

ビルディング用絶縁バスダクトの耐震性

Reliability of Bus Duct for Tall Building

Insulated type busways are used universally for low-voltage power trunks in buildings. To check the reliability of insulated type busways in the event of earthquake, we made vibration, bending, and heat-run tests using actual size test models. As a result we obtained valuable data on the vibration frequency and mode of the insulated type busways installed vertically and clarified that they do not resonate with building movement and stand the effect of acceleration caused by earthquake and the movement of the building with complete safety. On the other hand, from the results of this experiment we found a method of obtaining vibration characteristics of these busways with various ratings and at various floor levels, by calculation using the results of some simple tests.

平野 剛* *Takashi Hirano*
 多田 誠* *Makoto Tada*
 大谷忠男** *Tadao Ôtani*
 菊地賢一** *Kenichi Kikuchi*

1 緒 言

近年、続々と建設されている超高層ビルディングは、地震による損壊を防止するため、いわゆる柔構造方式を採用している。このため、地震の振動から受ける加速度は、ビルディングの揺れに吸収され、従来の剛構造ビルディングのそれよりも低減されるが、逆に、各階の水平方向の相対変位（以下、層間変位という）は、各階の高さ（以下、階高という）の $\frac{1}{300} \sim \frac{1}{150}^{(1)}$ に達する。

したがって、ビルディング内で各階の床を貫通して布設される配管類、ダクト類は、ビルの振動と共振を起こすことなく、層間変位に十分対応できるような機能および構造を備えていることが必要である。

ここでは、ビルディング用低圧電力幹線として、広く使用されている日立絶縁バスダクトの信頼性確認の一環として、垂直布設状態における耐震性、すなわち、

- (1) 垂直布設された絶縁バスダクトは、どのような振動特性を有しているか、また、ビルディングの振動と共振を起こすことはないか。
 - (2) ビルディングの層間変位に対して、絶縁バスダクトが支持金具も含めた系統全体として、強度的に安全であるか。
- の2点の確認に主眼をおき、実規模のモデルを使って、振動、曲げ、通電など一連の実験を行なったので、その結果について述べる。また、今回の単一条件での実験結果の中から、絶縁バスダクトのサイズとビルディングの階高との、あらゆる組合せにおける振動特性を類推できる簡略手法を確立したので、合わせて紹介する。

2 絶縁バスダクトの構造

本論に先だち、ここで取り上げている絶縁バスダクトの構造などを簡単に紹介する。

絶縁バスダクトは、従来使用されてきた裸導体バスダクトにとって代わり、低圧大電流の幹線として広く普及している。その基本構造は、図1の断面図に示すように、絶縁された導体が三相密着して鋼板ダクトにより、締め付け、組み立てられている。この構造から次のような点が特長としてあげられる。

- (1) 断面寸法が小さく、コンパクトにまとまっているので、

狭いスペースでも布設が可能である。

- (2) 接続部は、三相が一括して貫通ボルトで締め付けられるので、接続作業が容易である。

- (3) 相間が近接しているので、リアクタンスが小さく、安定した電力供給ができる。

- (4) 短絡時の電磁力は、鋼板ダクト、組立ボルトが受けもつので、大きな短絡電磁力に耐えうる。

導体材料としては、軽量かつ経済的なアルミニウムが主流を占めている。日立電線株式会社の技術的特色は図2に示すように、電接面処理を含めた、ダクトの接続部に結集されているといっても過言ではない。すなわち、電接面には銀コンタクトワッペン⁽²⁾を使用し、強固な銀接触面を形成している。また、ダクト接続部は三相を一括して、皿(さら)ばねを介在させた高張力の貫通ボルトで締め付けることにより、熱による膨張、収縮を吸収して、長期にわたり締め付圧力を保持するように配慮されている。

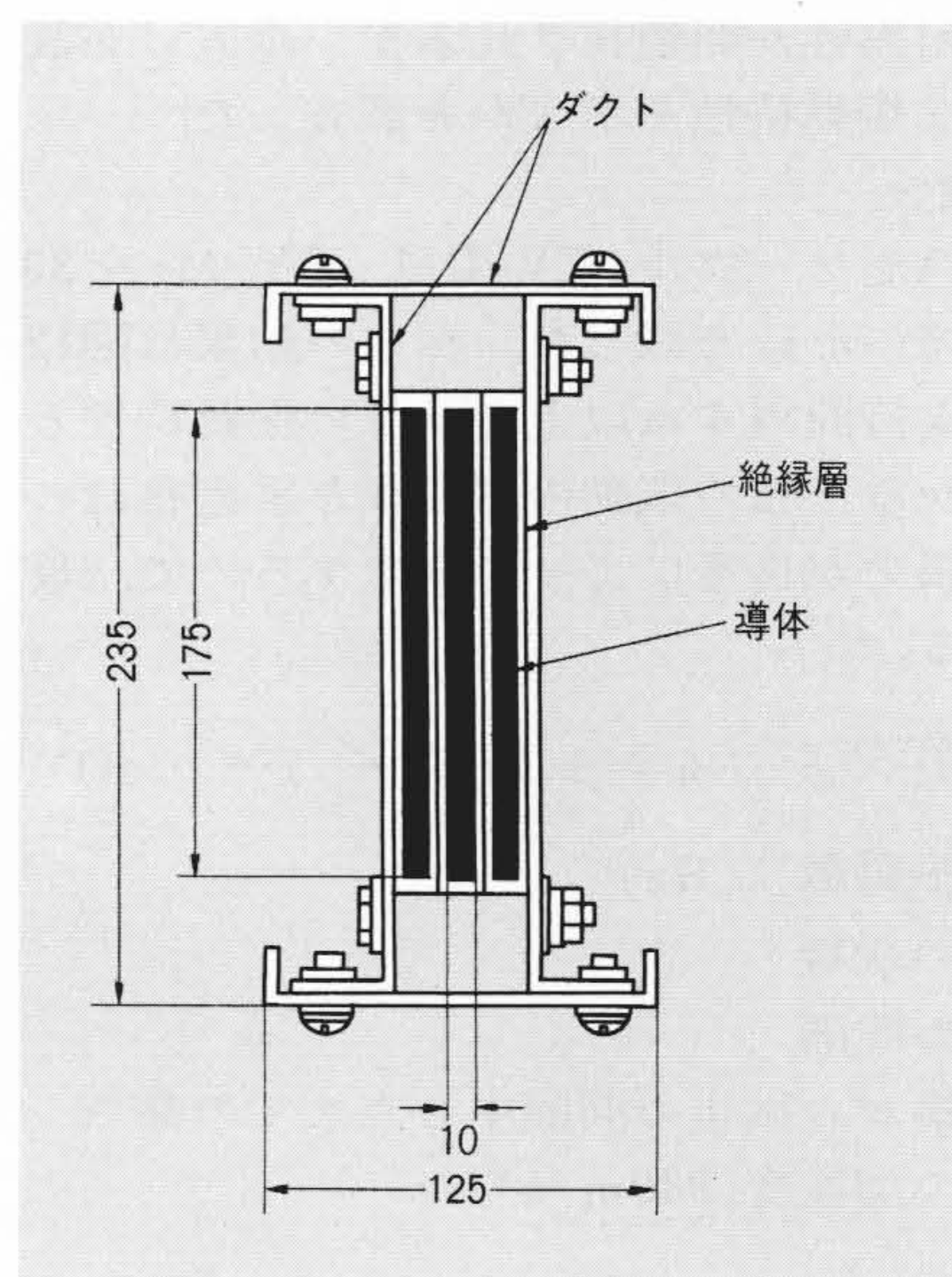


図1 絶縁バスダクトの断面構造 絶縁された導体が三相密着して鋼板ダクトにより締め付け、組み立てられている。図の寸法は、3W, 2,000A用アルミ導体のものを示す。

Fig. 1 Cross Section of the Insulated Type Busway

*日立電線株式会社日高工場 **日立電線株式会社研究所

図2 絶縁バスダクトの接続部
電接面には銀コンタクトワッペンを使用、
皿ばねを介した接続ボルトで三相を一括し
て締め付ける。締め付トルクを専用のトルク
レンチで管理する。ボルトはあらかじめ組
み付けられており、接続作業が容易である。

Fig. 2 Details of Splice of the
Insulated Type Busway

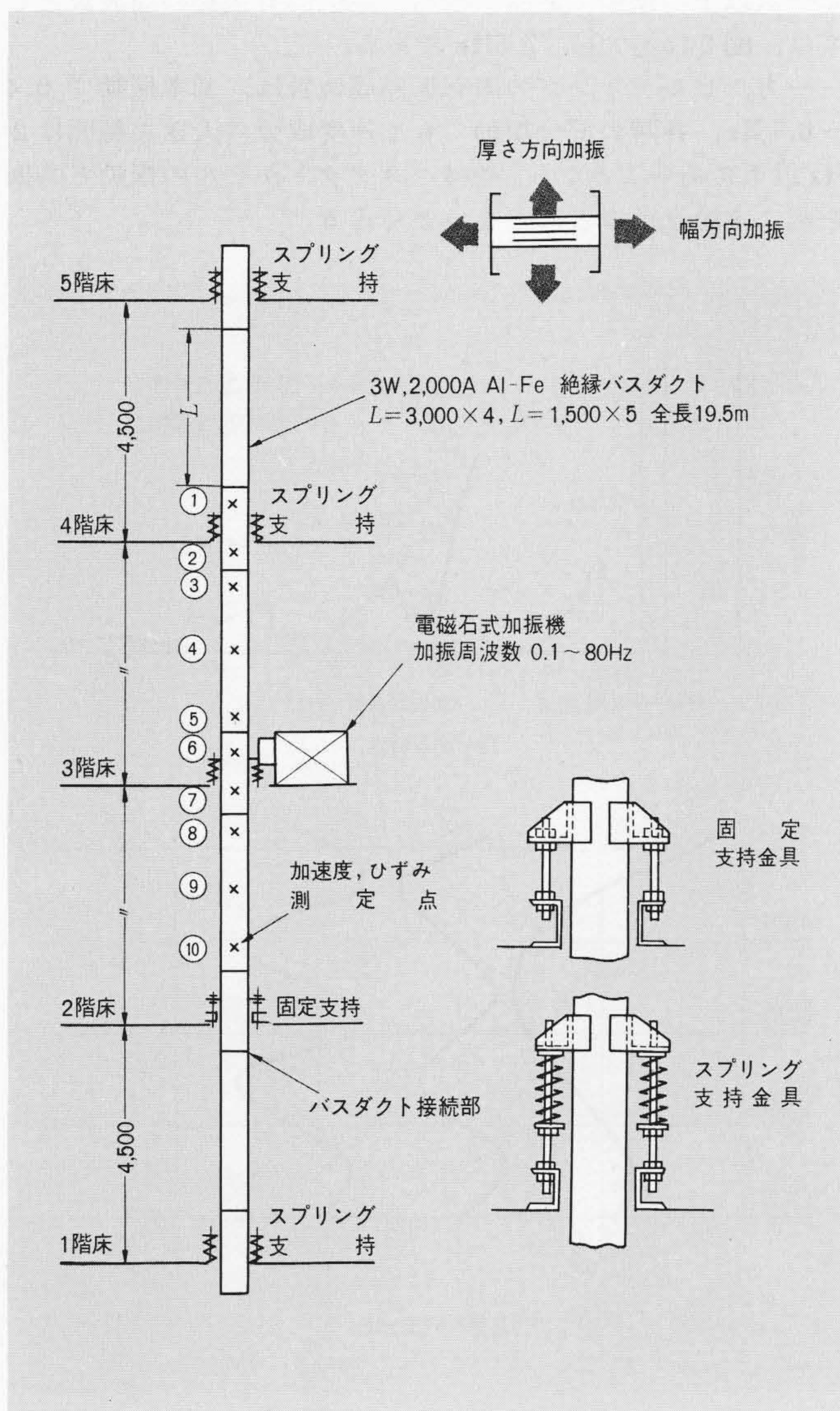
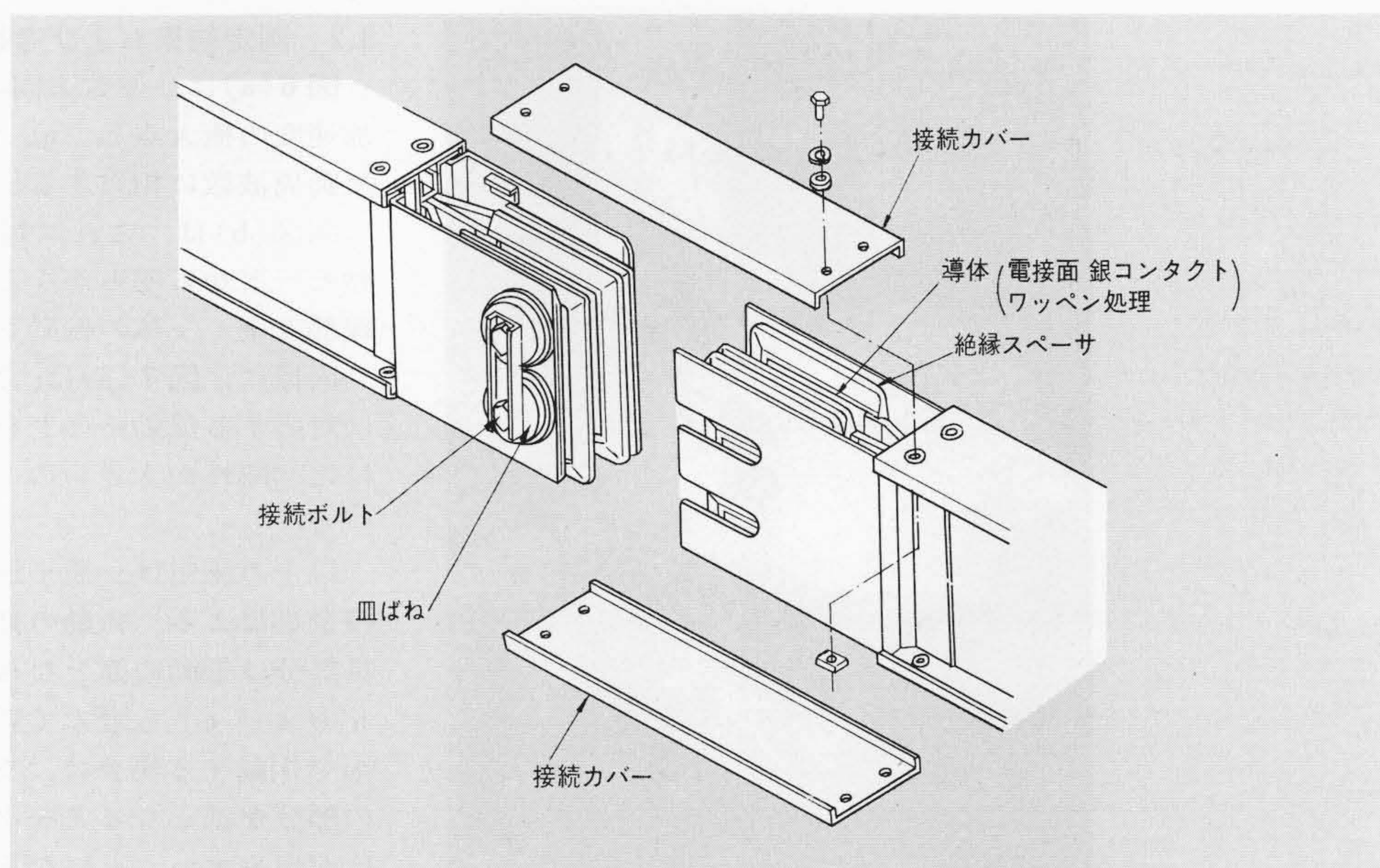


図3 垂直布設絶縁バスダクトの振動測定 電磁石を応用した加振機により、3階床近くで加振し、バスダクトの振幅、加速度を測定して、固有振動数、振動モードを把握した。

Fig. 3 Measuring of Vibration Characteristics of the Insulated Busways Vertically Installed

3 垂直布設絶縁バスダクトの振動特性

3.1 試料配置および測定方法

図3に示すように、最も標準的サイズの、3W, 2,000A, Al-Fe (3線式アルミニウム導体-鋼ハウジング) 絶縁バスダクトを、4.5m階高×4スパン垂直布設した。絶縁バスダクトの支持は実際の布設例を模擬して、2階の床部に固定支持金具 (バスダクトの長さ方向の変位を規制し、床に対してバスダクト位置を固定する金具) を、その他の階の床部にはスプリング支持金具 (バスダクトの伸縮に追随し、重量のみをささえる金具) を配置した。試料のほぼ中央にあたる3階に、電磁石式の非接触形加振機を設置し、絶縁バスダクトに0.1~80Hzの振動を与えた。加振の方向は、導体の厚さおよび幅の2方向である。図3の×印の各測定点および任意の位置で、ダクトのひずみ、振幅および加速度を測定した。図4は加振状況を、図5は振動測定状況を示すものである。

加振機の加振周波数を連続的に変化させ、ダクトのひずみ、振幅および加速度が極大となる周波数を、絶縁バスダクトの固有振動周波数としてとらえ、同時に各点の振幅の測定値をプロットして振動のモードを記録した。

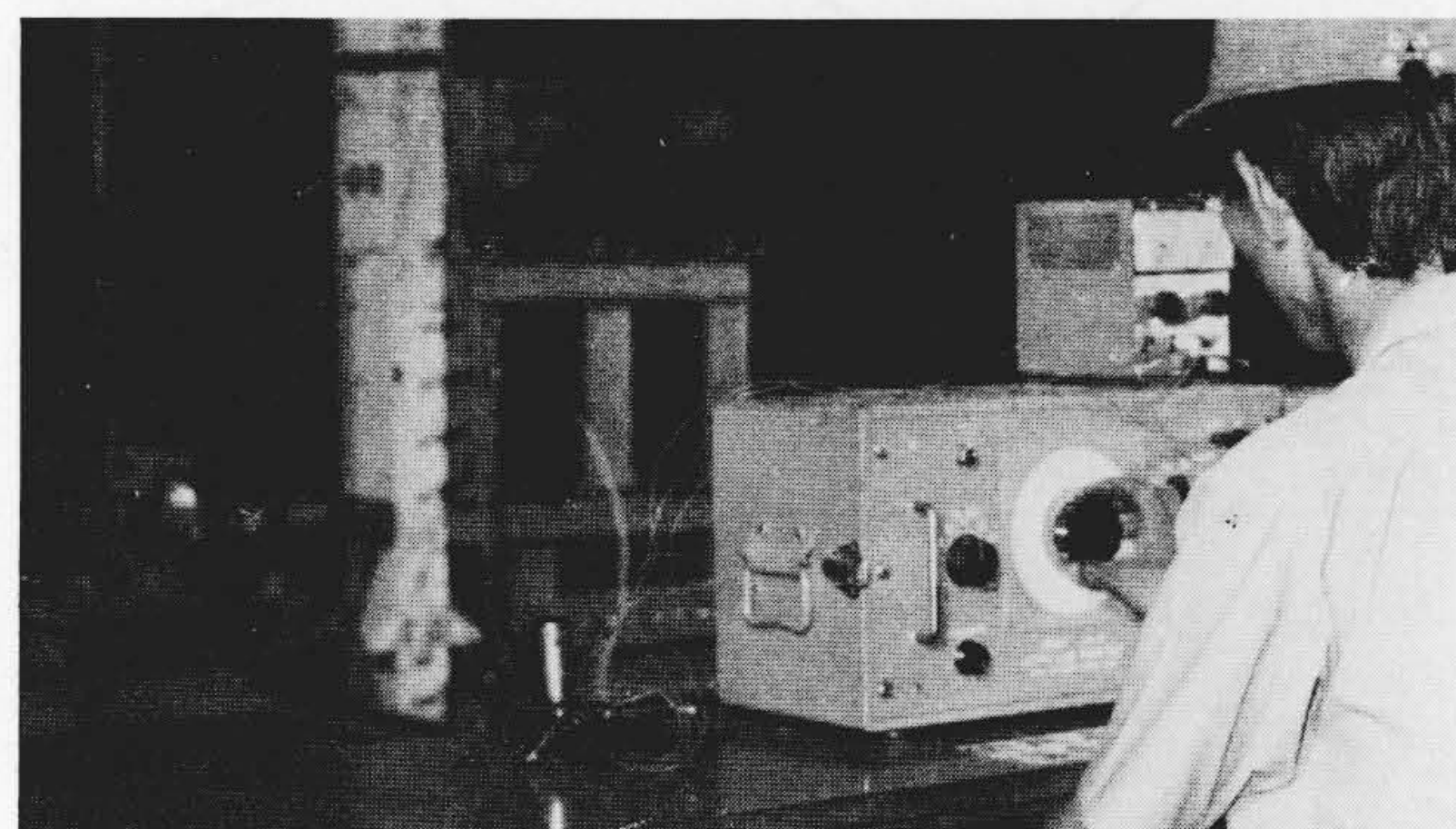


図4 電磁石式加振機による加振状況 手前の低周波発振器で0.1~80Hzの直流パルスが発生させ、SCR (シリコン制御整流器) を通して、磁石の電流を断続し、ダクトを振動させた。

Fig. 4 Vibration of the Insulated Type Busways by Electro-magnetic Ossirator

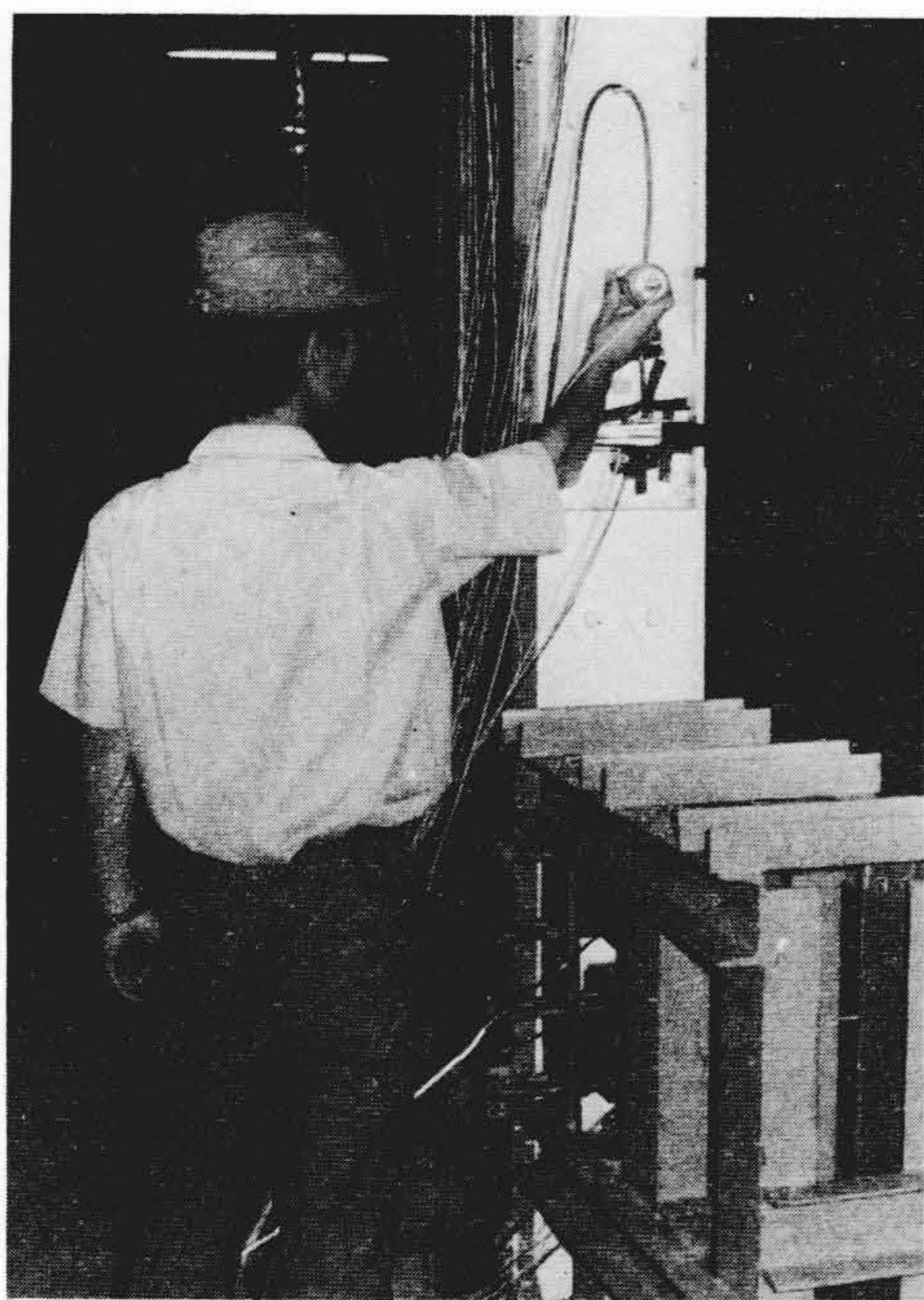


図5 振動測定状況 手前のフレームに組み込まれた電磁石によりバスダクトを振動させ、所定の位置でひずみ、加速度、振幅を検出するほか、任意の位置で手持ち振動計により測定を行なった。

Fig. 5 Measuring of Frequency and Amplitude of Vibration

3.2 測定結果および考察

図6(a)は、厚さ方向の振動特性を示すものである。振幅、加速度の極大点a、b、cおよびdが絶縁バスダクトの固有振動周波数に相当する。

同図(b)は、これに対応する振動のモードである。この振動モードから明らかなように、絶縁バスダクトの接続部は直線部と全く一体の振動をしている。

同様に、図7(a)は、幅方向の振動特性を、同図(b)はこれに対応する振動モードを示すものである。幅方向は厚さ方向に比べ剛性が大きいので、固有振動周波数は高い方へ移っている。

以上の測定は、微小振幅によるものであるため、各階の支持金具による、振動の抑制効果がない。したがって、支持金具部分は振動の節とならないモード（たとえば、図6(b)のaおよびc）も含んでいるが、実際の地震によって大きな振幅で振動する場合は、支持金具によって振動が規制され、この部分が節となるモード（たとえば図6(b)のbおよびd)だけが出やすいことになる。すなわち、現実共振を問題にする場合の絶縁バスダクトの固有振動は、階高を1スパンとする一次以上の振動である。結局、最低固有振動の周波数としては、図6(a)のb、7.5Hzである。

一方、ビルディングの固有振動周波数は、基本振動で0.4～0.1Hz、各階の部分振動でも加速度成分の大きな範囲は2Hz以下であることから、絶縁バスダクトがビルの振動と共振を起こす懸念はほとんどないといえる。

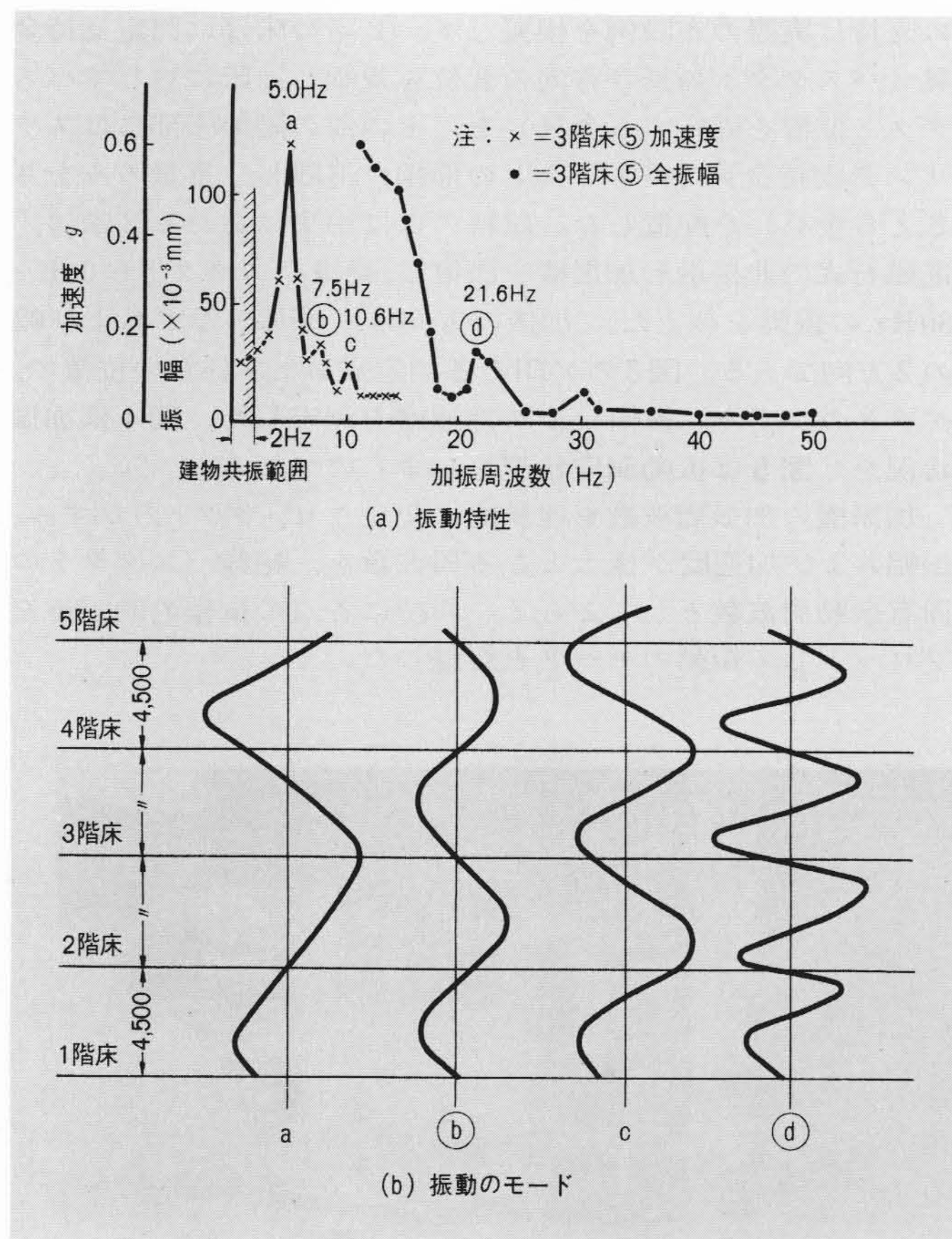


図6 厚さ方向の振動測定結果 測定器の測定レンジの制約から、周波数の低い範囲は加速度を、高い範囲は振幅を測定した。加振周波数に対して測定値が極大となるときの周波数が固有振動周波数である。なお、a、cは床支持部が振動の節にならないモード（現実の大振幅の場合は発生しない）、b、dは床支持部が振動の節となるモード（現実の大振幅時発生）。

Fig. 6 Frequency and Mode of Edge-wise Vibration

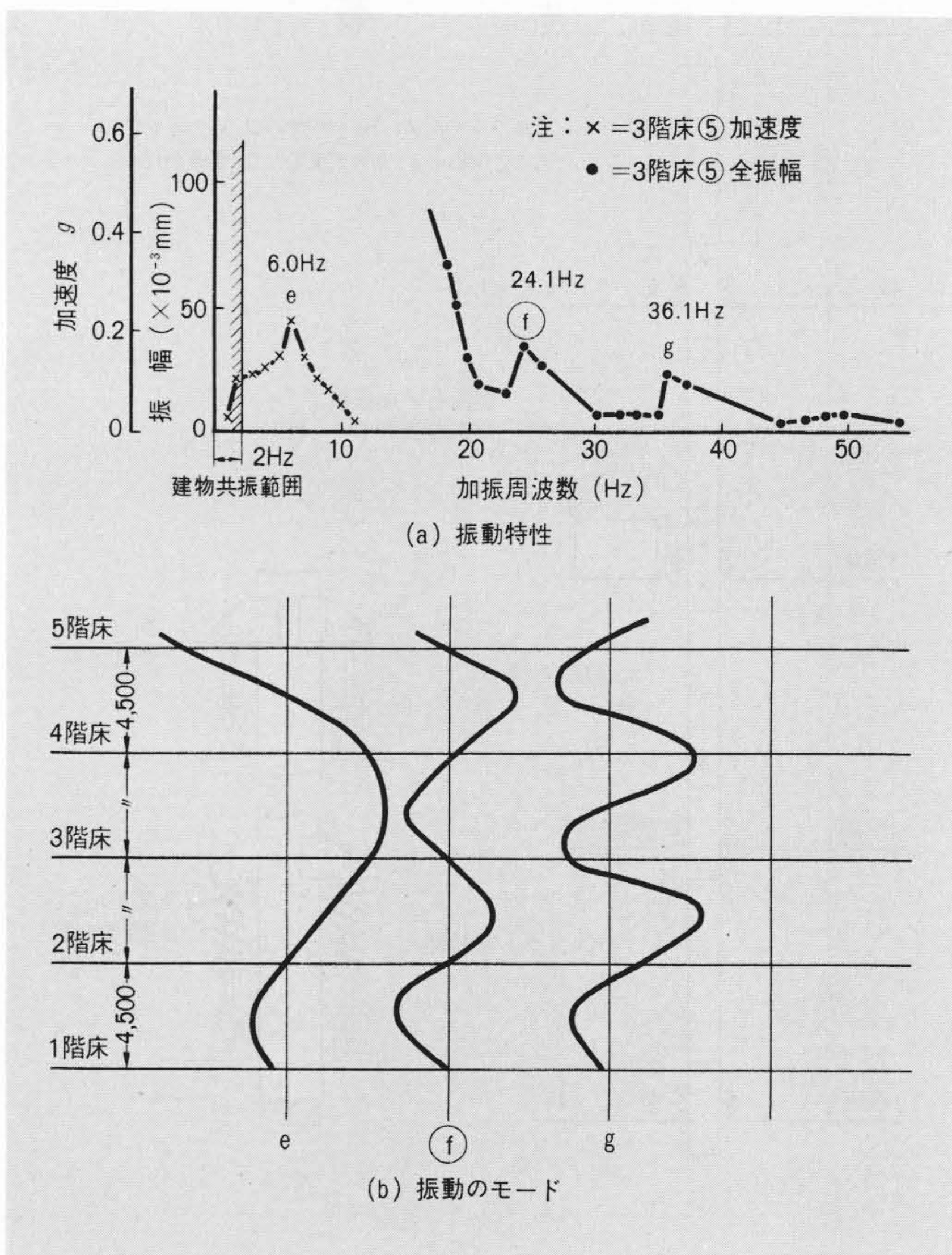


図7 幅方向の振動測定結果 厚さ方向と同様に、3階床で加振し、振動周波数、振動モードを測定した。共振周波数は厚さ方向よりも高いほうへ移っている。

Fig. 7 Frequency and Mode of Flat-wise Vibration

4 固有振動周波数を求める簡略手法

垂直布設状態における絶縁バスダクトの振動特性については、前述したように、精密に測定および把(は)握することができた。しかし、絶縁バスダクトのサイズまたはビルの階高が今回の実験条件と異なる場合に、その都度垂直布設モデルを準備することはきわめて非能率的である。そこで筆者らは次に述べるように、より単純なモデルでの測定結果から、垂直布設状態での固有振動周波数を計算で求める方法を検討した。

前述の振動モードからも明らかなように、絶縁バスダクトは1本の柱または梁(はり)として取り扱ってさしつかえない。したがって、その曲げ剛性 EI が単純なモデルから求められれば、これを垂直布設状態での振動モードにあてはめ、固有振動周波数を算出することができる。

曲げ剛性 EI の測定については、静的、動的など、種々の方法を試みたが、静的測定方法は測定精度の面で問題があり、結局、図8に示すように、中央に接続部を含んだ絶縁バスダクトの自由振動から求めた曲げ剛性 EI が、最も信頼できるものであることが明らかとなった。こうして求めた曲げ剛性 EI を、垂直布設状態での振動モードにあてはめ計算した固有振動周波数は、表1に示すとおり、垂直布設状態での実測のそれとかなりの精度で一致している。

この簡略手法は、バスダクトのサイズと、ビルディングの階高のあらゆる組合せに応用可能であり、計画設計段階で、絶縁バスダクトの共振の問題を論ずる場合にもきわめて有効なものである。

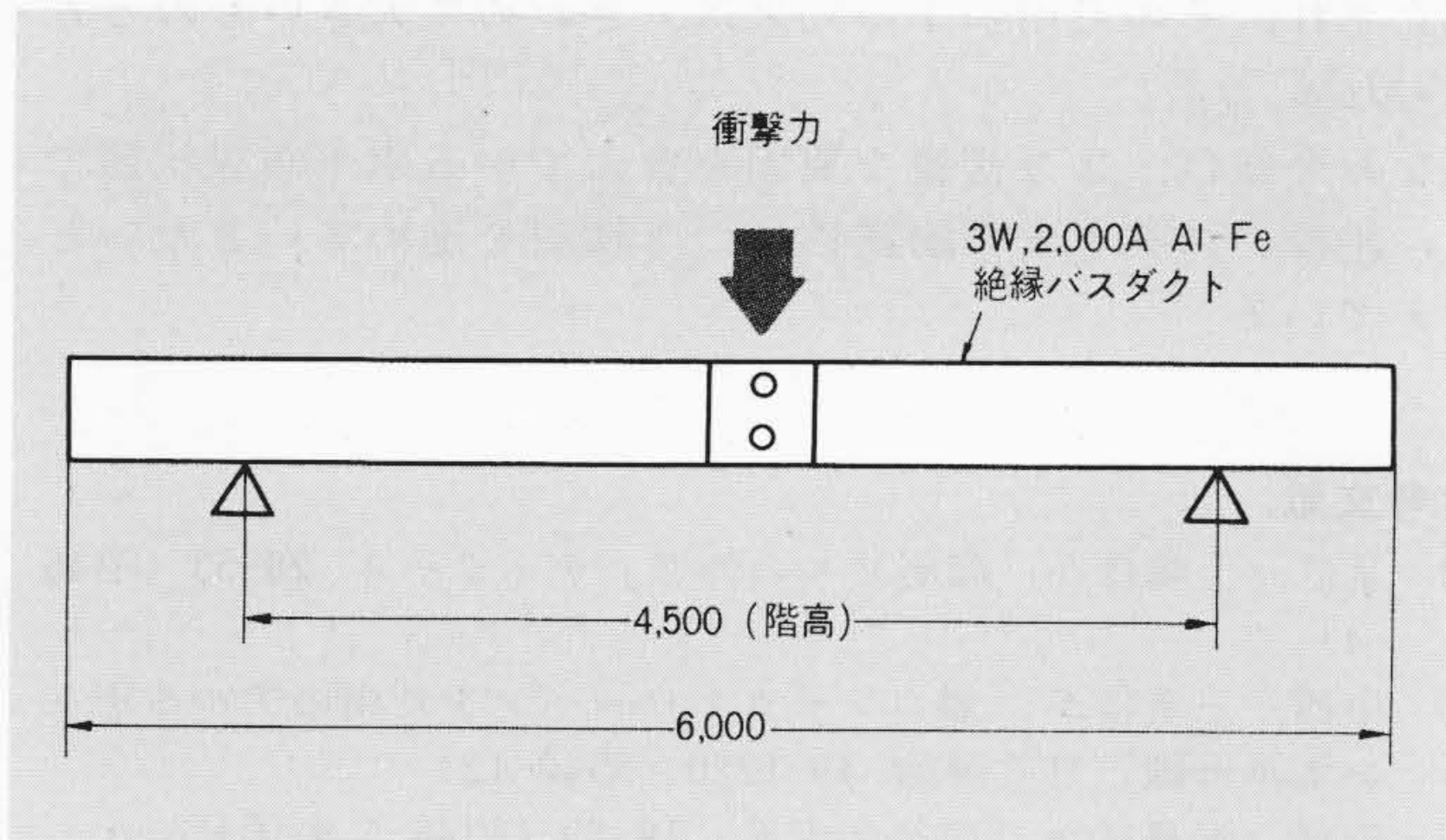


図8 短尺モデルの自由振動測定法 中央に接続部を含んだ短尺モデルに衝撃力を与え、自由振動させて曲げ剛性 EI を求める。

Fig. 8 Measuring of Vibration Characteristics with Small Sample

表1 固有振動周波数（計算値と実測値の比較） 計算値は短尺モデルの曲げ剛性 EI をもとにして計算したもの、実測値は垂直布設状態での固有振動を実測したもの（図6、図7参照）で、ほぼ一致している。

Table 1 Vibration Frequency (measured and calculated)

方 向	固 有 振 動 数 (Hz)				
厚 さ 方 向	実 測 値	5.0	7.5	10.6	21.6
	計 算 値	3.7	6.7	10.0	26.7
幅 方 向	実 測 値	6.0	24.1	36.1	—
	計 算 値	5.7	23.2	43.0	—

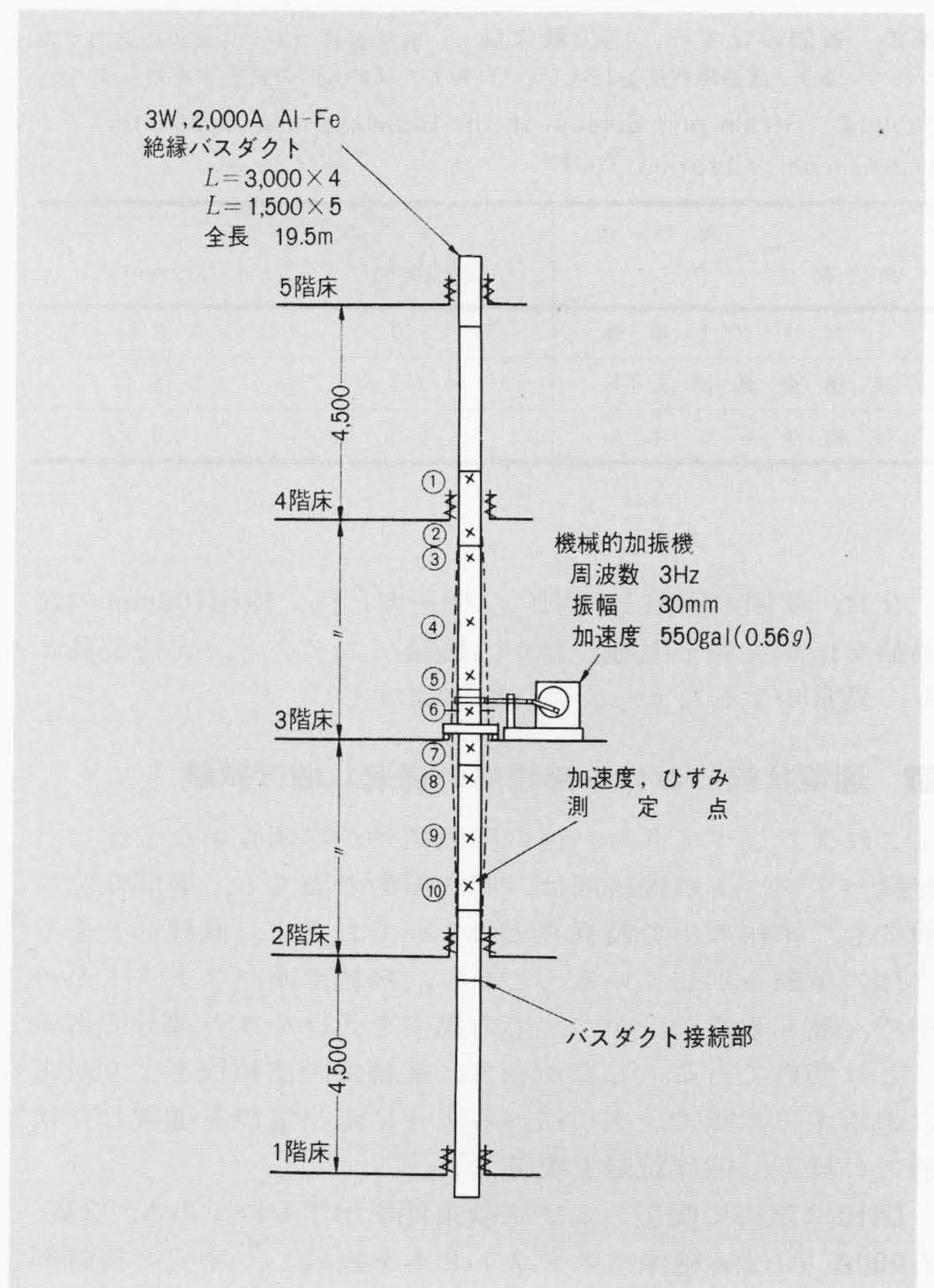


図9 大振幅加振実験 バスダクト、支持金具を直接、3階床の加振機により大振幅で振動させ、強度を確認した。

Fig. 9 Vibration Test

5 大振幅加振実験

耐震性検討の第二段階として、絶縁バスダクトおよび支持金具の強度を直接的に確認するため、図9に示す試料配置で実規模の振動実験を行なった。

試料は振動特性の測定に使用したものと同様、3W, 2,000 A, Al-Fe 絶縁バスダクトで、3階の床付近を電動機駆動の機械的加振機により加振し、ダクト、支持金具の各部のひずみ、加速度を測定した。

加振条件は、周波数 3 Hz、振幅 30 mm、加速度 550 gal (0.56 g) である。この加振条件を、現実の地震およびビルディングの層間変位と比較してみると、加速度については、有名なエル・セントロ地震の加速度 $0.33g^{(3)}$ の1.7倍に相当する。振幅については、層間変位が最大となるのは各階が同一方向に変位した場合であり、図9の振幅を層間変位に換算すると60 mm となり、階高 4.5 m の $1/75$ に相当する。これは通常のビルディングの層間変位の設計値の2倍の値である。

このような過酷な加振条件のもとで、45,000 サイクル（4 時間10分に相当）の連続加振を行なった。

表2は絶縁バスダクトおよび支持金具（ボルト部分）に表われた最大ひずみおよび換算応力を示すものである。軟鋼の疲労限界応力 15 kg/mm^2 に比較して、発生した応力は約 $1/6$ 程度であり、実用上全く問題のない値である。また各部のボルトの締付トルクは実験の前後での差は認められなかった。

表2 各部のひずみ，応力最大値 支持金具ボルトに最大の応力が表われているが，疲労限界応力15kg/mm²に対しては約6倍の安全率を残している。
Table 2 Strain and Stress of the Busways and Supporter Arised from Vibration Test

測定部位	測定値	ひずみ (×10 ⁻⁶)	応力 (kg/mm ²)
バスダクト本体		10	0.21
支持金具ボルト		125	2.6
支持チャンネル		50	1.05

なお，今回の実験とは別に，加速度1.8g，振幅100mmの超過酷な振動実験を実施したが，絶縁バスダクト，支持金具とも，異常が生じなかったことを付言する。

6 通電状態における接続部の繰返し曲げ試験

これまで述べてきた一連の実験結果から明らかなように，絶縁バスダクトの接続部は，固有振動の面でも，層間変位の面でも，系統の中で特異点とはなっておらず，直線部と全く一体の挙動を示している。しかし，接続部がバスダクト系の中で，最も重要で，かつ，応力集中を受けやすい部分であることは明白である。したがって，接続部の信頼性をより厳密に追求する意味で，次に述べるように定格電流を通電した状態での繰返し曲げ試験を実施した。

図10は試料の配置および試験条件を示すものである。3W，2,000A Al-Fe 絶縁バスダクト2本を接続し，中央の接続部に±30mmの強制変位を，厚さおよび幅方向にそれぞれ100回くり返し与えた。バスダクトには定格電流2,000Aを連続通電し，電接面の接触状態の変化に伴う温度上昇の変化を連続記録した。

表3は曲げ試験前および後の各部の温度上昇値を示すものである。厚さ方向，幅方向いずれも試験前後の温度差はごくわずかである。

試験後，接続ボルトの締付トルクのチェックおよび電接面の点検を行なった。ボルトのトルクは1,000kg・cm（初期値1,000kg・cm）で，ゆるみは全く認められない。電接面については，銀コンタクトワッペンに銀表面に軽微なすり跡が残っているのみで異常は認められなかった。

本実験により，日立絶縁バスダクトの皿ばね使用の貫通ボ

表3 繰返し曲げ試験前後の各部温度上昇 厚さ方向，幅方向いずれも100回の繰返し曲げの前と後で，温度上昇差はごくわずかであった。

Table 3 Temperature Rise of the Insulated Type Busways after Bending Test

測定点No.	種類		厚さ方向		幅方向	
	試験前	試験後	試験前	試験後	試験前	試験後
1. 導体接続部	46	46	47	48		
2. "	52	52	52	52		
3. "	47.5	47	47	47		
4. ダクト表面	37.5	38.5	39.5	39		
5. "	24.5	24.5	23	22		

注：単位＝℃

ルト締付方式および銀コンタクトワッペンによる電接面処理の信頼性が再確認された。

7 結 言

以上述べたように，耐震性の確認を主体とした各種実験の結果から，従来，曲がりにくいと考えられていた絶縁バスダクトが，ビルディングの層間変位に十分対応できる柔軟性を有していることが明らかとなった。

また，ビルディングの振動との共振もなく，地震の大加速度に余裕をもって耐え，その性能を維持できることが確認された。

さらに，個々のビルディングの布設条件に合わせ，簡単な測定により，絶縁バスダクトの振動特性を類推できる手法が確立され，その応用による効果は，きわめて大きいものと考えられる。

なお今後は，より複雑な要因を含んでいる水平布設状態での，絶縁バスダクトの耐震性につき検討を進めていきたいと考えている。

参考文献

- (1) 足立，上崎ほか「高層ビルの外壁」ディテール 28-53（昭46-4）
- (2) 中西，三宅ほか「銀コンタクトワッペンを使用のアルミチャンネル母線」日立評論 49-1220（昭42-12）
- (3) 梅村，安藤ほか「建築学大系」19-29（昭46-5 彰国社）

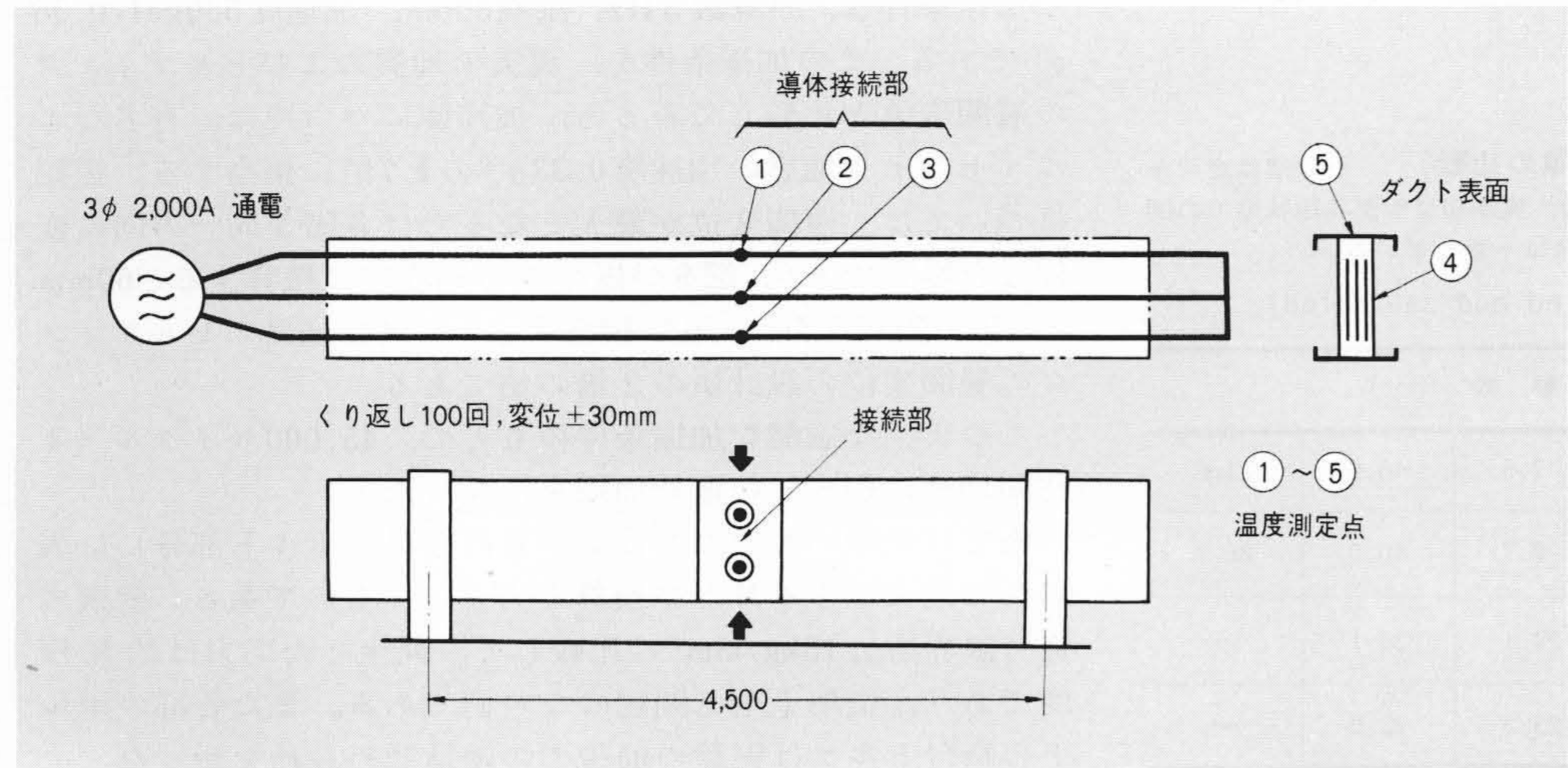


図10 接続部繰返し曲げ試験
バスダクト2本を接続し，定格電流を通電した状態で中央接続部に±30mmの強制変位を，100回くり返し与えて，温度上昇の変化を測定した。

Fig. 10 Bending and Heat-run Test of the Insulated Type Busways