大口径管路系の騒音・振動特性とその低減方法に関する検討

REDUCTION OF NOISE AND VIBRATION GENERATED BY LARGE
CALIBER WATER PIPING SYSTEM IN BUILDING

藤波 保夫*, 平松 友孝**, 大川 平一郎***, 安岡 正人****

Yasuo FUJINAMI, Tomotaka HIRAMATSU, Heiichiro OHKAWA
and Masahito YASUOKA

Occasionally, district heating and cooling center has been built in general buildings. In these case, large caliber water piping system is installed at pipe-shaft near rooms in the buildings, and structure-borne noise generated by pipe vibration propagated from pumps etc. influence for the room's environment. So, it is necessary to study on the prediction and control of these vibration and structure-borne noise.

In order to know the source and propagation characteristics of noise and vibration at large caliber water piping system, the basic measurements on noise and vibration were carried out in the building in where large caliber water piping system is installed. And the investigations on noise and vibration propagation were carried out using real scale model of rooms and pipe. From these results, the reduction system of structure-borne noise generated by large caliber water pipe to be installed at pipe-shaft was developed and applied at the hotel in where district heating and cooling center was built, also the noise reduction effect of the system was measured. In this paper, these results are described.

Keywords : district heating and cooling center, pump, large caliber water piping system, structure-borne noise, vibration propagation, reduction system of structure-borne noise

熱源供給センター, ポンプ, 大口径管路系, 固体伝搬音, 振動伝搬, 固体伝搬音低減工法

1. はじめに

地域開発では, 一般の大規模ビルに熱源供給センターを設置し, そこから開発地域内の各建物に必要な熱源の供給を行う例が多く見受けられる。この場合, 冷却水管等の大口径管が供給センター設置建物内の居室に隣接したパイプシャフトに設置されることが多い。また, 建物の大規模化, 超高層化によって, 管路が大口径化され, 或いは集中配置されることが必然的に多くなってきている。このような設備条件下では, シャフトの隣接居室において流水音, ポンプのうなり音が聴こえるといった状況があるため, 室内に高い静ひつ性能が要求されるホテル・集合住宅では, 管路系騒音の影響に対しては, 設計段階から十分な対応を検討する必要がある。そのためには, 管路系騒音・振動のパイプシャフト隣接室への影響程度を予測する手法と共に, 騒音・振動障害を防止するための低減対策工法を確立しておく必要がある。

このような観点から, 大口径管路系における騒音・振動の発生・伝搬特性を把握するために, 大口径管路系が

設置されている大規模高層建物において騒音・振動に関する基礎的な調査を実施した。また, 実大の建物部分模型と配管模型を用いた固体音伝搬系のシミュレーション実験を行なった。さらに, これらの結果から大口径立て管路からの騒音・振動の低減工法を開発して熱源供給センターが設置された大規模高層ホテルに適用し, その確認調査を行なった。以下にこれらの結果を報告する。

2. 大口径冷却水管路系における騒音・振動実測調査

熱源供給センターが設置された大規模高層建物において, 大口径冷却水管路系における騒音・振動に関する調査を行った¹⁾。

2. 1 調査対象の概要

図1に示す如く, 行き還り2本の800φ冷却水管は, 地下5階の主たる騒音・振動発生源と目される冷凍機,

本研究の一部は1985年度日本建築学会大会(名古屋)^{1),2)}, 及び1993年度日本騒音制御学会技術発表会^{3),4)}で発表している。

* 大成建設技術本部

** 大成建設技術研究所 課長

*** 音環境研究所 所長・工博

**** 東京大学工学部建築学科 教授・工博

Technology Head Quarter, Taisei Corporation
Chief Research Engineer, Technology Research Center, Taisei Corporation
President, Sound Environment Research Inc., Dr. Eng.
Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Engineering, University of Tokyo, Dr. Eng.

ポンプ等から横引きされて、パイプシャフト内に入って堅管となり、31階に至って再び横引きされて冷却塔に接続されている。堅管の重量はほとんどが地下5階の下部で支持され、約3階毎に水平振れ止めが設けられている。

図1 調査対象建物の冷却水管路系系統図

2. 2 測定方法

地下5階のポンプ周り各部と、立て管壁から支持金物を経て建物躯体に至る各部の振動加速度レベル、及び管壁近傍とシャフト内音圧レベルを測定した。また地下5階と最上階の横引き管部において水中の音圧レベルと管壁の振動加速度レベルを測定した。なお、すべての測定は3台のポンプの組み合わせによる運転条件を表1に示す5段階に変化させて、1オクターブ周波数分析で行った。

また、冷却水立て管路における振動伝搬特性を検討するために、立て管路の地下5階位置の管壁をハンマで衝撃加振し、上階位置の管壁で応答振動を測定した。

2. 3 測定結果および検討

(1) 管路系の振動・騒音特性

ポンプ運転条件5の場合について、各測定階の冷却水堅管壁と各ポンプ吐出管壁の面外方向（以下全て同じ）の振動加速度レベルを図2に示した。これによれば、ポンプ吐出管では右上がりのホワイトノイズ的な周波数特性を示しているが、立て管ではいずれの階でもポンプ回転数にブレード羽根枚数を乗じた周波数（A:174Hz, B,C:121Hz）付近の125Hzが卓越し^{5),7)}、250Hzがこれに続いて大きい特性を示し、上階になる程125Hzのピークが鋭く、かつその値も大きくなっている。なお、立て管路における4000Hzでレベルが大きいのは、チャッキ弁の衝撃

表1 ポンプ運転（管内流速）条件

条件	流量 (m ³ /H)	管内流速 (m/s)	稼動冷却 水ポンプ	ポンプ回 転数N(Hz)	羽根 枚数n	N×n (Hz)
No.1	780	0.47	B	24.2	5	121
No.2	960	0.58	C	24.2	5	121
No.3	1560	0.93	A	24.8	8	174
No.4	2340	1.40	A+B	-----	-----	-----
No.5	3300	2.00	A+B+C	-----	-----	-----

的な発生振動の影響である。

以上の結果について若干考察する。ポンプ近くでは羽根の高速回転によるキャビテーション、弁通過によるキャビテーション等による気泡が生じ、発生後短時間で崩壊して騒音・振動を発生するため、ホワイトノイズ的な周波数特性になるものと想定される。これに対してポンプから離れた立て管部分では、気泡崩壊等による高周波成分の振動・騒音は、拡散、管壁からの音の放射、或いは管の支持部からの振動の散逸減衰により、急激にその大きさが減少するが、ポンプ回転数に羽根枚数を乗じた周波数に相当する流体の脈動による振動は比較的低周波であり、流体中と共に管壁部分を伝搬するので減衰しにくいために、卓越した成分として現れると推定される。したがって、建物内における大口径管路系からの騒音・振動を考える場合には、流体の脈動により発生する振動の帯域に着目する必要があると言える。

また、図3の各測定階における管壁近傍の音圧レベルを見ると管壁振動と同様に125, 250Hzの帯域が大きい周波数特性を示しており、階層間の差は小さく管壁振動の傾向とは異なっている。

図2 管壁振動加速度レベル
（ポンプ運転条件5）

図3 管壁近傍音圧レベル
(ポンプ運転条件5)

(2) ポンプの運転条件と振動・騒音特性

ポンプの運転条件(管内流速条件)と18階における管壁振動加速度レベル、管壁近傍音圧レベルとの関係を図4、5でみると、ポンプCが特異であるが大略流速に比例する傾向(2倍で3dB増)を示している。ポンプCとポンプAを比較した場合、流量、電動機出力共に前者の方が小さいにも関わらず、図2に示すように吐出管壁の振動は前者の方が大きい。このように当管路系では、ポ

図4 管壁振動加速度レベルと管内流速との関係(18階)

図5 管壁近傍音圧レベルと管内流速との関係(18階)

ンプ自体の振動発生特性の個体差が顕著にあり、それが立て管における振動、放射音に現れているために、一部管内流速の依存性に対する傾向がはずれるものがあるものと想定される。

(3) 管壁厚と振動・騒音特性

各階の立て管振動及び放射音には、管壁厚の違いの他に縦方向の振動モード、及び距離減衰が影響することが想定されることから、管壁厚の依存性だけを抽出することはできない可能性があるが、管壁振動加速度レベル、及び近傍音圧レベルと管壁厚との関係を整理してみた。図6、7にポンプ運転条件5の場合で125、250Hzの低周波数帯域における関係を示したが、管壁厚が2倍になると約6dB低下する特性を示している。しかし、これは明らかな傾向が示された例であり、他の運転条件では単純な傾向とはなっていないものが多い。また、管路内が満水状態において、B5階部分の管壁を衝撃加振した時に上階各部位の管壁で測定した振動加速度レベルと管壁厚との関係を整理した結果を図8に示したが、この場合は管壁厚が2倍になると約12dB低下する特性となっており、管壁振動に与える管壁厚の影響はポンプ稼動時よりも大きい。因みに管が水中音圧に円周方向の引張り力で抗する時倍管厚で6dB、曲げインピーダンスの時12dB低下することになる。このことから、衝撃加振の場合は管壁を曲げ振動が伝搬し、ポンプ稼動の場合は水中音が伝搬し、各部で管壁を励振する伝搬形態が想定される。

(4) 水中音と管壁振動

水中音圧(加速度レベル換算値)と管壁の振動との関係を図9、10でみると、地下5階においては中低周波数

図6 管壁振動加速度レベルと管壁厚との関係
(ポンプ運転条件5)

図7 管壁近傍音圧レベルと管壁厚との関係
(ポンプ運転条件5)

図8 管壁振動加速度レベルと管壁厚との関係(衝撃加振時)

領域でほぼ両者は一致し、管断面方向に音波が生じる約900Hz以上の周波数領域では水中音から質量則により求めた管壁振動予測値が実測値とほぼ一致している。これに対し、最上階においては水中音の125Hzの成分が冷却塔の開放端反射の影響と想定される原因で落ち込んでいる。

図9 管壁振動と水中音との対応 (B5階)
(ポンプ運転条件5) 図10 管壁振動と水中音との対応 (屋上階)
(ポンプ運転条件5)

(5) 立て管における振動伝搬特性

ポンプ稼動時、B5階管壁衝撃加振時共に、上階各部位の管壁の振動加速度レベルは125, 250Hz帯域において上階に行くほど大きくなる傾向が示された。これは、前記結果から管壁厚が上階程薄くなることに起因していることが想定される。したがって、本立て管における振動伝搬特性を距離減衰として表すことには、大きな意味は持たない。ここでは、立て管路系における振動伝搬波の実体を把握するために伝搬時間に関する検討を行った⁴⁾。

B5階管壁加振時の3, 27階における管壁振動波形及び管壁振動周波数特性測定結果を図11, 12に示した。これによれば、波形の初期部分では比較的高周波の波形が現れ、次にやや低周波の波形が大きな振幅で現れる傾向にある。この結果から、伝搬波の種類を伝搬時間に着目して検討した。管軸方向の振動波形において、衝撃加振時の時間を基準にし各測定位置の波形が現れる時間を初期波の伝搬時間として、横軸伝搬距離、縦軸伝搬時間をとって整理した結果及び管壁面外方向の振動波形において、ピーク波の現れる時間をピーク波の伝搬時間として整理した結果を、それぞれ図13, 14中に●印で示す。

ここで、管軸方向の振動が縦波であると仮定して、(1)式より縦波の伝搬速度を算出し、伝搬距離から求めた距離と伝搬時間の関係を表す直線を図13に示す。

図11 管壁衝撃加振時の管壁面外方向振動波形

$$Cl = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\sigma^2)}} \dots \dots (1)$$

ここに、 Cl : 縦波の伝搬速度(m/s), E : 管材のヤング係数(N/m²), ρ : 管材の密度(kg/m³)。

また、管壁面外方向の振動が曲げ波であると仮定して、卓越周波数20, 50, 75, 100Hzに対して(2)式により曲げ波の伝搬速度を計算し、伝搬距離から求めた距離と伝搬時間の関係を表す直線を図14に示す。

図12 管壁衝撃加振時の管壁面外方向振動周波数特性

$$C_b = \sqrt[4]{\frac{4\pi^2 f^2 E I}{m}} \dots (2)$$

ここに、 C_b ：曲げ波の伝搬速度(m/s)、 I ：管断面の断面2次モーメント(m^4)、 m ：管の単位長さ当たり質量(kg/m)〔水の質量も含む〕。

これらによれば、初期波の伝搬時間実測値は、縦波伝搬時間計算値に良く一致しており、初期波は縦波であると推定される。また、曲げ波の伝搬時間実測値は、75Hzにおける曲げ波伝搬時間計算値に良く一致しており、ピーク波は曲げ波であると推定される。

一般的に、大口径管路系の振れ止め部から建物躯体に進入し、居室内に伝搬して放射される固体伝搬音は、管壁の面外方向の振動に起因することが多いこと、またピーク波は曲げ波であると推定されることから、大口径管路系における振動低減対策は、曲げ波に着目して行う必要性が示されたと言える。

図13 初期波（縦波）の伝搬時間（実測値と計算値の比較）

図14 ピーク波（曲げ波）の伝搬時間（実測値と計算値の比較）

(6) 立て管振れ止め有無が支持躯体発生振動に与える影響

大口径立て管設置のパイプシャフトに隣接した居室で発生する音は、隔壁が十分な遮音性能を有している場合、立て管の振動が支持部から建物躯体に伝わり居室内装から放射する固体伝搬音であることが経験的に明らかにされている。そこで、振れ止めの有無によって支持躯体の振動がどの程度異なるのかを把握する目的で、現状で水平方向の振れ止め（バネ定数 4.7×10^6 N/m）の防振ゴムが4方向4箇所支持）が設置されている階において、設置されている場合と取り外した場合について立て管貫通躯体床の水平方向の振動加速度レベルを測定した。その結果を図15に示す。これによれば、いずれの階も、管

図15 振れ止めの有無が支持躯体床水平方向振動加速度レベルに与える影響

壁振動のレベルが大きい125, 250Hzの帯域において振れ止めの有無によってレベル差が認められる。階によってレベル差は異なるが、振れ止めがあることによって最大10dB程度のレベルの上昇が示されている。したがって、振れ止め方法を考慮することにより、パイプシャフト隣接居室に発生する固体伝搬音を低減できる可能性が示されたと言える。

2. 4 まとめ

従来、ほとんど測定例のなかった大口径冷却水管路系における振動・騒音の発生・伝搬特性について調査を行い、次に示す基本的な知見を得た。

- ①ポンプから離れた立て管部分ではポンプ回転数に羽根枚数を乗じた周波数に相当する流体の脈動による振動・騒音が卓越した成分として現れることから、予測・低減対策ではこれらの帯域に着目する必要がある。
- ②管内流速と管壁振動及び管壁近傍音との関係は、大略2倍で3dB増加する傾向を示した。但し、ポンプ自体の発生振動・騒音に対する個体差による影響が含まれ特異な傾向を示す管内流速条件もある。
- ③管壁振動及び管壁からの放射音は、管壁厚が2倍になると、ポンプ稼動時では約6dB低下し、また管壁の衝撃加振時では約12dB低下する特性が示された。但し、立て管縦方向の振動モード及び距離減衰等の影響により明確な傾向が示されない階もある。
- ④管壁衝撃加振時の伝搬初期波は縦波、伝搬ピーク波は管壁面外方向の曲げ波であると推定される。したがって、大口径管路系からの振動・騒音の予測、低減対策では曲げ波に着目して行うことが必要であることが示された。
- ⑤管壁振動のレベルが大きい125, 250Hzの帯域においては、振れ止めがあることによって最大10dB程度のレベルの上昇が示されており、振れ止め方法を改善することにより、パイプシャフト隣接居室に発生する固体伝搬音を低減できる可能性を得た。

3. 大口径管路系の固体伝搬音に関する実大模型実験

大口径冷却水管路系における騒音・振動の実測調査により得られた知見を基に、大口径立て管路からの固体伝搬音の低減工法を検討するために、実大の建築部分模型と立て管模型を用いた固体音伝搬系のシミュレーション実験を行った²⁾。

3. 1 実験方法

図16に示すような建築部分模型において、音源室の床版に設置した振れ止め金具に、防振材を介して取付けた実大の大口径立て管の管壁を加振器により定常加振した時の各部の振動特性、及び受音室における発生音を測定した。建築部分模型は鉄骨造で、床版は鉄筋付きPC板(70mm厚)を下地としたコンクリート板(150mm厚)、音源室と受音室との間仕切壁は石膏ボード中空二重壁

(両面12mm二重貼り)、受音室は壁・天井が石膏ボードクロス貼り、床仕上はカーペット敷きであり、室内には家具が設置されていた。管壁の加振方法は、前記調査建物において収録した冷却水立て管壁の振動を再生した波形を加振器により入力し、その量的なコントロールを管壁の振動加速度レベルをモニタして行う方法とした。振動は加速度レベルを、発生音は音圧レベルをいずれもメータ直読で1オクターブバンド毎に測定した。

図16 建築部分模型、立て管模型の概要

3. 2 実験条件

実験に用いた管壁と振れ止め金具との間に挿入する防振材は表2に示す5仕様とした。管壁の加振条件は、管壁の振動加速度レベルが図17に示した特性になるようにし、防振材No. 3においてはさらに10dBレベルが大きいBの特性も用いた。又防振材の締付力はNo. 1, 2, 4, 5においては工事作業員が適度に締付ける程度とし、No. 3においては255, 745, 1630Nの3条件とした。

表2 防振材の仕様

防振材番号	防振材仕様	静的バネ定数
No.1	ゴム, 硬度90	4.6×10^6 (N/m)
No.2	ゴム, 硬度50	2.0×10^5
No.3	ゴム, 硬度50	1.6×10^5
No.4	ゴム, 硬度50	7.6×10^4
No.5	空気バネ, 空気圧3kgf/cm ²	7.9×10^4

図17 模擬振動源の周波数特性

3. 3 実験結果

(1) 防振材の固体伝搬音防止効果

図18に防振材仕様毎の受音室内バンド音圧レベルを示したが、防振材No. 3, 4, 5においては発生音が暗騒音以下となっており、聴感的にも問題がないことが確認された。これらの防振材の内、一般的には耐震上の問題からNo.1のようなバネ定数の大きなものを用いているが、高い静ひつ性能が要求されるホテル客室、集合住宅居室に隣接して立て管を設置する場合には、No.3程度のバネ定数のものを用いる必要性が示された。

図18 防振ゴムの種類と受音室内発生音との関係

また、図19に示すように受音室の音圧レベル実測値と壁・床の振動加速度レベルから算出した音圧レベルの値は良く一致しており、防振材による受音室内発生音の低減効果を振動に置換してもさしつかえないことが確認されたことから、図20に示した振れ止め金具での振動加速

図19 管壁加振時受音室内音圧レベル実測値と計算値との対応

図20 防振ゴムによる振動減衰量の比較
(管壁と振れ止め金具との振動加速度レベル差)

度レベルの低減量で発生音の低減効果を評価できるものと想定される。

騒音対策上の卓越周波数である125Hzと250Hzにおける振動減衰量と防振材の静的バネ定数との関係を示すと図21のようになり、大略バネ定数が半分になると減衰量が6 dB増加する関係を示しており、バネは共振系の要素としてではなく、単なる直列インピーダンスとして作用していると言える。

図21 振動減衰量と防振ゴムバネ定数との関係
(管壁と振れ止め金具との振動加速度レベル差)

3. 4 まとめ

実験結果より、大口径管路系固体伝搬音の建物系への伝搬経路である立て管の水平振れ止め部分で、振れ止め

用防振材のバネ定数を適当に設計することにより、固体伝搬音を定量的に低減できることが判かった。

4. 固体伝搬音の低減工法を施した建物における確認調査

以上の結果から、大口径立て管の水平振れ止め機構の防振装置を設計し、熱源供給センターを有する超高層ホテルに適用したので、固体伝搬音の低減効果を確認するための調査を行なった^{3),4)}。

4. 1 調査対象の概要、及び測定方法

調査対象は図22に示す如く、前記大口径管路系における固体伝搬音の実測調査の対象建物と類似した管路系が設置されており、立て管がおさめられているパイプシャフトにはホテル客室が隣接している。また約4階毎に取り付けられている水平振れ止めには耐震上からも検討して設計した特殊形状の防振ゴムを取り付けた。その静的バネ定数は、常時は固体伝搬音の低減上から決定した $1.5 \times 10^5 \text{ N/m}$ であり、地震時には水平荷重により変形して $5 \times 10^6 \text{ N/m}$ となる非線形性を持つ。

4. 2 測定結果

大口径冷却水立て管が設置されたパイプシャフト隣接客室の20室において室内騒音を測定した結果を図23に示したが、NC曲線を用いてこれらを評価するといずれの室においてもNC-25以下であり、聴感上も問題のない結果が得られた。また、測定階毎に室内騒音の大きさを比較すると、振れ止め機構設置階の発生音レベルが大きいは必ずしもいえない。この様に、振れ止め機構の有無が室内騒音の大きさに明確な影響を与えていないことから判断して、本測定対象建物に適用した耐震・防振振れ止め機構は所要の性能を満足しているものと推定される。

5. 結 言

今回、大口径管路系からの騒音・振動の低減を目的として、一連の調査、実験を行ない、その発生・伝搬特性を大略明らかにすることができた。またその結果を取り入れて、低減工法を開発し、実際の建物に適用した結果、充分な室内の静ひつ性能を得る程度に固体伝搬音の発生をおさえることができた。今後これらの結果を基に、大口径管路系からの固体伝搬音の予測手法を検討していくつもりである。

参考文献

- 1) 安岡正人, 大川平一郎, 平松友孝: 大口径冷却水管路系におけるポンプ等の固体伝搬音の実測例, 日本建築学会大会講演論文集, pp.191~192, 1985.10
- 2) 平松友孝, 大川平一郎, 安岡正人: 大口径冷却水管路系の固体伝搬音低減に関する実験, 日本建築学会大会講演論文集, pp.189~190, 1985.10
- 3) 藤波保夫, 大川平一郎, 平松友孝, 浜田幸雄: 大口径管路系から建物への騒音・振動測定事例, 日本騒音制御工学会技術

図22 調査対象建物の冷却水管路系系統図

図23 パイプシャフト隣接客室内発生音

発表会講演論文集, pp.213~216, 1993.9

- 4) 藤波保夫, 大川平一郎, 平松友孝, 浜田幸雄: 大口径管路系からの騒音・振動伝搬性状, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.217~220, 1993.9
- 5) 大川平一郎, 平松友孝, 河原塚透, 藤波保夫: 管路系における振動伝搬に関する検討, 日本騒音制御工学会技術発表会講演論文集, pp.221~224, 1993.9
- 6) 大川平一郎, 平松友孝, 子安勝, 藤波保夫: ポンプ管路系における振動入力, 伝搬に関する実験的検討 その1 ポンプ, および管路の振動特性の影響について, 日本音響学会秋期発表会論文集, pp.663~664, 1993.10
- 7) 平松友孝, 大川平一郎, 子安勝, 藤波保夫: ポンプ管路系における振動入力, 伝搬に関する実験的検討 その2 水中音, 管壁振動の特性について, 日本音響学会秋期発表会論文集, pp.769~770, 1994.3
- 8) 棟田佳宏, 大川平一郎, 平松友孝, 河原塚透, 鎌田元康: 給湯・暖房システムの管路系における騒音・振動に関する研究（その1 管内流速と管路系発生音・振動に関する検討）, 日本建築学会大会講演論文集, pp.161~162, 1993.9

(1995年6月21日原稿受理, 1995年9月5日採用決定)