	S58.3	短辺:1次:0.68Hz,1.18% 2次:2.30Hz,1.86% 長辺:1次:0.75Hz,2.08% 2次:2.35Hz,2.22%
	25F			12	

表-1 Man Power による既往の振動実験一覧表

ルを各々示した。本実験は、主体構造の鉄骨建方完了時と竣工直前での状態の2ケースについて実施しており、図-2は竣工直前での結果である。同図には各次固有振動数を表示しており、人力加振実験ではこの振動数にあわせて建物構造体の一部を加振した。

図-3は、この人力加振での測定波形の一例で、図-4はそのフーリエスペクトルである。図-3には、加振開始時と20回目の最終加振時を矢印で表示した。

人力加振と常時微動の両周波数分析結果はよく一致しており、人力加振時での実際の加振ピッチが正確であったことがわかる。これは、この度作成した発振器とスピーカーを組み合わせた器械によって任意のしかも精度の高い加振が可能になったためである。

図-5は、人力加振実験で求められた1次および2次の固有振動モードである。同図には、常時微動測定から得られたモードも表示しているが、両者はほとんど一致している。表-2に、1次および2次の固有振動数と減衰定数を鉄骨建方完了時と竣工直前の場合について一括して示した。基本周期と建物高さ(軒高あるいは地上階数)、ねじれ周期、高次周期、減衰定数などの関係は他の高層建物と同傾向を示しており<sup>1)</sup>、当建物は一般的な高層建物といえよう。このように、建物の基本性状を把握するには、この簡便な人力加振実験法は有効な一手法であることが再確認できた。

### 3. 加振力についての概要

この問題を考える場合、加振力の発生機構、加振回数および加振振動数などが重要な要素となってくる。以下

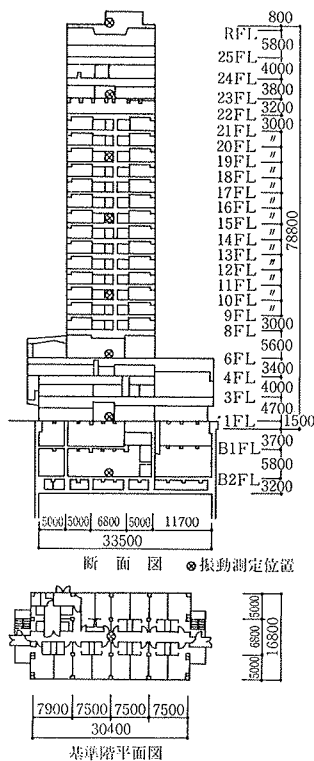


図-1 建物概要と振動測定位置

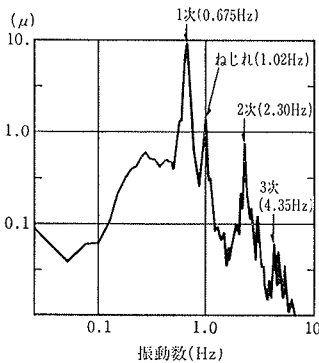


図-2 フーリエスペクトル(常時微動)

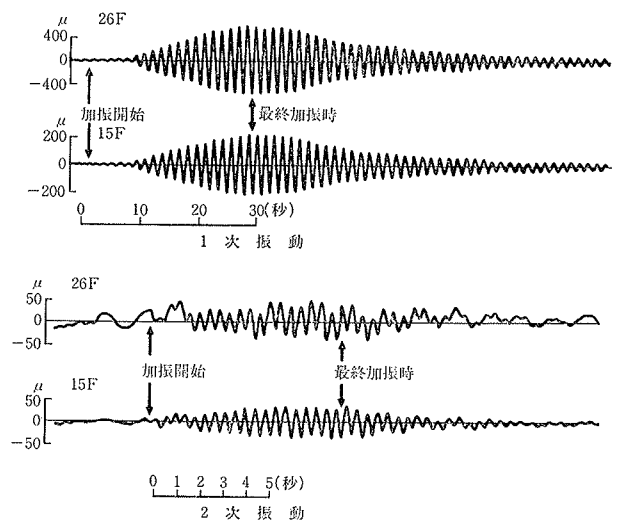


図-3 測定波形の一例(短辺方向)

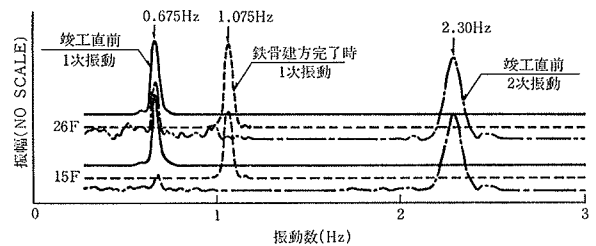


図-4 フーリエスペクトル(人力加振)

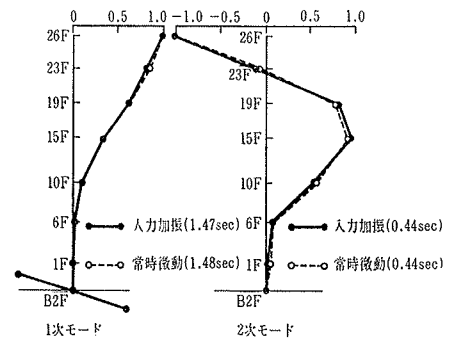


図-5 振動形(人力加振と常時微動)

		実験実施時期			
		鉄骨建方完了時		竣工直前	
方向	次数	1次	2次	1次	2次
短辺	固有振動数(Hz)	1.075	2.200	0.675	2.300
	固有周期(sec)	0.930	0.455	1.481	0.435
	減衰定数(%)	0.745	-	1.181	1.858
長辺	固有振動数(Hz)	0.975	2.125	0.750	2.350
	固有周期(sec)	1.026	0.471	1.333	0.426
	減衰定数(%)	0.684	0.858	2.078	2.220

表-2 固有振動数と減衰定数

これらの要因について前述の実験を一例とした検討結果の概要を述べる。

#### 3.1. 加振力の発生機構とその大きさについて

加振力を発生させる方法には、図-6に示すような構造体の一部を直接押す場合と、床上に起立して人間の上部を左右あるいは前後に移動させて生ずる慣性力を利用する場合が考えられるが、ここでは図-6の水平加振と

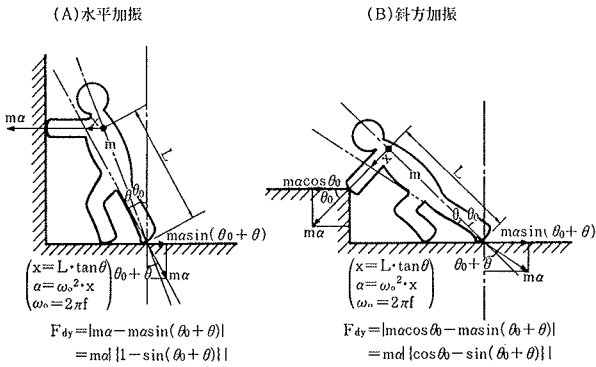


図-6 入力加振による加振力発生機構

斜方加振について検討した。加振力は同図に示すように力の作用点での水平分力のみを考えると、力の作用方向の違いからその不釣り合い分だけが建物を水平方向に加振する力と考える。すなわち、建物を水平方向に加振する力  $F_{dy}$  は(1)式で表わされる(図-6 (B)斜方加振の場合)。

$$F_{dy} = m\alpha \{ \cos \theta_0 - \sin(\theta_0 + \theta) \} \quad \dots\dots\dots(1)$$

- $m$ ; 人体の質量 (平均体重 60 kg)
- $\theta_0$ ; 加振開始前の待機姿勢 ( $\theta = 30^\circ$  推定値)
- $\theta$ ; 加振時の人体傾斜角 ( $\theta = 15^\circ$  推定値)
- $\alpha$ ; 加速度  $\alpha = (2\pi f)^2 \cdot x$
- $f$ ; 加振振動数
- $x$ ; 人体重心移動距離  $x = L \cdot \tan \theta$
- $L$ ; 人体重心高さ (平均身長 (167 cm)  $\times 0.54$ )

(1)式に諸値を代入すると人間 1 人当りの加振力  $F_{dy}$  は

$$F_{dy} = 9.3f^2 \quad \dots\dots\dots(2)$$

となり、加振振動数によってその大きさが決められる。

3.2. 加振回数について

入力加振では、加振回数には体力的な面から限界があり、建物の振動が定常状態に達する前に stop せざるを得ないことが多い。この場合には、ある加振回数時 ( $N$  回目)における振幅 ( $X_N$ ) と定常状態に達した時の振幅 ( $X_R$ ) との比率  $\eta$  を考慮することで、計算値を実測値と対応させることができる。ここで  $\eta$  は(3)式で表わされる。

$$\eta = 1 - e^{-2hN\pi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

図-7はこの関係を図示したものである。たとえば、竣工直前短辺方向の場合減衰定数 ( $h$ ) は約 1 %であり、この時は 20回の加振でも定常状態に比して約 7割程度の振幅である。

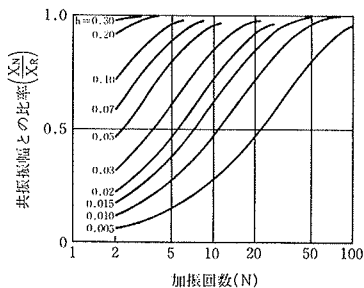


図-7 加振回数とその時の共振振幅との比率

実験実施時状態	鉄骨建方完了時		竣工直前	
	短辺	長辺	短辺	長辺
加振方法(図-6参照)	(A)水平加振	(A)水平加振	(B)斜方加振	(B)斜方加振
1質点系換算重量 W (ton)	1421	1421	4333	4333
1次固有振動数 fo (Hz)	1.075	0.975	0.675	0.750
1次減衰定数 h (%)	0.745	0.684	1.181	2.08
水平方向加振力 Fdy (kg/人)	20.0	16.5	9.3	9.3
加振人数 M (人)	6	8	12	12
加振回数 N (回)	20	20	20	20
バネ定数 K (ton/cm)	66.2	54.4	79.5	98.2
全加振力 F (Fdy $\times$ M; kg)	120	130	110	110
共振振幅 XR (10 <sup>-4</sup> cm)	1220	1750	590	270
N回加振時の振幅 XN (10 <sup>-4</sup> cm)	750	1000	460	250
N回目と共振時との比率 eta (XN/XR)	0.608	0.577	0.773	0.927
実測時の振幅 X (10 <sup>-4</sup> cm)	950	711	620	350
計算値と実測値との比率 theta (XN/X)	0.79	1.41	0.74	0.71

表-3 応答振幅の計算値との比較

3.3. 加振周期について

入力加振実験では、加振周期を建物固有周期に一致させることが原則である。今、長周期構造物を考えると、加振周期  $T_1$  は実際に加振している瞬間の時間  $\Delta T$  とは異なる場合がある。すなわち  $T_1$  が長い場合は、 $\Delta T$ の方が短かくて次の加振までの間は待機している状態となっている。この考えは(2)式の加振力の大きさを推定する場合に重要となる。そこで、人間が一番加振しやすい時間  $\Delta T$  は約 1 秒と考えると、(2)式において 1 秒以上の長周期ではすべて 1 秒とし、またそれ以下の短周期では建物の固有周期そのものの値を用い、加振自体も早く押すこととなる。短周期加振の場合、多人数での加振の同時性という点から 0.4 秒程度が実験上の限界と思われる。表-3に以上を総合して、建物を 1 質点系に置換した場合の計算結果の一覧と実測値との比較を示した。加振する各人の体型あるいは加振姿勢、建物加力瞬間の同時性など不確定要素が多いことを考えると両者は比較的良く対応していると思われる。

4. むすび

入力加振実験法に係わるいくつかの要因について簡単に述べてきた。この簡便な実験法の利点を再確認するとともに、今後この検討結果を基に、より効果的な実験計画と実施および解析を行なって資料の蓄積をはかり、将来的には、この種の振動実験の簡素化、省力化につとめる予定である。

参考文献

1) 日本建築学会: 建築物の耐震設計資料, 建築雑誌, Vol. 87, No. 1057, (昭和47. 10), pp. 1079~1084