コンサート公演中の観客の動作により発生する振動に関する考察

実態調査と加振力の同定

STUDY ON VIBRATION CAUSED BY ACTIONS OF AUDIENCE
DURING CONCERT IS GIVEN

Investigation of vibrational environment and estimation of exciting force

横山 裕*, 櫛田 裕**, 広松 猛***, 小野英哲****

Yutaka YOKOYAMA, Hiroshi KUSHIDA, Takeru HIROMATSU and Hidenori ONO

This paper presents some knowledge of vibrations caused by actions of a large audience during concert is given.

Firstly, full investigation was made into relationships between vibrations, actions of audience and music programme of a concert. From this investigation, it was made clear that main cause of the vibration was "TATENORI" action. "TATENORI" action was done by audience when rhythms of performed music became quick (about 2~3 Hz).

Secondly, from the relationships between experimental and analytical investigation, exciting force of "TATENORI" action was estimated. One time history curve was obtained as the exciting force, which was composed of triangular pulses.

Keywords : musical concert, action of audience, vibrational environment, exciting force, estimation

コンサート, 観客の動作, 振動環境, 加振力, 同定

1. 序

近年, 経済の発展, 自由時間の増大を背景に, 余暇の充実を意図したさまざまな企画が催されており, この種の企画のひとつであるコンサートについても, 開催回数, 規模ともに増大傾向にあると考えられる。大規模なコンサートを開催する場合, 採算上の理由から, 多くの観客が見込まれる都心部にある, 収容可能人員数千~数万人規模の施設を利用することが多い。このような施設でのコンサート公演中, 曲に合わせて一斉に行われる観客の動作が原因で振動が発生し, 当該建物の居住性や耐久性のみならず, 周辺建物への伝搬の観点からも重大な問題となっている。

一般に, コンサート公演中に発生する振動の原因は, 曲に合わせて行われる観客の一連の動作, すなわち『つまさき立ち→かかと着地→軽い屈伸→つまさき立ち』の繰り返しからなるいわゆる“たてのり”動作であると考えられているが, 振動と観客の動作との因果関係につ

いて詳細に検討した例はない。また“たてのり”動作時の加振力の概要を把握することは, 振動環境の予測のみならず, 施設の構造的観点からも有効な知見となり得る。

本論文は, コンサート公演中の振動環境予測および対策立案, さらににはコンサートに供する施設の構造設計, 維持, 保全のための基礎的資料を得ることを目的として, コンサート公演中の振動の測定結果二例に基づき, 振動の発生原因の確認や振動発生にいたる状況分析などを行うとともに, “たてのり”動作時の加振力について検討した結果を述べるものである。

具体的には, 「2. 実態調査」で, コンサート供用施設周辺の地盤上ならびに建物床上における振動と演奏曲との関係や観客の動作などの調査結果に基づき, 振動と観客の動作との因果関係について詳細に検討し, 「3. 加振力の同定」で, コンサート供用施設床上における振動の測定結果と有限要素法による解析結果との比較に基づき, “たてのり”動作時の加振力を同定している。

* 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 助教授・工博

** 竹中工務店・工博

*** 竹中工務店・工博

**** 東京工業大学工学部建築学科 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Takenaka Corporation, Dr. Eng.

Takenaka Corporation, Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

2. 実態調査

2.1 調査概要

調査概要を表一に示す。

調査対象としたコンサート供用施設（以降、施設①と記す）は、収容可能人員数万人の各種イベント向け多目的施設である。またコンサート公演中における振動伝搬の実態を把握する目的で調査対象とした周辺建物（以降、Kビルと記す）は、施設①の外壁から直線距離で約250mの位置にある鉄骨造9階建て事務所ビルである。なおKビルの周辺には、片側3車線の交通量の多い道路と、複々線の鉄道が敷設されている。

測定点は、施設①近傍の地盤（コンクリート舗装）上、Kビル近傍の地盤（コンクリート舗装）上ならびにKビル8階床（プラスチックタイル張り仕上げ）上の3点である。

測定する物理量は、振動加速度レベル（ $0\text{ dB}=10^{-5}\text{ m/sec}^2$, 時定数0.1 sec）および変位の時系列波形である。このうち振動加速度レベルは、調査の初期段階において振動量（オーバーオール値）の経時変化の傾向などを把握し、以降の調査における主要な検討項目を抽出することを主な目的として測定するものであり、振動数情報をも含めたより詳細な検討は、変位の時系列波形ならびにそのフーリエスペクトルが得られた段階で行う。

測定する物理量と測定点、振動方向との組合せを表一に示す。振動加速度レベルの測定に用いる加速度計はリオン社製 VM-16、変位変換器は振動技研社製 KV-1 である。なおコンサート公演中、各曲の演奏開始、終了時刻ならびに演奏中の観客の動作を観察、記録した。

2.2 調査結果

2.2.1 振動加速度レベル

2.2.1.1 振動加速度レベルと振動方向

図一に、コンサート公演中にKビル8階床上で測定された振動加速度レベルの時刻歴波形の一例を示す。

表一 調査概要

物理量 測定点 振動方向	振動加速度レベル*			時系列波形（変位）		
	X方向	Y方向	Z方向	X方向	Y方向	Z方向
Kビル8階床上	○	△	△	○	○	×
Kビル近傍地盤上	×	×	×	○	○	×
施設①近傍地盤上	○	×	×	○	○	○

X方向：施設①とKビルを結ぶ直線方向（水平方向）

Y方向：X方向の直交方向（水平方向）

Z方向：鉛直方向

○：常時測定

△：随時測定

×：測定せず

*： $0\text{ dB}=10^{-5}\text{ m/sec}^2$, 時定数0.1 sec

（イ）は、公演中ではあるが高レベルの振動が発生していない時点（以降、平常時と記す）での測定結果である。

Kビルの平面形状は長方形であり、表一の模式図に示すごとくX方向が長辺、Y方向が短辺に該当する。このような場合Y方向の振動が卓越するのが一般的であるが、測定結果では、施設①からの振動の伝搬方向にあたるX方向の振動加速度レベルがY方向のそれを上回っている。またY方向およびZ方向の振動加速度レベルからは周辺道路を走行する車両や鉄道の影響による増減が明確に読み取れるのに対し、X方向の振動加速度レベルからは読み取れない。この傾向は、公演前後に常時微動を対象として行った測定結果にも現れており、公演中、公演前後のいかにかわらず、X方向の振動には道路を走行する車両や鉄道による影響はほとんど現れないことがわかる。

2.2.1.2 振動加速度レベルと演奏曲

図一の（ロ）に、コンサート公演中でかつ高レベルの振動が発生している時点で測定された振動加速度レベルの時刻歴波形の一例を示す。図中の矢印は、各測定時点で演奏されていた曲を時間軸上に表現したものである。

図から、振動加速度レベルの演奏曲による変化を明確に読み取ることができる。つまりKビル8階床上のX方向の振動加速度レベルは、17、20曲目演奏時と比較して18、19曲目演奏時に非常に高くなっていることがわかる。これに対しY方向の振動加速度レベルは、18曲目演奏時でも平常時と大きく変化していない。一連の調査の結果、Kビルでは、18、19曲目をはじめとするある

図一 Kビル8階床上における振動加速度レベルの時刻歴波形の一例

特定の曲演奏時に、X方向の振動加速度レベルが非常に高くなることが判明した。

表—2にそれぞれの曲演奏時にKビル8階床上と施設①近傍地盤上で測定されたX方向の振動加速度レベルの最大値を示す。表には公演前後に測定された振動加速度レベルもあわせて示した。また“観客の動作”の欄には、施設①内で観察されたそれぞれの曲演奏時の観客の動作などを記した。

表から、Kビル8階床上の振動加速度レベルが特定の曲演奏時に著しく増加すること、施設①近傍地盤上の振動加速度レベルも似かよった傾向を示していることがわかる。

さらに振動加速度レベルと観客の動作との関係に着目すると、一部または大部分の観客が“たてのり”動作を

表—2 振動加速度レベルと演奏曲、観客の動作

	Kビル8階 床上 (X方向)	施設①近傍 地盤上 (X方向)	観客の動作
公演前後	40~50dB	30~35dB	
7曲目演奏時	42dB	34dB	手拍子
8曲目演奏時	46dB	34dB	手拍子無し
9曲目演奏時	45dB	38dB	手拍子無し
10曲目演奏時	47dB	38dB	手拍子、 後半一部足踏み
11曲目演奏時	44dB	36dB	手拍子
◎12曲目演奏時	53dB	43dB	手拍子、 一部たてのり
13曲目演奏時	44dB	36dB	手拍子
14曲目演奏時	44dB	40dB	手拍子
15曲目演奏時	49dB	39dB	手拍子
16曲目演奏時	41dB	33dB	手拍子
17曲目演奏時	46dB	38dB	手拍子、 一部左右にステップ
◎18曲目演奏時	59dB	40dB	手拍子、 一部たてのり
◎19曲目演奏時	64dB	39dB	手拍子、 大部分たてのり
20曲目演奏時	49dB	39dB	手拍子、 一部左右にステップ
21曲目演奏時	49dB	30dB	手拍子無し
22曲目演奏時	42dB	34dB	一部手拍子
◎23曲目演奏時	59dB	35dB	手拍子、 後半一部たてのり
24曲目演奏時	52dB	36dB	合唱、手拍子
25曲目演奏時	46dB	36dB	手拍子無し
◎26曲目演奏時	57dB	43dB	左右にステップ、 一部たてのり
27曲目演奏時	43dB	33dB	合唱、一部手拍子
28曲目演奏時	47dB	34dB	手拍子
29曲目演奏時	49dB	40dB	合唱、手拍子
30曲目演奏時	51dB	36dB	手拍子

◎：“たてのり”動作により高レベルの振動が発生した演奏曲注) コンサート公演中の測定は、7~30曲目演奏時に行った。

行っている12, 18, 19, 23, 26曲目演奏時の振動加速度レベルが相対的に高くなっていることがわかる(表—2の◎印参照)。これらの曲はいずれもテンポの速い曲で、他の曲演奏時に左右にステップを踏んでいた観客が、曲のテンポに対応しきれなくなり“たてのり”動作に移行していく様子が観察された。なお本論文では以降、12, 18, 19, 23, 26曲目演奏時を総称して高レベル振動発生時と記す。

2.2.2 時系列波形ならびにフーリエスペクトル

2.2.2.1 平常時

図—2の(イ)に、平常時に各測定点で測定された時系列波形の一例を、(ロ)にそのフーリエスペクトルの一例を示す。

図から、施設①近傍地盤上の時系列波形には明確な周期的傾向が認められないのに対しKビル8階床上では正弦振動に近似した振動が測定されていること、フーリエスペクトルからも施設①近傍地盤上では顕著な卓越振動数は認められないこと、これに対しKビル8階床上では2.48 Hz (X方向) および1.52 Hz (Y方向)の振動数が卓越していることがわかる。またKビル近傍地盤上ではX方向に2.48 Hzの卓越振動数が認められるが、これはKビルの振動の影響によるものとみなせること、Y方向にはKビルの振動の影響はX方向ほど大きく現れていないことがわかる。なおKビルの振動の影響はごく近傍の限られた範囲にのみ現れるものであり、平常時に

図—2 平常時の時系列波形、フーリエスペクトルの一例

おける地盤の振動の傾向を論じるうえで大きな問題とはならないと考える。

以上から、平常時の地盤の振動には明確な周期的傾向はなく顕著な卓越振動数は認められないこと、Kビルの水平方向の固有振動数は2.48 Hz (X方向) および1.52 Hz (Y方向) であることがわかる。

2.2.2.2 高レベル振動発生時

高レベル振動発生時の測定結果の代表例として、図—3の(イ)に19曲目演奏時に各測定点で測定された時系列波形の一例を、(ロ)にそのフーリエスペクトルの一例を示す。

図から、平常時とは異なり施設①近傍地盤上でも正弦振動に近似した振動が測定されていること、いずれの測

定点、振動方向のフーリエスペクトル上でも同一の振動数(2.48 Hz)が卓越していることがわかる。

表—3に、高レベル振動発生時に測定されたフーリエスペクトル上の振幅の最大値ならびに卓越振動数を一覧にして示す。ただしKビル8階床上のY方向のフーリエスペクトルには、いずれの曲演奏時にも地盤の振動数とKビルの固有振動数の影響が現れていたため、その双方の振幅、振動数を示した。

表から、フーリエスペクトル上の振幅を振動方向で比較すると、Kビル8階床上ではX方向の振幅がY方向の約4~20倍に達していること、施設①近傍地盤上でもX方向の振幅がY方向の約3~6倍になっておりかつZ方向の振幅がX方向のそれと同等もしくは上回っていることがわかる。このことは、Kビル8階床上ではX方向が主要な振動方向となっているが、地盤上ではX方向とともにZ方向も主要な振動方向となっていることを示唆している。

さらに図—4に、高レベル振動発生時に測定された施設①近傍地盤上のX、Z方向およびKビル8階床上のX方向のフーリエスペクトルを示す。

これらの図、表から、19曲目以外の曲演奏時にも主要な振動方向の卓越振動数は演奏曲ごとにほぼ一致しており、かつ2~3 Hzの範囲で演奏曲により微妙に変化していることがわかる。

2.3 考 察

2.2で述べた調査結果から、以下のことが考察できる。

Kビルの水平方向の固有振動数は、2.2.2.1で述べたとおりX方向(長辺方向)が2.48 Hz、Y方向(短辺方向)が1.52 Hzであることから、長方形の平面形状を有する通常のビルと同様、Kビルも構造的には短辺方向を弱辺方向とみなしてさしつかえないことがわかる。またこれを裏付ける現象として、水平2方向のうち、Y方向のみKビル床上の振動に周辺の道路を走行する車両や鉄道の影響が現れること、X方向のみKビル近傍地盤上の振動にKビルの振動の影響が現れることがあげられる。すなわちこれらの現象は、地盤の影響を受けやすいKビルのY方向の剛性が相対的に低く、地盤に影響

図—3 高レベル振動発生時の時系列波形、フーリエスペクトルの一例

表—3 高レベル振動発生時のフーリエスペクトル上の振幅の最大値ならびに卓越振動数

	Kビル8階床上		Kビル近傍地盤上		施設①近傍地盤上		
	X方向	Y方向	X方向	Y方向	X方向	Y方向	Z方向
12曲目演奏時	10.5/2.88	2.65/1.52 0.82/2.80	2.61/2.80	1.17/2.80	3.91/2.88	1.02/2.88	4.47/2.88
18曲目演奏時	15.8/2.40	3.13/1.52 1.04/2.32	3.95/2.40	0.54/2.32	1.60/2.32	0.28/2.24	2.35/2.32
19曲目演奏時	57.7/2.48	2.81/1.44 2.94/2.48	12.5/2.48	1.42/2.48	2.58/2.48	0.82/2.48	4.11/2.48
23曲目演奏時	25.0/2.48	2.37/1.52 1.22/2.48	4.76/2.48	0.78/2.48	1.42/2.48	0.57/2.48	1.23/2.48
26曲目演奏時	23.4/2.24	2.48/1.52 2.24/2.24	7.97/2.24	0.41/2.24	3.29/2.24	0.80/2.16	3.77/2.24

振幅の最大値(μm)/卓越振動数(Hz)

図—4 高レベル振動発生時のフーリエスペクトルと演奏曲

を与えやすい X 方向の剛性が相対的に高いことを示唆していると思われる。

以上に述べた K ビルの振動特性にもかかわらず、コンサート公演中の振動加速度レベルは、平常時、高レベル振動発生時とも X 方向、すなわち施設①からの振動の伝搬方向で高くなっている。さらに K ビル8階床上と施設①近傍地盤上の X 方向の振動加速度レベルが演奏曲により似かよった傾向で変化すること、卓越振動数が演奏曲ごとにほぼ一致することから、 K ビルにおける振動が明らかに地盤を介して伝搬されたものであることがわかる。

また施設①近傍地盤上では X 方向とともに Z 方向の振幅も大きくなっており、地盤の主要な運動が、振動の伝搬方向に平行でかつ地表面に垂直な面内での楕円運動に近似していることを示している。このようないわゆるレイリー波的な運動は、たとえば水面に石を落とした時に四方に広がる表面波にも存在することから、地盤の運動が鉛直方向の加振力、すなわち観客の動作により発生した可能性が高いといえる。

一方 2.2.2.2 で述べたとおり、高レベル振動発生時の卓越振動数は、演奏曲により微妙に変化しているが、これは演奏されている曲のテンポのちがいによるものと思われる。このことから、振動の原因となる観客の動作が、曲に合わせて一斉に行われる動作であることが確認できる。さらに高レベル振動発生時の卓越振動数の範囲と表—2 から、振動の原因となる動作は当初の予想どおり“たてのり”動作であり、曲のテンポがおおむね 2 Hz より速くなると“たてのり”動作が始まること

がわかる。ちなみに K ビルの X 方向の固有振動数 (2.48 Hz) が“たてのり”動作の行われやすい振動数範囲 ($2\sim 3\text{ Hz}$) 内に存在することが、施設①近傍地盤上では知覚されないレベルの当該振動を K ビル8階床上では十分に知覚され得るレベルまで助長する要因のひとつであることは、明らかといえる。

2.4 まとめ

本調査により得られた知見を、以下に述べる。

- 1) 曲に合わせて一斉に行われる観客の“たてのり”動作は、コンサート公演中に発生する振動の主要な原因といえる。
- 2) “たてのり”動作は、速いテンポの曲演奏時に行われる。曲のテンポがおおむね 2 Hz より速くなると、観客の動作は左右にステップを踏む動作から“たて

のり”動作に移行する。

- 3) “たてのり”動作により発生する振動は、地盤を介して周辺に伝搬される。この時地盤は、いわゆるレイリー波的な運動をする。したがってコンサート公演中に周辺建物で発生する振動には、強い方向性がある。

なお 2), 3) で述べたように、コンサート公演中に発生する振動の振動数範囲ならびに振動方向が比較的限定されていることは、振動に対する対策を立案するうえで複雑さを排除できる要因になるといえる。

3. 加振力の同定

3.1 対象床の概要

加振力を同定するため測定、解析の対象とした床は、RC 造、収容可能人員 1 万人強の施設（以降、施設②と記す）の 2 階階段床である。図—5 に施設②の 2 階階段床の平面形状を模式化して示す。

2 階階段床はほぼ正 8 角形の平面形状をしており、外

図—5 2階階段床の概要ならびに測定点

側から内側に向かって下り勾配のついた観客席となっている。なお階段床の内側は吹抜けとなっている。

また2階階段床はその平面形状に応じて8等分されており、「南」、「南東」のようにそれぞれの方角で呼称されている。この呼称にしたがって8等分されたうちのひとつである2階階段床「南」の概要を図に示す。

各方位の階段床とも、内側から9段目までが片持ち梁により支持された部分(以降、張り出し部と記す)となっている。本論文ではこの張り出し部を測定、解析の対象とする。

図—6に張り出し部を構成する主要な梁の配置と、張り出し部の断面を示す。

片持ち梁の断面は、図に示すごとく支持部から鼻先に向かって徐々に小さくなっている。なお張り出し部の構造は各方位ともおおむね同じであるが、「東」、「西」張り出し部鼻先に質量約3000 kgの電光掲示板が取り付けられていること、「南」張り出し部階下には図—5に点線で示した位置に壁が設けられていることから、これらの方位の振動性状は他の方位と多少異なることが予想される。

3.2 振動の測定

3.2.1 測定概要

張り出し部における鉛直方向の固有振動数と減衰定数、振動モード、コンサート公演中の応答を測定した。

図—6 張り出し部の構造の概要

このうち固有振動数と振動モードは、解析の際、解析モデルの妥当性を検証するための資料となるものである。測定は「南」張り出し部を対象として行ったが、固有振動数の測定のみ、3.1で述べた方位による振動性状の差を把握する目的で、全方位を対象とした。

固有振動数、減衰定数は、張り出し部の中で最も大きく振動すると予想される鼻先中央部、すなわち図—5に示すC1点に変位変換器(振動技研社製KV-1、以下同様)を設置し、その近傍を加振したときに得られる時系列波形ならびにそのフーリエスペクトルから求めた。また振動モードは、図に示すごとく加振点▲、基準測定点○および測定点●を設定したうえで、以下の手順で測定した。

- ① 基準測定点に変位変換器を設置する。
- ② 測定点のいずれかに変位変換器を設置する。
- ③ 加振点を加振し、基準測定点ならびに測定点の振動を同時測定する。
- ④ 基準測定点と測定点の伝達関数を求め、両者の振幅比、位相差を記録する。
- ⑤ 測定点を順次移動し、②→④の手順を繰り返す。
- ⑥ 全測定点での振幅比、位相差から振動モードを求める。

ここで測定範囲を張り出し部全体としなかったのは、張り出し部全体の振動モードに対称性があり、かつ張り出し支持部は大梁による拘束の影響でほとんど振動しないと予想されたことによる。なお加振器には、JIS A 1418に基づく自動重量衝撃音発生器を用いた。

コンサート公演中の応答は、C1点に設置した変位変換器で測定した。また比較の意味で、公演前後に常時微動を対象とした測定も行った。公演中、「南」張り出し部は満席(386人)であった。また観客の大部分は女子中、高校生とみなされた。

3.2.2 測定結果

3.2.2.1 固有振動数、減衰定数

固有振動数、減衰定数の測定結果を、表—4の“測定結果”の欄に示す。

固有振動数には、方位ごとに明確な傾向がみうけられる。すなわち「東」と「西」では6.4 Hzと他の方位より低く、また「南」では8.8 Hzと高くなっており、当初の予想どおり、鼻先に取り付けられた電光掲示板の質量や階下に設けられた壁による拘束の影響が現れていることがわかる。なお他の方位の固有振動数はいずれも7.2 Hzと安定しており、電光掲示板や階下の壁のない方位の張り出し部の振動性状はほぼ等しいことを示唆している。

一方減衰定数は2.92~7.96%の範囲に分布しており、その平均値は4.95%である。一般にRC床の減衰定数は4~5%前後であることから¹⁾、張り出し部の減

表—4 固有振動数，減衰定数の測定結果ならびに固有振動数の解析結果

方位	測定結果		解析結果	備考
	固有振動数	減衰定数	固有振動数	
北	7.2Hz	2.92%	7.2Hz	
北東	7.2Hz	4.39%		
南東	7.2Hz	7.96%		
南西	7.2Hz	5.26%		
北西	7.2Hz	4.74%		
東	6.4Hz	4.28%	6.4Hz	鼻先に電光掲示板あり
西	6.4Hz	5.55%		
南	8.8Hz	4.55%	9.0Hz	階下に壁あり

図—7 振動モードの測定結果ならびに解析結果

衰性状が一般の RC 床のそれと大きく異ならないことがわかる。

3.2.2.2 振動モード

図—7の“測定結果”の欄に，測定の結果明らかとなった「南」張り出し部の1～3次振動モードを示す。

各次の振動モードともおおむね図—5に示すCラインを軸とした線対称となっており，かつ3ライン上の各測定点はほとんど振動していないことから，張り出し部全体の振動モードを測定結果から容易に推定することができる。

1次振動モードでは，張り出し部全体が同位相で振動しており，2次振動モードでは，片持ち梁と同じ方向にひとつの振動の節（ノードライン）が発生しその両側が逆位相で振動している。また3次振動モードでは，片持ち梁と直交方向にノードラインが発生している。いずれの振動モードでも，「南」張り出し部と45°の角度をもって接続している「南東」張り出し部による拘束の影響で，Hライン上の各測定点はほとんど振動していない。このことから，張り出し部の解析モデル作成の際，方位ごとに8等分されたうちのひとつずつを個々に扱っ

測定点：C1 表—5 最大振幅と演奏曲

		最大振幅			最大振幅
公演前後		2 μ m	13曲目演奏時		—
公 演 中	◎1曲目演奏時	350 μ m	公 演 中	14曲目演奏時	—
	◎2曲目演奏時	500 μ m		◎15曲目演奏時	600 μ m
	3曲目演奏時	250 μ m		◎16曲目演奏時	600 μ m
	◎4曲目演奏時	600 μ m		◎17曲目演奏時	750 μ m
	◎5曲目演奏時	550 μ m		◎18曲目演奏時	713 μ m
	6曲目演奏時	250 μ m		◎19曲目演奏時	713 μ m
	◎7曲目演奏時	750 μ m		◎20曲目演奏時	638 μ m
	8曲目演奏時	225 μ m		◎21曲目演奏時	480 μ m
	9曲目演奏時	—		◎22曲目演奏時	713 μ m
	10曲目演奏時	—		◎23曲目演奏時	480 μ m
	11曲目演奏時	—		24曲目演奏時	300 μ m
	12曲目演奏時	—		25曲目演奏時	—

◎：観客が“たてのり”動作をした演奏曲
—：公演前後と同等

ても，左右の張り出し部による拘束の影響が適切に評価されていれば，実用上さしかえなないであろうことが推定できる。

3.2.2.3 コンサート公演中の応答

表—5に，コンサート公演中に測定された振幅の曲ごとの最大値（以降，最大振幅と記す）を一覧にして示す。また比較の意味で，公演前後に測定された値もあわせて示す。

表から，「2. 実態調査」で述べたと同様，公演中の応答は，演奏されている曲により顕著に変化していることがわかる。ちなみに公演中演奏された曲をおおまかに分類すると，テンポの速い曲と遅い曲のふたつに大別できた。後者に属する曲（8～14曲目と25曲目）演奏時の最大振幅は，ごく一部を除いて公演前後と同等となっている。これらの曲演奏時には，大部分の観客が着席していた。一方，テンポの速い曲演奏時の最大振幅は，いずれも公演前後の数百倍とかなり大きくなっている。これらの曲演奏時には大部分の観客が立ち，特に表に◎印で示した曲演奏時には“たてのり”動作をしていた。

図—8に，“たてのり”動作をとる曲演奏時の応答の測定結果の代表例として，17，18，22曲目演奏時に測定された時系列波形を示す。

一般に床は，人間の動作に対して，加振力に相応した応答と固有振動数に相応した応答が複合された応答を示すことが知られているが²⁾，測定結果からも同様の傾向を確認することができる。すなわちいずれの曲演奏時にも1秒間に2～3回の割合で三角形に似た形状の山が繰

図—8 コンサート公演中の応答の測定結果の代表例

り返されているが、これは観客の“たてのり”動作により発生する加振力に相応した応答とみなすことができる。また加振力に相応した応答の合間に小さな乱れが認められるが、これは1次固有振動数に相応した応答とみなすことができる。このようにコンサート公演中の応答が、人間の動作に対する床の応答として一般的な傾向を示すことは、加振力に相応した応答の振幅および山の形状、間隔などを参考にして、“たてのり”動作時の加振力を同定できる可能性が高いことを示唆している。

3.3 解析

3.3.1 固有値解析

3.3.1.1 解析モデルの作成

本論文では、解析手法として有限要素法を選定した。図—9に、3.2.2.2で得られた知見から、方位ごとに8等分された張り出し部のひとつを対象として作成した解析モデルを示す。

張り出し部の平面形状は図—5に示すとおり実際には等脚台形をしているが、台形の解析モデルを作成するのは非常に困難であることから、図—9に示すごとく面積が等しくなる長方形に置き換えた。

拘束条件は、振動モードの測定結果を参考に、片持ち梁支持部に配された大梁や左右の張り出し部による拘束の影響を取り入れた拘束条件とした。種々検討の結果、

- 1) 片持ち梁支持部の柱の4隅に該当する部分ピン支持
- 2) 左右の張り出しとの取り合い部はX軸およびY軸回りの回転拘束

なる境界条件を設定した。このうち1)は、一般のラーメン構造床で通常用いられている拘束条件である³⁾。また2)で両方向の軸回りの回転を拘束したのは、左右の張り出しとの取り合い部が45°の角度をもっていることを考慮したためである。

階段床の解析モデル化にあたっては、けあげ材の剛性評価が重要と考える。本論文では図に示すごとく、けあげ材に相当する部分が厚さ B' (=踏面材厚 A +けあげ高さ B)のリップとなるジョイスト的な構造形式の解析モデルを作成した。したがって本解析モデルにおける階

図—9 解析モデルの概要

段床は、直交する2方向で剛性の異なるいわゆる異方性床版⁴⁾に類似している。

解析モデルは、「北」、「北東」、「南東」、「南西」、「北西」を基本に作成し、「南」を対象とした解析モデルでは、図に点線で示す部分に階下の壁による拘束条件を付加した。具体的には、壁と直交する軸回りの回転を拘束した。また「東」、「西」を対象とした解析モデルでは、図に1点鎖線で示す部分に、電光掲示板に相当する合計3000 kgの質量を均一に付加した。

3.3.1.2 解析結果および解析モデルの妥当性の検証

3.3.1.1で述べた解析モデルを用いて、固有値解析を行った。表—4に解析の結果得られた固有振動数を、測定結果と比較して示す。

電光掲示板や階下の壁の影響を含め、いずれの方位でも、解析結果は測定結果ときわめてよく一致している。

つぎに解析の結果得られた「南」張り出し部の振動モードを、図—7の“解析結果”の欄に示す。

応答解析上最も重要と思われる1次振動モードが、測定結果とよく一致していることがわかる。また2~3次振動モードにおけるノーダルラインの現れ方が測定結果と一致していることから、本解析モデルにより階段床の異方性を適切に評価できていることがうかがえる⁴⁾。さらにいずれの振動モードでも左右の張り出しとの取り合い部はほとんど振動していないことから、左右の張り出し部による拘束の影響を適切に評価できていることがうかがえる。

以上から、本解析モデルを用いて“たてのり”動作時の加振力を同定することの妥当性が検証できたといえる。

3.3.2 応答解析

3.3.2.1 加振力の設定

筆者の一部らは、人間がかけ足動作時に床に与える荷重を測定した結果を報告している⁵⁾。図—10の(イ)に、

図—10 加振力の設定経過、結果ならびに応答解析結果

その一例を実線で示す。

荷重の最大値 $L_{\max}$ の体重 W に対する比 $L_{\max}/W$ は約 2.5、荷重が最大値に達するまでに要する時間 Δt は約 0.1 sec である。

またこの結果から、動作の速さ、つまり着地間隔を仮に 0.35 sec (2.86 Hz) とした場合に床に作用すると考えられる荷重の時系列波形を推定した結果を、図の (ロ) に示す。

着地する際に発生する三角形の山の形状が、公演中に測定された山 (図—8 参照) の形状と非常に近似していることがわかる。

一方筆者の一部は、実在床で蓄積されたデータからかけ足動作時とはほぼ同等の応答が得られることが明らかとなっている⁶⁾『つまさき立ち→かかと着地』からなるいわゆる“かかと衝撃”動作時に、人間が床に与える荷重の動的成分を測定している⁶⁾。結果の一例を図の (イ) に点線で示すが、かけ足動作と比較して $L_{\max}/W$ が大きく、 Δt が小さくなっている。このように荷重がより衝撃的となっている主な理由として、“かかと衝撃”時に被験者は膝をほとんど伸ばしたままで動作していることがあげられる。つまり波形の形状は、膝の屈伸による緩衝作用の影響で種々変化することが予想される。

本論文では、“たてのり”動作時の膝の動きがかけ足動作時と比較的似かよっていることに着目し、(ロ)の波形を基本に加振力を設定することとした。ただし“たてのり”動作の場合、かけ足動作と異なり体が完全に宙に浮く瞬間がないため、(ロ)に示したごとく荷重が 0 となることはないと考えられる。また最大値も、動作の

激しさから判断して、(ロ)に示したごとく体重の 2.5 倍に達することは少ないと思われる。ここで加振力の同定にあたり重要な値は、最大値、最小値などの荷重の絶対値よりむしろその差であると考えられる。つまり“たてのり”動作による振動の影響は、そのほとんどが応答の絶対値よりむしろ振幅の大きさ、すなわち動的成分の大きさに依存していると考えられる。

以上から、一人の“たてのり”動作時の加振力を図の (ハ) に示すごとく設定し、 α の値を $\alpha \leq 2.5$ の範囲で変化させ、得られる解析結果と測定結果とを比較することとした。

3.3.2.2 解析結果および加振力の同定

図—10 の (ハ) に示した加振力を、図—9 に示した加振点▲、▼に所定の人数分整数倍して同時に加え、応答解析点●の応答を求めた。加振点の配置は、コンサート公演中の観客の人数および座席配置を考慮して定めたものである。また応答解析点は、図—5 に示した C1 点に該当するものである。なお減衰定数は、3.2.2.1 で述べた測定結果を参考に 5 % とした。

「南」張り出し部を対象とした解析結果を、図—10 の (ニ) に示す。

解析の結果得られる波形の形状に、 α の値による変化はない。この解析結果を図—8 と比較すると、18 曲目演奏時の測定結果と波形の形状が最もよく近似している。これは加振力の周期が 18 曲目のテンポ (図—8 参照) に最も近かったためと思われる。逆に加振力の周期を微妙に変化させることにより、17、22 曲目演奏時の波形の形状を容易に再現することもできると考える。

以上の検討から、本論文では、18 曲目演奏時の振幅の測定結果と解析結果を対応させることにより、 α の値を決定することとした。3.2.1 で述べたとおり、大部分の観客が女子中、高校生とみなされたことから、観客の体重を 441 N (45 kgf) としたうえで α の値を種々変化させ検討した結果、 $\alpha = 0.75$ の時、両者は最もよく対応することが判明した。すなわち、測定の結果得られた全振幅に 1/2 を乗じて求めた振幅の平均値 595 μm に対し、解析結果は 587 μm であり、両者はよく一致しているといえる。

以上から、コンサート公演中の観客の“たてのり”動作による加振力を同定した結果として、図—10 の (ハ) で $\alpha = 0.75$ とした場合の時系列波形を提示する。ただし加振の周期は、演奏される曲のテンポにより変化することを付け加える。

3.4 まとめ

コンサート公演中、観客の“たてのり”動作時に床に作用する荷重の動的成分は、荷重の最大値と最小値の差が観客の体重の約 0.75 倍、荷重が最小値から最大値に達するまでに要する時間約 0.1 sec、最大値からふたた

び最小値に至るまでに要する時間約 0.1 sec の三角形に近似したパルスが、曲のテンポに応じて繰り返される時系列波形で代替できる。

4. 結

本論文で述べた調査ならびに測定、解析の結果、コンサート公演中に発生する振動と、観客の動作との因果関係が明らかになった。すなわち比較的テンポの速い曲演奏時に曲に合わせて一斉に行われる“たてのり”動作が、振動の主要な原因であることを明確にした。また“たてのり”動作による振動は、その振動数範囲や、地盤を介して伝搬される場合の周辺建物上での振動方向が比較的限定されていることなど、振動に対する対策を立案するうえで有効ないくつかの知見を提示した。さらに最も重要な基礎的資料のひとつである加振力の動的成分の概要を把握した。

コンサート公演中の観客の動作を規制することは、事実上不可能に近いといえる。したがって周辺の振動環境やコンサート供用施設の維持、保全などの観点から問題が発生した場合、なんらかの構造上あるいは運用上の対策を施す必要が生じる。また今後施設を改修したり新たに建設する場合、“たてのり”動作の影響を設計段階で事前に予測し対処することが要求されてこよう。本論文で得られた知見が、より効果的かつ経済的な対策立案、さらには設計段階での予測のための一助となれば幸いである。

謝 辞

本論文に際し有益な御助言をいただきました、蔭山紀彦氏（山田 守建築設計事務所常務取締役）、鈴木信男氏（同主任）に謝意を表します。また調査ならびに測定、解析に御協力いただいた（株）竹中工務店技術研究所関係各位に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 櫛田 裕：統計的手法に基づく床振動性能評価に関する研究，日本建築学会計画系論文報告集，第 407 号，pp. 57～67，1990 年 1 月
- 2) 小野英哲，横山 裕：人間の動作により発生する床振動の振動感覚上の表示方法に関する研究—振動発生者と受振者が同じ場合—，日本建築学会構造系論文報告集，第 381 号，pp. 1～9，1987 年 1 月
- 3) 橋本嘉之，広松 猛，阿部隆之，櫛田 裕：床構造の面外振動性状に関する研究（その 3）梁・柱の条件設定の一考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（構造系），pp. 989～990，1984 年 10 月
- 4) 阿部隆之，広松 猛，櫛田 裕，橋本嘉之：床構造の面外振動性状に関する研究（その 11）直交異方性を有する床構造の振動性状，日本建築学会大会学術講演梗概集 B，pp. 385～386，1989 年 10 月
- 5) 小野英哲，三上貴正，岩崎淑子，横山 裕：エアロビックスダンスフロアのかたさ，すべりの評価方法に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第 385 号，pp. 1～7，1988 年 3 月
- 6) 櫛田 裕：建築物における鉄骨系床構造の防振設計法に関する研究，北海道大学学位論文，1990 年 12 月

（1991 年 9 月 6 日原稿受理，1992 年 2 月 6 日採用決定）