

風鳴り音が発生しないアルミ製バルコニー手摺りの開発

義江 龍一郎

魏 然

丸山 勇祐

要 旨

中高層集合住宅のバルコニーには、手摺り子タイプのアルミ製軽量手摺りが良く用いられるが、手摺り子間を吹きぬける風の作用により大きな風鳴り音を発生させることがある。こうした風鳴り音の主たる原因は手摺り子の振動によるものであるが、本研究ではまずその振動に関して風洞実験等により詳細な調査を行なった。その結果、手摺り子の減衰が極めて小さいため、手摺り子間に発生する渦の周波数と手摺り子の固有振動数が一致した時に、手摺り子が大きく共振してびびり音が発生することがわかった。この結果を踏まえ、従来の「補強」という方法ではなく、手摺り子に減衰を付加するという概念に基づく新型手摺りを考案し、風洞実験等によりその効果について検討した。新型手摺りでは、手摺り子の共振が効果的に抑えられ、びびり音が発生しなくなることを確認した。

キーワード 手摺り 風鳴り音 渦励振 減衰

目 次

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. はじめに | 5. 風鳴り音が発生しない手摺りの開発 |
| 2. 実験概要 | 6. まとめ |
| 3. 風鳴り音の発生状況 | 7. おわりに |
| 4. 風鳴り音の発生メカニズム | |

CONTRIVANCE OF A BALUSTRADE FREE FROM WIND-INDUCED NOISE

Ryuichiro YOSHIE
Yusuke MARUYAMA

RAN Wei

Synopsis:

Balustrades at balconies of condominiums tend to cause wind-induced noise when the balusters vibrate at their natural frequencies synchronizing with the vortex shedding. According to our investigations, the balusters resonate violently because the damping ratios of them are extremely small. We contrived a simple mechanism that gives an additional damping to balusters. Wind tunnel experiment was conducted to verify the effectiveness of the contrived balustrade. The result of the experiment was highly satisfactory; the vibration of the balusters was effectively restrained and the wind-induced noise did not occur any more.

1. はじめに

中高層集合住宅では、手摺り子タイプのアルミ製軽量バルコニー手摺りが良く用いられる。しかしこうした手摺りは、その手摺り子間を吹き抜ける風的作用により、大きな音を発生させる場合がある。当社の施工した物件でも、大きな風鳴り音が頻繁に発生して、住民から苦情を寄せられた事例が過去にいくつかある。

筆者らはこれまで、こうした風鳴り音の問題に対して風洞実験による調査を行ない、その主たる原因が手摺り子の風による振動であることを明らかにした¹⁾。そしてその結果に基づき、手摺り子に横棧をビス留めして補強し振動を抑える対策¹⁾を採ってきた。しかしながらこの対策方法は、1)手摺りの美観を損なう、2)子供の足がかかりとなる危険性がある、3)横棧を手摺り子1本1本にビス留めするため、コストと手間がかかる、4)風速6m/s前後で発生する大きな音をなくすことはできるものの、やはり風速12m/s前後で音が発生してしまう、などの欠点があった。またあくまで問題が起きた物件に対して、やむを得ず施す対策方法であり、新築される建物に適用するには難がある。

そこで今回、上記のような欠点が無い、新築建物にも適用可能な手摺りを開発することをめざし、立山アルミニウム工業と共同開発を行った。

上記のように、風鳴り音の主たる原因は手摺り子の振動によるものであることは既にわかっているが、今一度原点に立ち返り、まずその振動に関してより詳細な調査を行った。次にその調査結果を踏まえ、これまでの「横棧補強」とは発想が異なる方法を考案し、試作試験体を作成して、その効果を風洞実験により確認した。

2. 実験概要

2.1 試験体

実大の手摺りの1ユニット分を試験体として実験を行った。手摺り子の断面形状が正方形、長方形、円形、楕円形のもの、手摺り子どうしの間隔を変化させたものなど、合計15種類の試験体について実験を行なったが、本報では、その中から、集合住宅で最も一般的に用いられる見つけ幅20mm×奥行き40mmの長方形断面の手摺りについて述べる。試験体の姿図および手摺り子の断面を図-1に示す。手摺り子の長さは934mm、手摺り子どうしの間隔は芯々で60mmである。

2.2 風洞実験方法

風洞実験は前田建設工業（株）風洞実験施設第1測定部にて行なった。測定部断面は幅2.3m×高さ2mである。

風鳴り音の発生条件および発生メカニズムを明らかにすることを目的とし、様々な風向・風速条件のもとで、音、手摺り子の振動、手摺り子間に生ずる渦の周波数を

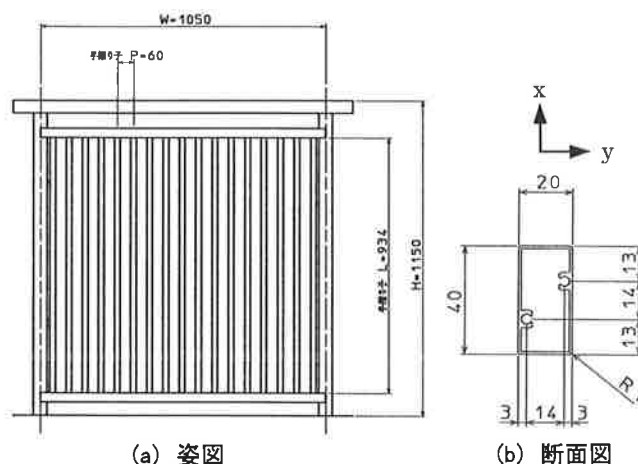


図-1 試験体図



写真-1 風洞実験状況

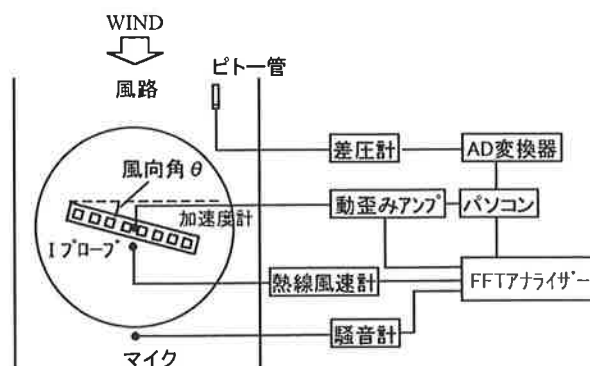


図-2 測定システム

測定した。以下に、設定した風速・風向の条件、測定方法（図-2）について述べる。

(1) 風向・風速の条件

写真1に示すように、実大試験体を風洞のターンテーブル上に固定し、これを回転させて風向角を変化させた。試験体の正面から風が当たる場合を風向角 $\theta=0^\circ$ とし、

対称性を考慮して、0° ～180° まで10° きざみで変化させた（図-2 参照）。

また風速は試験体上流に設置したピトー管により測定し、風洞の最大能力である約21m/sまで、約1m/sきざみで変化させた。実験気流は一樣流としている。

(2) 風鳴り音と手摺り子の振動の測定方法

試験体より下流側1mの風洞床に小さな穴を開け、その中にマイクロフォンを設置して発生音を採取し、中央の手摺り子に振動加速度センサーを貼りつけて、手摺り子の振動を測定した。ただし、風鳴り音の発生の有無の判断は主として聴感評価とした。これは風洞内の暗騒音が大きく、特にかすかな風鳴り音を騒音レベル等のデータから判断するのは困難なためである。これに対して人間の耳は、暗騒音が大きくてもかすかな風鳴り音を敏感に聞き分けることができる。

聴感により風鳴り音が発生していると判断された場合には、騒音レベルを測定するとともに、音と振動の周波数特性をFFTアナライザーにより調べた。

(3) 手摺り子間に発生する渦の周波数の測定方法

I型熱線風速計を、中央の2本の手摺り子の間、風下側約3cmの位置に設置し、FFTアナライザーにより風速変動の卓越周波数（渦の周波数）を読みとった。

2.3 手摺り子の固有振動数、減衰定数の測定

まず手摺り子をインパルスハンマーで加振し、振動加速度の自由振動波形を採取した。この波形をフーリエ変

換して手摺り子の1次と2次の固有振動数を求めた。次に1次、2次それぞれの固有振動数を中心とするバンドパスフィルターをフーリエスペクトルに施し、これを逆フーリエ変換することにより、1次の自由振動波形、2次の自由振動波形をそれぞれ求めた。そしてこの自由振動波形を用いて最小二乗法により減衰定数を求めた。

3. 風鳴り音の発生状況

表-1に風鳴り音の発生状況を示す。風向60°～120°の範囲では風鳴り音は発生していないが、風向0°～50°（手摺りの表側から風が吹く場合）および、風向130°～180°（手摺りの裏側から風が吹く場合）では、かなりの風速範囲にわたって風鳴り音が発生している。

表中の「低」、「中」、「高」とは風鳴り音の音色を表わしたものである。「低」は「ブーン」というびびり音、「中」は「プーン」というびびり音、「高」は「ピー」という笛のような音である。その横の数字は10秒間の等価騒音レベル（10秒間のパワー平均騒音レベル）を示している。右端の欄の暗騒音とは試験体を風向70°（風鳴り音が発生しない風向）に設置した時の騒音レベルである。黒く塗りつぶしているものは、はっきり聞こえる特に大きな音、網掛けははっきり聞こえる音、網掛けなしは耳をすまさないで識別できないようなかすかに聞こえる音を表している。はっきり聞こえるか、かすかに聞こえるかの区別は試験者の聴感によるものであるが、概ね風鳴り音の騒音レベルと暗騒音との差が5dBを超えると、はっきり聞こえると感じるようである。

表-1 風鳴り音の発生状況

一：風鳴り音発生せず

低：ピーンというびびり音

中：プーンというびびり音

高：ピーという笛のような高い音

※網掛け無しは、かすかに聞こえる音

網掛けは、はっきりきこえる音

黒の塗りつぶしは、はっきりきこえる特に大きな音

風速 (m/s)	風向角(°)																		暗騒音 dB(A)	
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170		180
1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68
1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	69
2.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	71
3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70
4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70
5.4	低75	低76	低75	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	低74	低76	低79	低74	73
6.3	低87	低86	低83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	低77	低85	低87	低86	75
7.3	低92	低91	低90	低84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	低77	低80	低87	低91	低93	低90	76
8.3	—	—	低86	低84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	低85	低86	—	—	—	77
9.3	—	低78	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	低82	—	—	—	—	77
10.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	79
11.3	—	高80	高80	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高81	高81	—	81
12.3	—	高82	高82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高82	—	82
13.3	—	高84	高83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高83	—	83
14.3	—	高87	高85	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高85	—	84
15.3	—	高90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高86	—	85
16.2	—	高89	中90	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高89	—	87
17.2	高90	高94	中高92	中高92	中92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	中93	中高93	高91	89
18.2	中高93	中高97	中95	中97	中97	中92	—	—	—	—	—	—	—	—	—	中95	高94	中高97	中高92	90
19.2	中94	中98	中99	中101	中97	中96	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	中100	中101	中97	91
20.2	中102	中101	中101	中103	中100	中97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	中103	中103	中102	93
21.2	中106	中105	中102	中103	中101	中99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	中104	中106	中107	中107	94

4. 風鳴り音の発生メカニズム

4.1 手摺り子間に生じる渦の周波数

図-3 に風向 0° および 30° の場合の、手摺り子間に生じる風速変動の卓越周波数（渦の周波数）と風速との関係を示す。風速変動の測定点は、中央の2本の手摺り子の間、風下側に3cmの位置である。なお、風向 60° の測定も行ったが、この場合は卓越する周波数は見られなかった。

図から明らかなように、渦の周波数は風速に比例して高くなっていく。後で詳しく述べるが、この渦は手摺り子に対して、風向直角方向の周期的な外力を作用させる。渦の周波数と手摺り子の固有振動数が一致すると、手摺り子が風向直角方向に大きく共振して風鳴り音が発生する。

風向が 0° の場合と風向 30° の場合を比べると、 30° のほうが渦の周波数が若干低くなっている。そのため後述する手摺り子の固有振動数との共振風速が高くなるため、風鳴り音が発生する風速は、表-1 に示したように風向 30° の方が風向 0° よりも若干高くなる。ストローハル数 $f_v B / V$ （ f_v は渦の周波数、 B は手摺り子の見つけ幅、 V は風速）を求めると、風向 0° の場合が0.263、風向 30° の場合0.244 となり、単独柱のストローハル数と比べるとかなり高くなっている。手摺り子のような列柱の場合には、その閉塞効果によりストローハル数が高くなるものと考えられる。手摺り子の間隔を広くするとストローハル数は低くなり、例えば間隔が90mmの時は0.250、110mmの時は0.238（いずれも風向 0° の場合）であった。

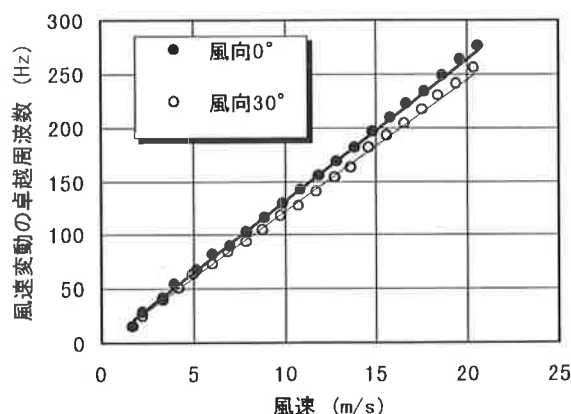


図-3 風速変動の卓越周波数（渦の周波数）と風速との関係

4.2 手摺り子の固有振動数と減衰定数

手摺り子の y 方向（図-1 参照）の固有振動数と減衰定数を表-2 に示す。本手摺り子の y 方向の固有振動数は1次：80Hz、2次：280Hz であった。これは、次式で求められる両端ピン支持の棒の固有振動数の理論値とほぼ一致している。

$$f_n = \frac{n^2 \pi}{2l^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (1)$$

ここで、 f_n ：n 次固有振動数、 n ：次数、 l ：棒の長さ、 A ：棒の断面積、 E ：棒のヤング係数
 ρ ：棒の密度、 I ：棒の断面2次モーメント。

手摺り子の減衰定数は1次が0.2%、2次が0.3%であり、非常に小さい。

表-2 手摺り子の固有振動数と減衰定数（y 方向）

	固有振動数	理論値(1)式	減衰定数
1次	80 Hz	77 Hz	0.2 %
2次	280 Hz	307 Hz	0.3 %

4.3 手摺り子の振動加速度

図-4 に風向 0° の場合の、手摺り子の y 方向振動加速度と風速との関係を示す。測定点は、中央の手摺り子の下端から $1/4 \cdot l$ の点である。

風速 6~7m/s 前後で、渦の周波数が 80Hz 前後となり（図-3 参照）、手摺り子の y 方向1次固有振動数 80Hz と一致するため、手摺り子が大きく共振する。風速を上げると渦の周波数は高くなり、手摺り子の固有振動数から離れるため、一旦振動が収まる。風速が 21m/s 程度になると、今度は渦の周波数が手摺り子の y 方向2次固有振動数と一致するため、再び共振して振動が大きくなる。

共振風速付近では、鋭いピーク形状を示しているが、これは、上述のように手摺り子の減衰が非常に小さいためである。

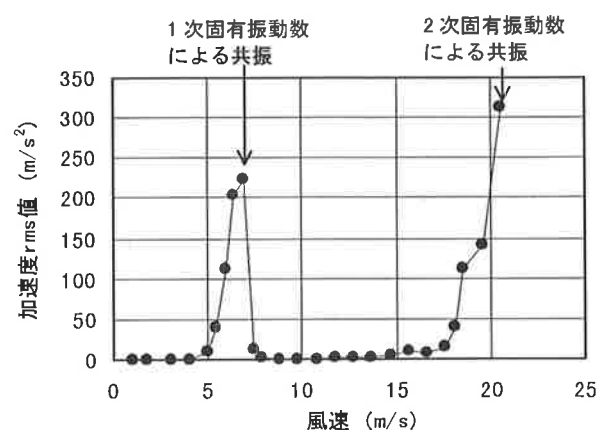


図-4 手摺り子の y 方向振動加速度と風速との関係（測定位置：中央の手摺り子、下から $1/4 \cdot l$ の点）

4.4 風鳴り音の周波数特性

(1) 「低」の音の周波数特性

図-5 に「低」の音が顕著に発生する風向 0° ・風速 7.3m/s 時の音圧のパワースペクトルを、風速変動および手摺り子の振動加速度のパワースペクトルと併せて示す。

表-1 および図4 に示したように、この風向・風速では渦の周波数と手摺り子の1次固有振動数が一致し、手摺り子が共振して“ブーン”というびびり音が発生する。この振動により、手摺り子の上下端部と横水平材が細かく接触を繰り返し、ここから音が発生しているようである。

風速と加速度のパワースペクトルには、手摺り子の1次固有振動数に相当する80Hzのところにまず鋭いピークが立っている。この他に風速のスペクトルには80Hzの2倍、3倍の周波数にもやや緩やかなピークが見られ、加速度には、2000Hzまでずっと80Hzの整数倍の周波数に顕著なピークが見られる。こうした基本となる周波数の整数倍の周波数成分は高調波といわれるものであり、これは非線型振動の大きな特徴のひとつである²⁾。手摺り子の振動加速度に顕著な高調波が見られるのは、手摺り子と横水平材が細かく接触を繰り返すといった非線型の要素が強いためと考えられる。

音圧のスペクトルにも、加速度の高調波と同じ周波数に顕著なピークが見られる。なお、300Hzのピークは風洞ファンノイズである。

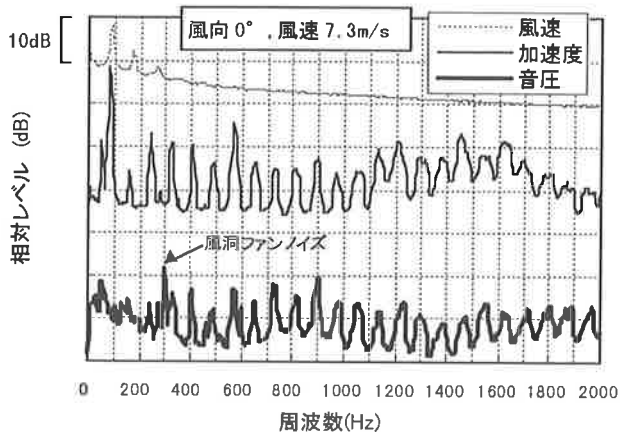


図-5 「低」の音が発生する場合の風速変動、振動加速度、音圧の周波数特性

(2) 「中」の音の周波数特性

図-6 に「中」の音が顕著に発生する風向 0°・風速 21.2m/s 時の風速変動および手摺り子の振動加速度、音圧のパワースペクトルを示す。表-1 および図4 に示したように、この風向・風速では渦の周波数と手摺り子の2次固有振動数が一致し、手摺り子が共振して“ブーン”というびびり音が発生する。これも振動により、手摺り子の上下端部と横水平材が細かく接触を繰り返し、ここから音が発生している。

「低」の音と同様、振動加速度と音圧のスペクトルには、手摺り子の2次固有振動数280Hzを基本振動数とする高調波が顕著に認められる。この高調波も、手摺り子の上下端と横水平材が細かく接触を繰り返す等の非線形性が要因になっていると考えられる。

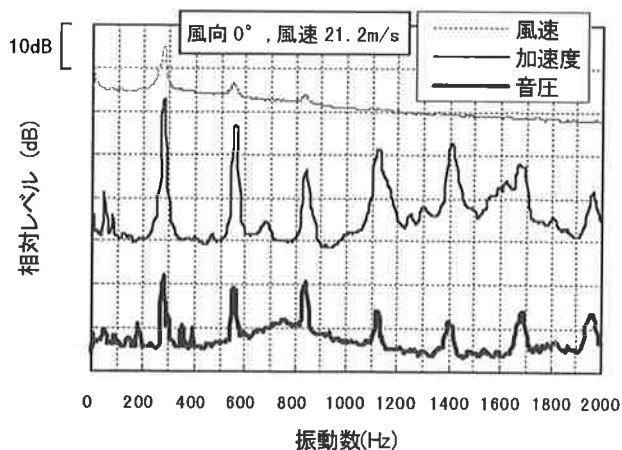


図-6 「中」の音が発生する場合の風速変動、振動加速度、音圧の周波数特性

(3) 「高」の音の周波数特性

図-7 に「高」の音が最もはっきり聞こえる風向 10°・風速 18.3m/s 時の風速変動、振動加速度、音圧のパワースペクトルを示す。

この場合渦の周波数が約230Hzであり、手摺り子の2次固有振動数280Hzに近づきつつあるため、振動加速度のスペクトルには280Hzのピークおよびその高調波が多少現れている。音圧のスペクトルにもそれに対応してピークが認められるもののあまり顕著ではなく、その変わり280Hzの整数倍ではない2180Hzに鋭いピークが立っている。このピークは手摺り子の振動によるものではなく、手摺り子間の空気に何らかの気柱共鳴機構が働き発生する音と考えられる。手摺り子の振動加速度にも2180Hzのピークが見られるが、これは音圧変動が加振力となって手摺り子を振動させているものと考えられる。その根拠は、手摺り子の中に砂をつめてみたところ、手摺り子の振動加速度の2180Hzのピークが消えたのに対して、音圧のほうには以前としてこのピークが残り、“ピー”という笛のような音も消えなかったためである。

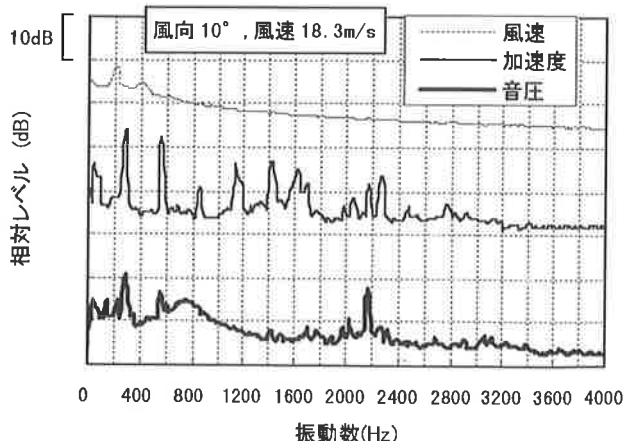


図-7 「高」の音が発生する場合の風速変動、振動加速度、音圧の周波数特性

5. 風鳴り音が発生しない手摺りの開発

5.1 風鳴り音が発生しない手摺りの考案

上記の3種類の音のうち、「高」の音ははっきりと聞こえ始める風速が約15m/s以上と高く風向も限定されているため、その発生確率は極めて低く、実際に問題になることはまずないと考えられる。そこで、開発に当たっては、手摺り子の振動によるびびり音のみを対象とすることとし、これを抑制することを基本方針とした。

手摺り子の振動を横棧等の補強により抑えようとする、どうしてもコスト・製作手間がかかり、また手摺りの美観や安全性を損ねてしまう。補強に依らないで振動を抑える別の手段は減衰の付加である。前記のように手摺り子の減衰が非常に小さいため、共振風速付近で極めて大きな振動が発生する。元々の減衰が非常に小さいだけに、わずかな減衰の付加でも効果は大きいと期待される。

このような考えに基づき、簡単な機構により手摺り子に減衰を付加した新型手摺りを考案した。手すり子に減衰を付加する方法としては、西村³⁾が手すり子の中にゴムチップ等を充填する方法を提案しているが、これではコストと手間がかかる。我々が考案した新型手摺は、上弦材の形状および上弦材と手すり子の支持を工夫することにより減衰を付加しているが、その詳細は特許が成立するまで公表しないこととする。実は先に写真1で示したものは新型手すりであり、外観上は従来の手摺りと何ら変わるところはなく、手摺りが持つ本来の意匠性を損ねることではない。さらにコストも横棧補強などと比べると大幅に安くなっている。

5.2 新型手摺りの効果の確認

考案した新型手摺りの試作試験体を作成し、風鳴り音抑制効果を風洞実験等により確認した。

(1) 固有振動数と減衰定数

表-3に今回考案した手摺りの固有振動数と減衰定数を、従来型と比較して示す。新型手摺りは、手すり子と上弦材との拘束が若干増すため、従来型より固有振動数が少し高くなっている。減衰定数は1次、2次ともに従来型よりも6~7倍大きくなっている。

表-3 固有振動数と減衰定数

	固有振動数		減衰定数	
	従来型	新型	従来型	新型
1次	80 Hz	82Hz	0.2 %	1.3%
2次	280 Hz	284Hz	0.3 %	2.0%

(2) 手摺り子の振動加速度

図-8に風向0°の場合の、新型手摺りの振動加速度を従来型と比較して示す。ここには従来型に横棧補強による対策を施したものも併せて示した。(横棧は手摺り子の下端から500mmの高さにビス留めされている。)

新型手摺りは、特に1次固有振動数での共振が低く抑えられており、従来型と比べると1/10程度となっている。本来、減衰定数が n 倍であれば、応答加速度は $1/n$ 程度になるはずである。新型手摺りの減衰は従来型手摺りの減衰の6~7倍であるから、それ以上の効果が得られている。これは、従来型の手摺りが共振している時には、空力負減衰力の影響を相対的に大きく受けている可能性がある。丸川⁴⁾らの研究によれば、平面寸法比1:2角柱の風向直角方向振動の場合、共振風速付近で空力減衰が負になることが指摘されている。空力減衰力とは物体の振動に伴って付加的に生じる空気力である。物体の振動速度と同位相の周期的外力が作用すると、これが振動方程式中の減衰項に負の減衰として現れるため、振動系の見かけ上の減衰を低下させる作用がある。従来型の手摺りは1次の構造減衰が0.2%と非常に小さいため、新型手摺りと同じオーダーの空力負減衰力を受けたとしても、構造減衰と空力減衰を合わせた全体としての減衰低下の度合いが大きくなるものと考えられる。

横棧補強を施したものは、1次固有振動数が150Hz程度まで高くなるため共振風速は上昇するものの、風速12m/s前後で大きく共振し、びびり音が発生してしまう。

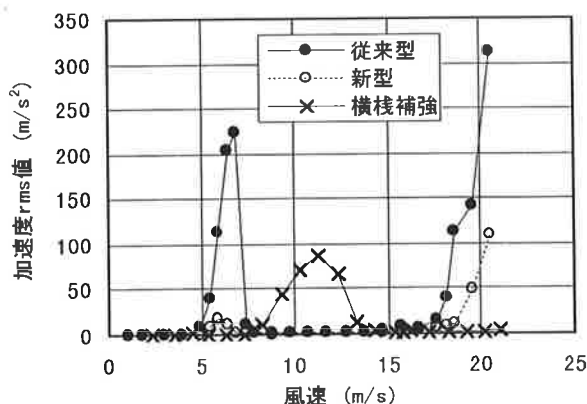


図-8 新型手摺り、従来型手摺り、横棧補強手摺りの振動加速度の比較

表-4 新型手摺りの風鳴り音発生状況

— : 風鳴り音発生せず
 中 : ブーンというびり音
 高 : ピーという笛のような高い音

※網掛け無しは、かすかに聞こえる音
 網掛けは、はっきりきこえる音

風速 (m/s)	風向角(°)																			暗騒音 dB(A)
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	
1.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	68
1.8	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	69
2.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	71
3.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70
4.5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	70
5.4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	73
6.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	75
7.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	76
8.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	77
9.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	77
10.3	—	高81	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	79
11.3	—	高82	高82	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高82	高81	—	81
12.3	—	高83	高83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高82	高82	—	82
13.3	—	高84	高84	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高83	高83	—	83
14.3	—	高86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高85	—	84
15.3	—	高86	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高86	—	85
16.2	—	高87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高87	—	87
17.2	高89	高94	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高91	高89	89
18.2	高92	高95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高92	高94	高90	90
19.2	中92	高93	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高93	高94	中92	91
20.2	中93	高95	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高94	高96	中95	93
21.2	中95	高98	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	高100	中96	94

(3) 新型手摺りの風鳴り音発生状況

表-4 に新型手摺りの風鳴り音発生状況を示す。新型手摺りの場合、1 次固有振動の共振による「低」の音は完全に消え、「中」と「高」のみが若干残る結果となった。はっきり聞こえる「中」の音が発生する条件は風速約 20m/s 以上、風向 0° と 180° に限定されているため、実際にこの音が発生する確率は極めて低いと考えられる。

従来型の手摺りでは、風向 10° と 170° ・風速約 19m/s 以上では「中」の音が大きかったため、「高」の音はこれに埋もれるかたちとなっていたが、新型手摺りでは「中」の音が無くなったために、「高」の音が浮かび上がってきている。これを除くと、新型手摺りの「高」の音の発生状況は従来型とほとんど変わらない。図-9 には、新型手摺りにおいて「高」の音が最もはっきり聞こえる風向 10°、風速 18.3m/s 時の風速変動、振動加速度、音圧のワースペクトルを示す。従来型のスペクトル（図-7）と比較すると、新型は 2 次固有振動数のピークが低く抑えられ、その高調波のピークもほとんど認められない。音圧のスペクトルには従来型と同様 2180Hz に鋭いピークが見られる。前述のように、「高」の音は手摺り子の振動に依るものではないため、減衰付加により手摺り子の振動性状が変わっても従来型と同じように発生する。振動加速度に見られる 2180Hz のピークは、2180Hz の音圧変動が加振力となって手摺りが振動しているものである。この「高」の音も、はっきり聞こえる条件は、風速 17m/s 以上、風向も 10° と 170° に限定されている。

結局、この新型手摺りが実際の建物に取り付けられた場合、はっきりと聞こえる風鳴り音が発生するのは、台

風や季節風などの強風時でかつ手摺り子にはほぼ正面または背面から風が吹く場合に限られる。万が一こうした風速・風向の条件の風が吹いて風鳴り音が発生したとしても、そのような強風時には手摺り子の風鳴り音以外の暗騒音も相当大きくなるはずであり、実際に問題となることはまず無いと予想される。

なお本報では、20mm×40mm 長方形断面の手摺り子についてのみ述べたが、この他に 15mm×40mm 長方形断面、20mm×20mm 正方形断面、20mm φ 円形断面、18mm×24mm 楕円形断面についても風洞実験を行なっている。そのいずれに対しても、今回考案した方法は極めて有効であることを確認済みである。

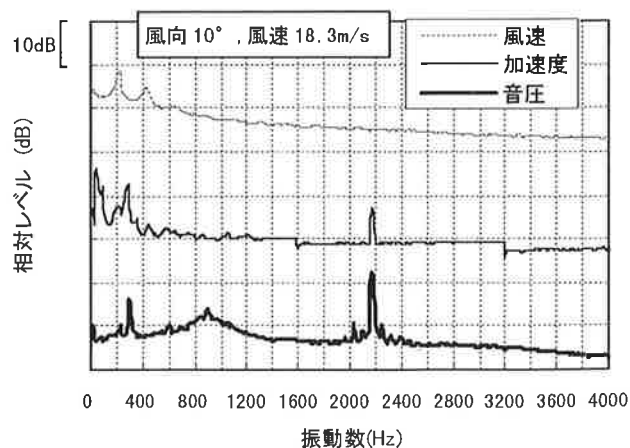


図-9 新型手摺りにおいて「高」の音が発生する時の風速変動、振動加速度、音圧の周波数特性

6. まとめ

本報では、20mm×40mm 長方形断面の手摺り子を対象として、風鳴り音の発生条件・発生メカニズムおよび新型手摺りの概要とその効果について述べた。その内容をまとめると以下ようになる。

- (1) 20mm×40mm 断面の手摺り子の場合、①手摺り子の 1 次固有振動数での共振によるびり音、②手摺り子の 2 次固有振動数での共振によるびり音、③手摺り子間の気柱共鳴と考えられる笛のような音、の 3 種類の音が発生する。
- (2) 手摺り子の構造減衰は非常に小さいため、共振風速時に極めて大きな振動が生じてびり音が発生する。さらに共振している時には、空力負減衰力が作用している可能性がある。
- (3) 手摺り子の振動によるびり音が発生している時には、振動と音圧のスペクトルに顕著な高調波が認められる。
- (4) 今回考案した新型手摺りは、上弦材の形状および上弦材と手すり子の支持を工夫することにより、簡単な機構で手摺り子に減衰を付加するものである。新型手摺りでは、1 次固有振動での共振によるびり音が完全に消え、2 次固有振動での共振によるびり音も抑制される。また 20mm×40mm 断面だけではなく、様々な断面形状の手摺り子に対しても極めて有効であることを確認している。

なお、本報で紹介することのできなかった 20mm×20mm 正方形断面の場合には、低風速時に 2 次固有振動数が卓越したり、高風速時に 1 次固有振動数が卓越したり、渦の周波数が 1 次固有振動数にロックインしたかと思うと、突然 2 次固有振動数までジャンプしてロックインしたり、その後再び 1 次固有振動数にロックインするなど極めて複雑な振動性状を示していた。これも手すり子の構造減衰が極めて小さいために起こる現象であるが、新型手摺りにより減衰を付加した場合には、このような複雑な振動現象が起こらなくなったことをここに付記しておく。

7. おわりに

今回考案した新型手摺りは、手摺り子の共振によるびり音を抑制できるばかりでなく、従来型の手摺りや横棧補強による対策を施したものと比べて以下のような利点を有している。

- (1) 新型手摺りは外観上、従来の手摺りと何ら変わるところはなく、手摺りが持つ本来の意匠性を損なうことがない。
- (2) 横棧補強のように、子供の足がかりとなる危険性が少ない。
- (3) コストも横棧補強と比べると大幅に安くなっている。

今後は減衰付加効果が長期間に渡って持続するか否かの耐久性試験を行なう予定である。

なお、この新型手摺りは、既に特許出願済みである。

謝辞：本新型手摺りの開発は、立山アルミニウム工業(株)と共同で実施したものです。立山アルミニウム工業(株)ビル建材事業部 開発部 森正樹氏には新型手摺りの設計から試作試験体の製作、さらには風洞実験に到るまで終始多大なるご協力をいただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐竹晃, 菅広見, 義江龍一郎: 軽量手摺りの風騒音に関する検討, 前田建設技術研究所報, Vol.38, pp.125-132, 1997.
- 2) 早坂壽雄, 吉川昭吉郎: 音響振動論, 丸善, 1974.
- 3) 西村宏昭: 中空建築部材の風振動の防止について, 日本風工学会誌 第 63 号, pp.95-96, 1995.
- 4) 丸川比佐夫, 大熊武司 他: 矩形断面構造物に作用する振動依存風力特性に関する基礎的研究, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.201-206, 1992.