

火力発電所ボイラー建家の振動特性に関する実験的研究 (その1)

渡辺 清治 角田 智彦
安井 譲 金子 正孝

Experimental Study on Vibrational Characteristics of Boiler Building of Thermoelectric Power Plant (Part 1)

Seiji Watanabe Tomohiko Tsunoda
Yuzuru Yasui Masataka Kaneko

Abstract

The authors carried out vibration tests of a boiler building of an actual thermoelectric power plant. The tests were as follows: (1) Vibration tests of full-size group-pile foundation. (2) Vibration tests of boiler building before erection of suspension boiler. (3) Vibration tests of boiler building after erection of suspension boiler. In this paper, the authors describe the results of these vibration tests which are considered to be serviceable as important data for modelling of boiler buildings.

概 要

ボイラー建家の動的設計用の適切なモデル化に役立てることを目的として、実機ボイラー建家に対して一連の振動実験を実施した。実験は、昭和54年10月から昭和55年12月にかけて、次の施工時期に行なったものである。(1) ボイラー建家の基礎完成時(基礎のみの状態での起振機実験)。(2) ボイラー支持鉄骨フレーム完成時でヘッダー上げ直前(ボイラー吊り下げ前の支持鉄骨フレームの人力加振実験)。(3) ボイラー本体完成後で水圧テスト直後(ボイラー吊り下げ後の起振機実験)。本報告は、これらの振動実験の概要を述べたものである。得られた実験結果は、ボイラー建家のモデル化に関する重要な資料に成り得るものと思われる。

1. まえがき

一般に、火力発電所ボイラー建家はボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体から成り、ボイラー本体は、ボイラー支持鉄骨フレームの屋上(RF)の大梁を支点とした吊り構造形式をとっている。又、現在までの火力発電所のボイラー建家に対する耐震設計は、ボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体を一体構造物と見做して、屋外設備機械架台としての静的設計が行なわれている。この報告は、以上のようなボイラー建家に対する、動的設計用の適切なモデル化を行なう場合に問題となる、基礎と地盤との相互作用効果、およびボイラー本体の取り扱い方を把握するために、実機のボイラー建家を対象に実施された一連の振動実験について述べたものである。

2. 基礎の振動実験

群ぐい基礎と表層地盤との相互作用に関する資料を得るために、ボイラー建家の基礎が完成した時点で振動実験

を行なった。実施内容は、基礎の起振機実験および常時微動測定であり、次のことを目的とした。(1) 基礎の固有振動数と減衰定数の把握。(2) 群ぐい挙動の実測による把握。(3) 基礎およびぐいの共振時の振動モードの把握。

2.1. 基礎および地盤の概要

実験対象の基礎は、46.525 m (EW方向) × 40.5 m (NS方向)のボイラー建家の基礎で、図-1に示すものである。同基礎は総計474本の外径500 mm、内径340 mmのP.C.ぐいで支持された群ぐい基礎である。これらのP.C.ぐいは、図-2に示した如く、地中梁下端から約25 mの軟弱層を貫ぬいて下層の風化花崗岩に支持されている。この基礎の総重量は、約1万 tonである。実験時の同基礎は、図-1に示す如く北西角で補機室基礎に連なり、更に、この補機室基礎は、タービン建家北側の地中梁に接続された状態であった。又、同基礎の東西の側壁土は、東側で深さ2.5 m、西側で深さ8 m迄掘削されて無かった。

2.2. 実験方法

使用した起振機は、建研型同期式起振機（BCS-A-200型）であり、その設置位置は図-1に示した如く㉔通りと㉕通りの交点である。加振方向は、NS, EW の水平2方向である。偏心モーメントは、共振振動数を模索する段階では $2 \text{ kg}\cdot\text{m}$ を用い、共振振動数が判明した段階で $10 \text{ kg}\cdot\text{m}$ を用いた。測定は、基礎上に配置した変位計 ($f_0=0.5 \text{ Hz}$) および、あらかじめくい体に設置した地震計（サーボ型加速度計： $f_0=500 \text{ Hz}$ ）によって行なった。この地震計は、すべて NS 成分用である。又、この地震計は、くい中の設置深さまで砂締めし、その上に流し込んだモルタルで固定した。NS 方向加振時の測点配置を、基礎上の変位計について図-1に、くい体の地震計について図-2に示す。EW 方向加振時の測点は、基礎上の変位計のみであり、図-1の測点を各々 90° 振った位置に設置した。常時微動測定は、上記起振機実験終了後、同じ測点配置で実施した。

2.3. 実験結果

常時微動波形のフーリエスペクトルの例として、地盤上の NS 方向および EW 方向の変位波形のものを各々、図-3、図-4に示す。更に、共振曲線の例として、NS 加振時の基礎上の測点のものを図-5に示す。共振曲線上でピークを示す共振振動数は、NS 方向で 2.4 Hz , 2.9 Hz , 3.2 Hz および 4.9 Hz であり、EW 方向では、 2.1 Hz , 2.4 Hz , 3.0 Hz および 4.7 Hz であった。これらの共振振動数の中で、 2.4 Hz のピークは表層地盤の卓越振動数と推測され、重複反射理論による計算結果とも一致する。次に振動モードの例として、NS 加振時の 2.4 Hz と 4.9 Hz の共振振動数のものを、基礎の変位モードとくい体の加速度モードに関して図-6から図-9に示す。いずれのモード図も記録波形の半周期を6等分して、時系列の動きが分かるように示した同時刻モードである。これらのモード図より次のことが分かる。 2.4 Hz の時の基礎の水平変位モードは、ほぼ平進型であり、振れ中心は H1 (H201) 側、即ち西側にある。更に、上下と水平の最大振幅比は、 $V7/H5 (V207/H205)=0.0314$ である (図-6)。又、この時のくい体の振動モードは、測点 E1 は逆位相になっているが、1次型をしている (図-7)。次に 4.9 Hz の時の水平変位モードもほぼ平進型であり、振れ中心もどちらかと言えば H1 側 (西側) にある。更に、上下と水平の最大振幅比は、 $V9/H5 (V209/H205)=0.177$ である (図-8)。この時のくい体の振動モードは2次型をしている (図-9)。これらの図から、内側と外側のくいは、ほとんど同じ動きをしていることが分かった。NS 加振時の他のピークおよび EW 加振時のピ

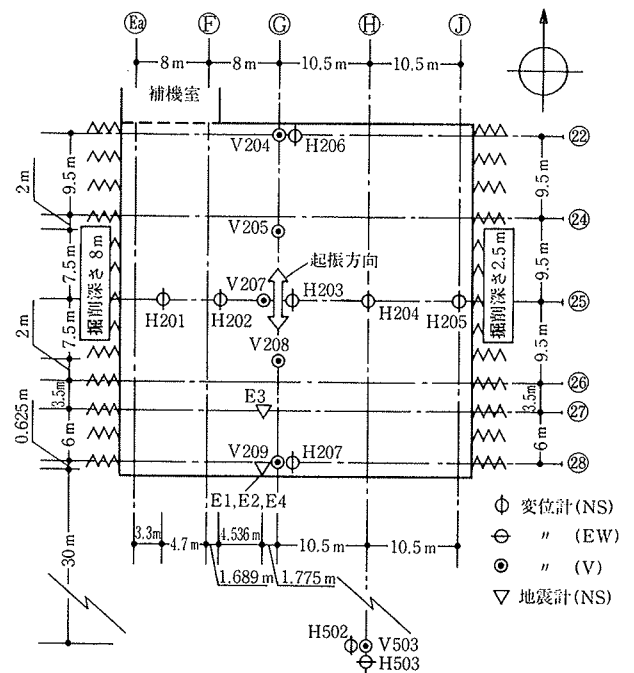


図-1 NS 方向加振の測点配置

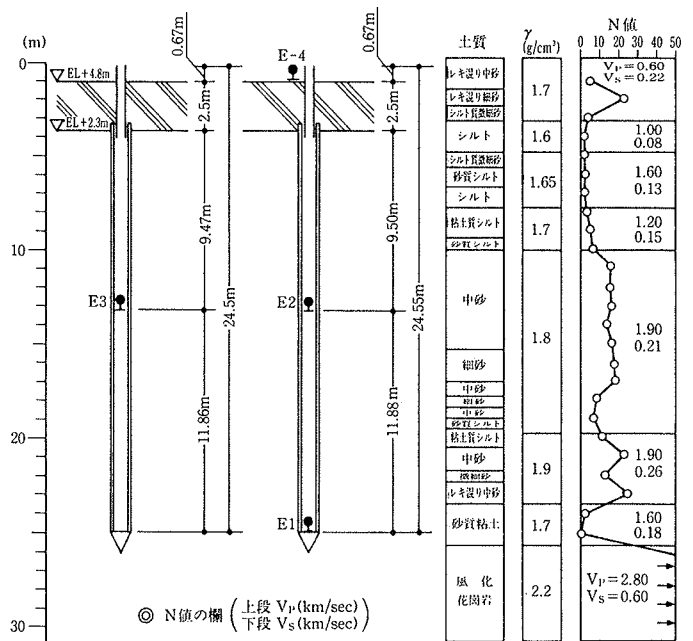


図-2 地盤と地震計の設置深さ

ークについても同様の考察を行ない、まとめたものが表-1である。特に、 2.4 Hz の減衰定数の値に注目して頂きたい。EW 加振の場合が、NS 加振時に比較して約 1.8 倍も大きい。これは、実験時の基礎周囲の掘削状態が、加振力によって生じたエネルギーの逸散量に影響を与えているためと推測される。

3. ボイラー支持鉄骨フレームの振動実験

ボイラー支持鉄骨フレームが完成した時期で、ボイラ

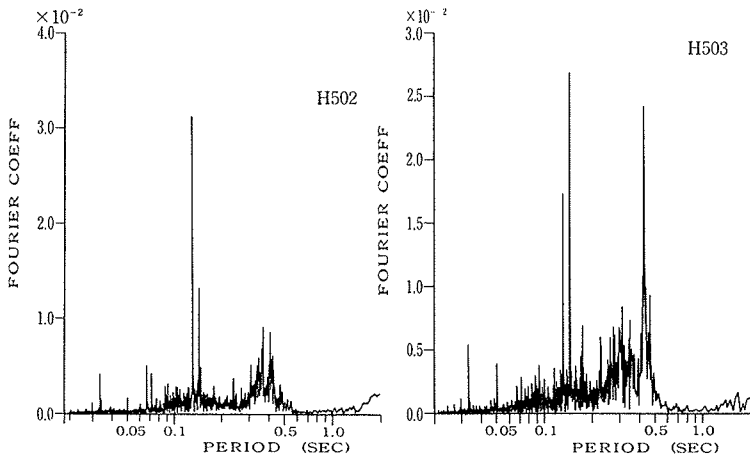


図-3 地盤上の常時微動(NS)

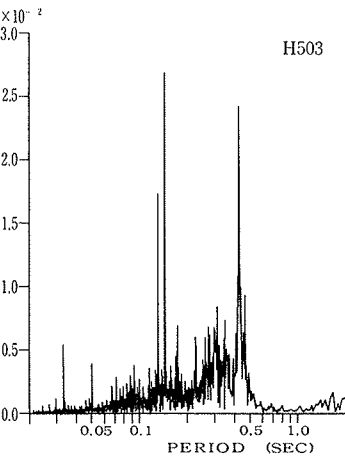


図-4 地盤上の常時微動(EW)

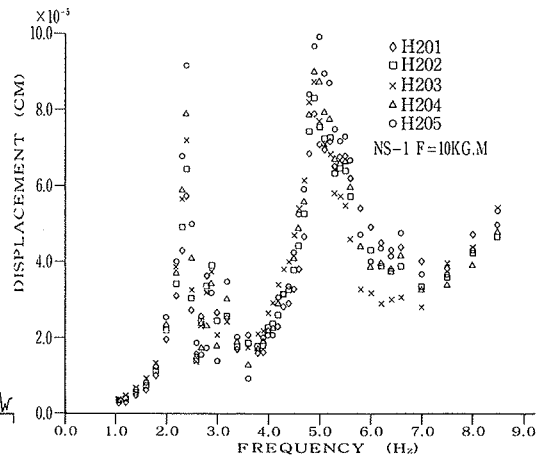


図-5 NS加振時の共振曲線

振動方向	共振振動数 (Hz)	減衰定数 (%)	基礎の換れ中心	上下/水平最大振幅比(%)	上下振動モード	くい体モード
NS	2.4	3.72	西	V207 H205 3.14	1次	1次
	2.9	3.58	東	V207 H201 10.4	1次	1次
	3.2	5.84	西	V207 H205 12.5	1次(伸ひくれ型)	1次
	4.9	8.88	西(ほぼ平面)	V209 H205 17.7	2次	2次
EW	2.1	4.84	北	V209 H201 7.23	—	—
	2.4	6.60	北	V205 H201 7.05	—	—
	3.0	6.77	北	V205 H201 20.8	—	—
	4.7	10.03	北	V205 H201 28.5	—	—

表-1 各モードの特徴

一本体を吊り下げる前にボイラー建家の振動実験を行なった。実施内容は、ボイラー建家の人力加振実験と常時微動測定である。この実験および測定は、NS, EWの水平2方向とも実施したが、ボイラー本体を吊り下げた後の起振実験がNS加振であるので、ここでは、主にNS方向の振動性状について述べる。

3.1. ボイラー支持鉄骨フレームの概要

実験対象のボイラー支持鉄骨フレームは、37m (EW方向)×38m (NS方向)×53m (高さ)であり、その西側には、タービン建家が南北方向に連なっている。その概略図を図-10および図-11に示す。実験時のボイラー支持鉄骨フレームは、施工的にはヘッダー上げ直前の時期であり、ボイラー本体に関する部材重量が全く加わっていない状態であった。更に、設備機器類搬入のために、一部ブレースが設置されていない箇所を除いては、竣工時のボイラー支持鉄骨フレームと見做せる状態であった。

3.2. 実験方法

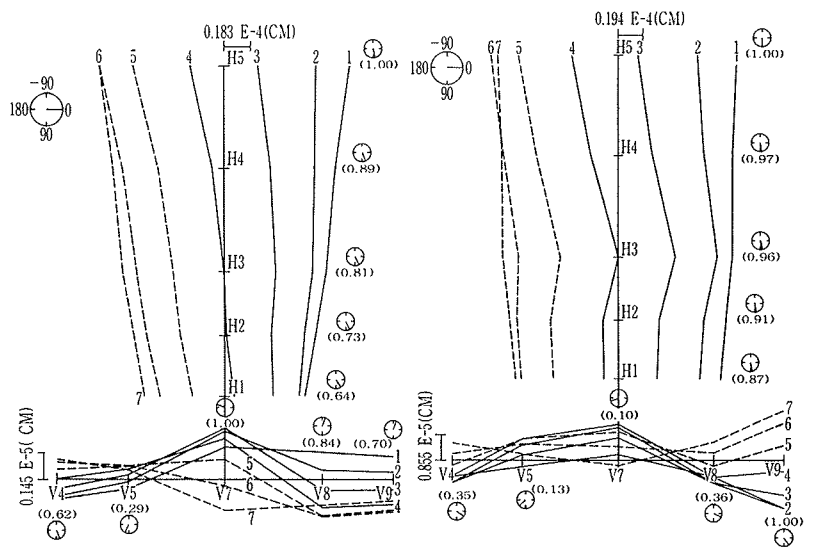


図-6 基礎の振動モード(2.4 Hz)

図-8 基礎の振動モード(4.9 Hz)

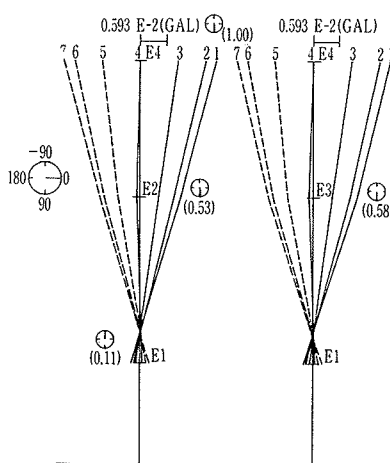


図-7 くい体の振動モード (2.4 Hz)

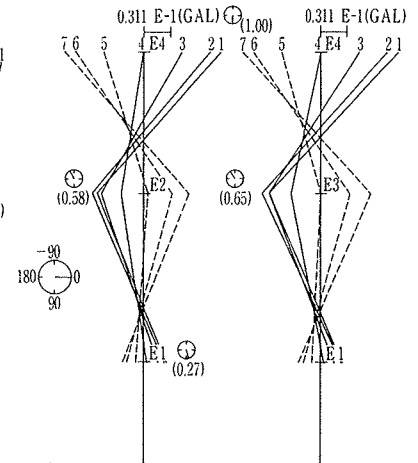


図-9 くい体の振動モード (4.9 Hz)

人力加振位置は、ボイラー支持鉄骨フレーム屋上 (RF) であり、NS加振の場合、RF、⊙通り大梁に固定されている施工用タワークレーンの基礎架台である。加振人員は6名である。測定は、ボイラー支持鉄骨上に配

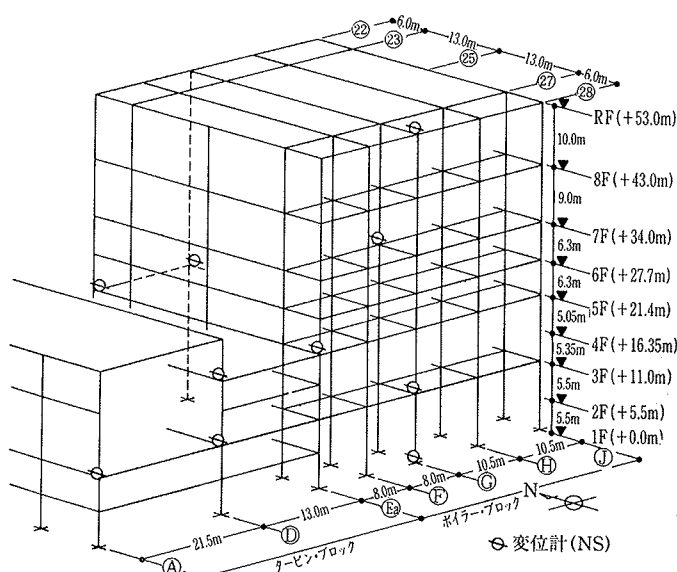


図-10 測点配置 (NS 方向)

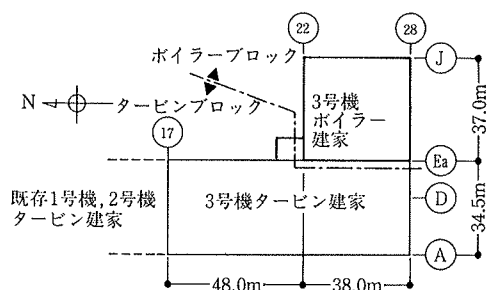


図-11 ボイラー建家とタービン建家の平面位置関係

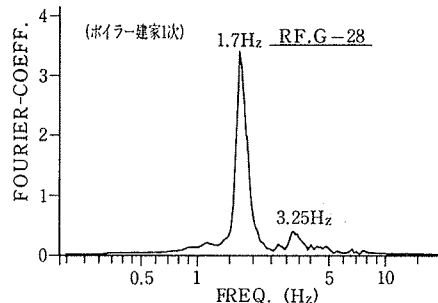


図-12 常時微動 (NS)

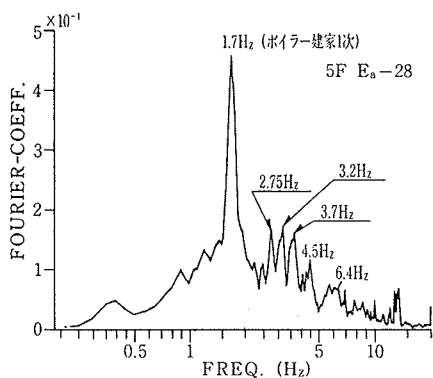


図-13 常時微動 (NS)

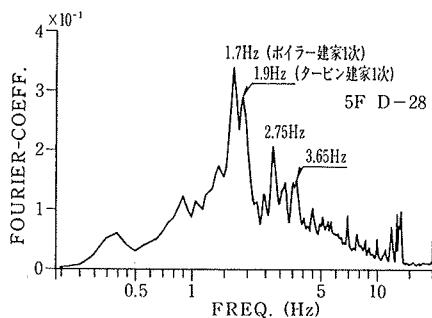


図-14 常時微動 (NS)

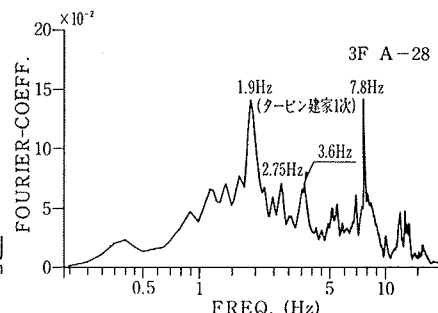


図-15 常時微動 (NS)

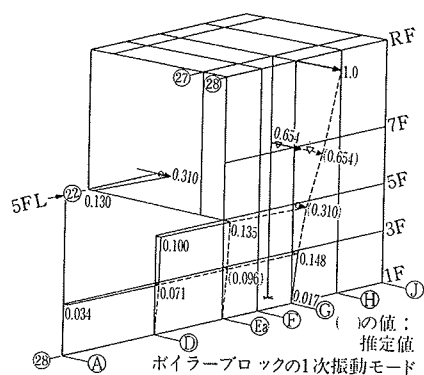


図-16 常時微動 (NS), 1.7 Hz

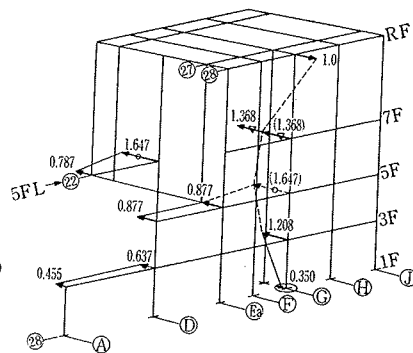


図-17 常時微動 (NS), 4.5 Hz

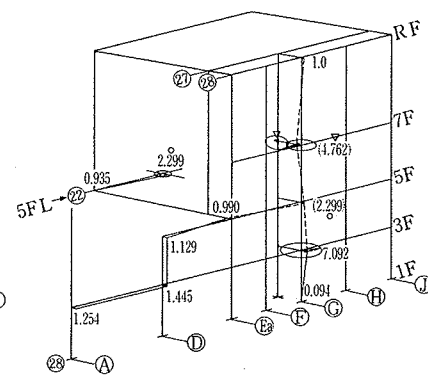


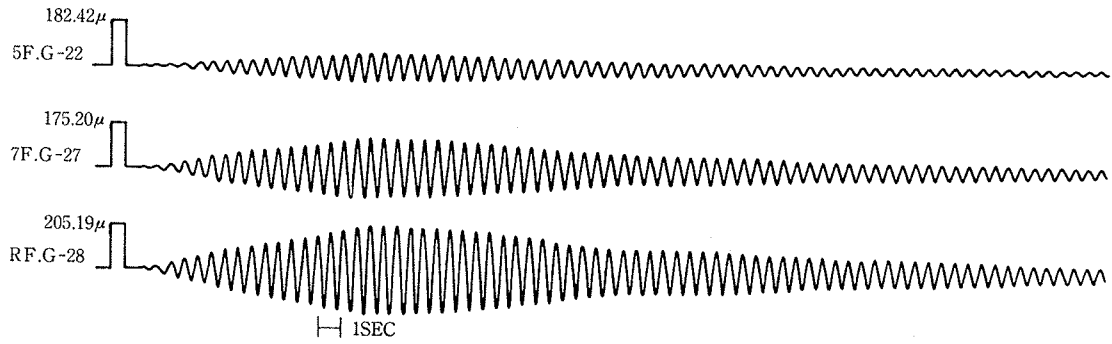
図-18 常時微動 (NS), 6.4 Hz

置した変位計 ($f_0=0.5$ Hz) によって行なった。測点配置は、人力加振実験時および常時微動測定時とも同じであり、NS 方向の場合を図-10に示す。EW 方向の場合は、同じ位置で向きを各々 90° 振って設置した。

3.3. 実験結果

3.3.1. 常時微動測定結果 常時微動波形のフーリエ

スペクトルの例として、NS 方向に関して、ボイラー支持鉄骨フレームの RF.G-28, 5F.Ea-28 の変位波形のものを図-12, 図-13に、タービン建家の 5F.D-28, 3F.A-28 のものを図-14, 図-15に示す。これらのスペクトル上での主な卓越振動数は、1.7 Hz, 1.9 Hz, 2.7 Hz, 3.2 Hz, 3.7 Hz, 4.5 Hz, 6.4 Hz である。この卓越



図一19 人力加振時の自由振動減衰波形 (NS)

振動数における振動モードを以下に検討した。解析方法は、基準測点である RF. G-28 と、その他の各測点との伝達関数を求めて、卓越振動数別の伝達倍率と位相差から振動モードを作成したものである。伝達関数は、F.F.T. ANALYZER によって求めた。各卓越振動数に対する振動モードの例として、1.7 Hz, 4.5 Hz, 6.4 Hz のものを各々、図一16から図一18に示す。以上から次のことが分かった。ボイラー支持鉄骨フレームおよびタービン建家の NS 方向 1 次固有振動数は、各々 1.7 Hz, 1.9 Hz である。高次固有振動数については、スペクトル上に多くの卓越振動数が認められ、単純には、支持鉄骨フレームの全体 2 次、3 次固有振動数を決めることはできないが、2 次振動モード型が 2.7 Hz から 4.5 Hz の振動数域に、3 次振動モード型が 5.4 Hz から 6.4 Hz の振動数域に有る。

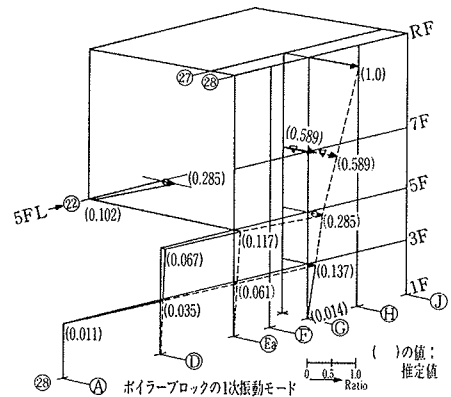
3.3.2. 人力加振実験結果 NS 方向の人力加振による自由振動減衰波形の例を図一19に示す。測点位置は、ボイラー支持鉄骨上の RF. G-28, 7F. G-27, 5F. G-22 である。この自由振動減衰波形から読み取った 1 次振動モードを図一20に示す。同図は、図一16に対応するものである。更に、自由振動減衰波形の振幅減衰比から対数減衰率を求め、表一2に示す。

4. ボイラー吊り下げ後の振動実験

ボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体の振動特性を把握するために、ボイラー本体吊り下げ後に起振機実験を行なった。

4.1. ボイラーおよび支持鉄骨フレームの実験時の状態

実験時のボイラー建家は、施工的には、ボイラーの水圧テスト直後であり、ボイラー本体は水張り状態であった。従って、ボイラー支持鉄骨フレームに加わる全荷重としては、竣工後の運転状態にほぼ等しいと見做せる状態であった。ボイラー本体の総重量は、水張り時で、約 4,000 ton である。又、ボイラー本体は、ボイラー支持

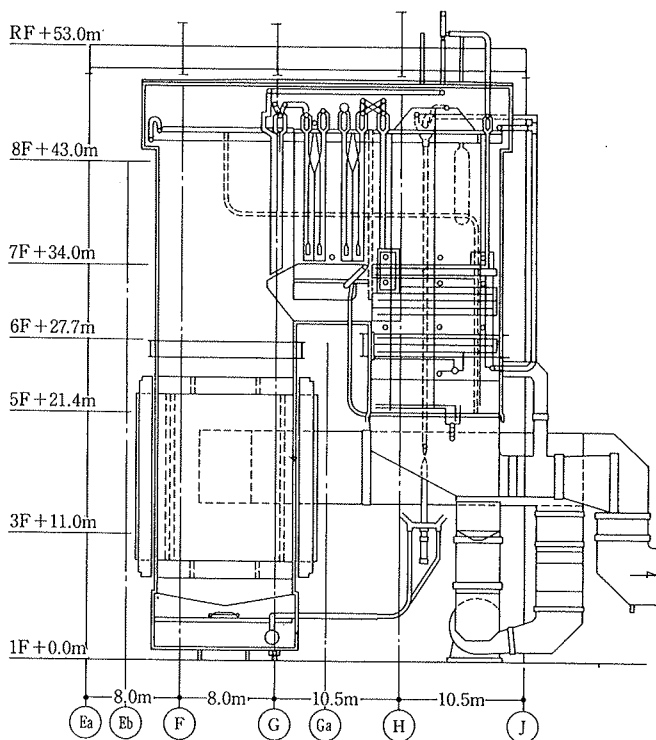


図一20 人力加振 (NS), 1.7 Hz

測定方向	固有振動数(HZ)	減衰定数 (%)
NS	1.7	0.9
EW	1.8	0.9

表一2 ボイラー支持鉄骨フレームの固有振動数と減衰定数

鉄骨フレームの屋上 (RF) の大梁を支点とした吊り構造となっている。その概略図を図一21に示す。この支持方法では、地震時に水平力が働くとボイラー本体は振り子のよう振動する。その結果、ボイラー本体が支持鉄骨に衝突し、ボイラーおよびボイラーに接続されている機器、配管類の破損が予想される。これを防止するために、ボイラー本体には、熱膨張を阻止しない範囲で地震時の水平力を支持鉄骨に伝えるためのバックステイ機構が有り、それに振れ止め (ストッパー) が設置されている。ボイラー支持鉄骨フレームに対してボイラー本体は、そのストッパー部において次の 2 通りの状態を想定することができる。(1)ボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体が完全に接触している場合。(2)この両者間にクリアランスがあり、スライド可能な場合。今回の実験では、竣工後の運転状態が、ボイラー本体の熱による膨張のた



形式 放射再熱貫流式(屋外式)
 最大連続蒸発量 1,730 t/h
 主蒸気圧力 255 kg/cm²・g
 主蒸気温度 543°C/569°C
 燃料 重油, LPG

図-21 ボイラー概要

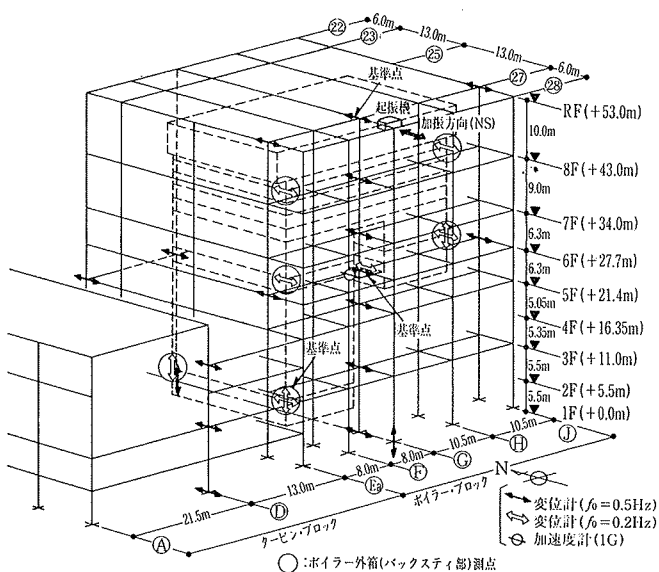


図-22 共振点検索実験の測点配置

めに(1)の状態に近いとの判断で、主に(1)の状態で行なった。この際のボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体の拘束方法は、ストッパー部にライナーを差し込

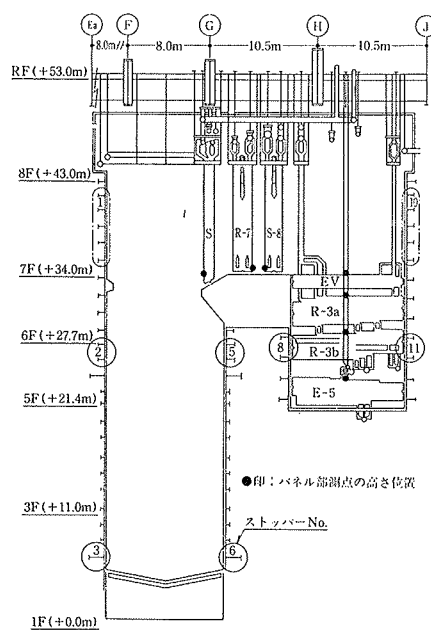


図-23 ボイラー本体内部(パネル部)の測点位置

んで拘束する方法をとった。以後、この状態をライナー④と記述する。更に、(2)の状態での実験も実施した。以後、この状態での実験をライナー⑤と記述する。

4.2. 実験方法

使用した起振機は、建研型同期式起振機(BCS-A-200型)であり、最大加振力: 3.0 ton, 加振モーメント: 2~200 kg・m, 加振振動数範囲: 0.2 Hz~20 Hzである。起振機の設置位置は、図-22に示した如く、ボイラー支持鉄骨フレームの屋上(RF)で②通りと③通りの交点である。加振方向は、NS方向のみである。

4.2.1. 共振点検索実験

ボイラー建家の共振点を模索するために、加振振動数を段階的に変化させて共振曲線を描いた。この実験は、ライナー④、ライナー⑤の場合とも実施した。ボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体の外箱部(バックスティ部)およびタービンブロックの測点配置を図-22に示す。↔印および↔印は、動コイル型変位計であり、各々 f₀=0.5 Hz, f₀=0.2 Hz である。更に、ボイラー本体の内部(パネル部)の測点位置を図-23に示す。パネル部の測点は、歪タイプの加速度計(1G)を使用した。又、パネル部測点の平面的位置は、各パネルの中央部の配管上、又は、スペイサー上である。この他の測点としては、あらかじめ、くい体に設置したNS成分用地震計(サーボ型加速度計: f₀=500 Hz)がある(図-2)。以上の測点総数は、36測点であり、同時測定とした。基

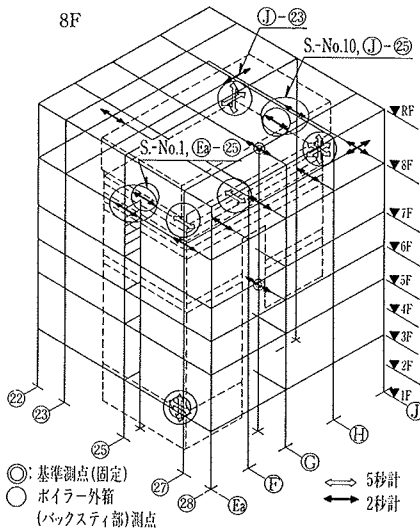


図-24 立体振動モードの測点配置

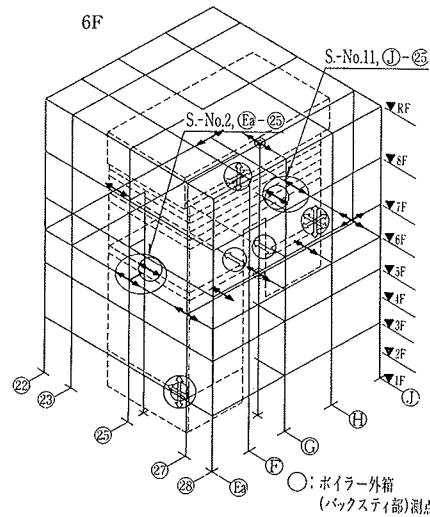


図-25 立体振動モードの測点配置

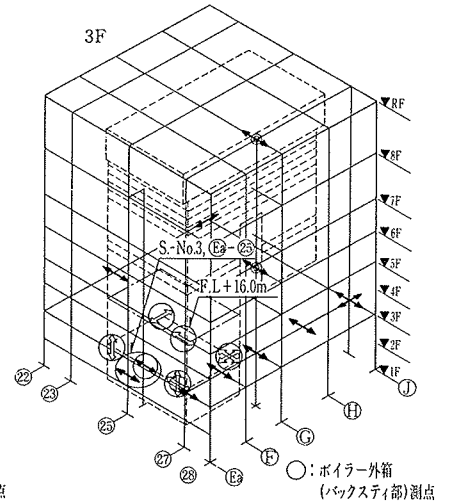


図-26 立体振動モードの測点配置

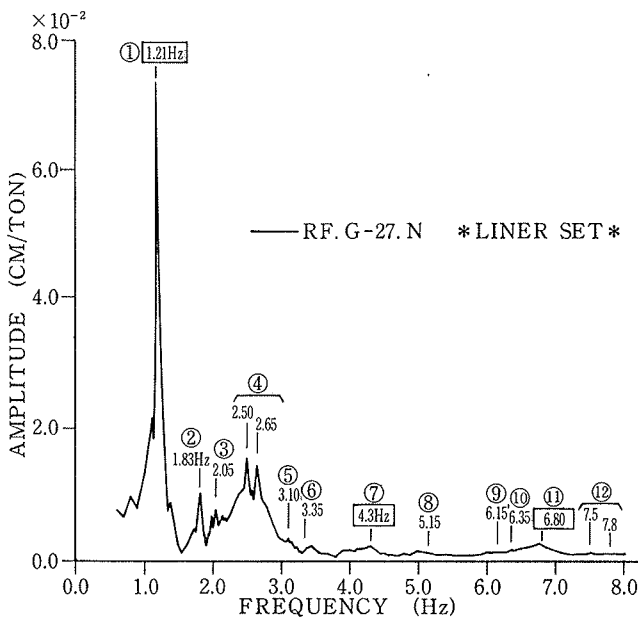


図-27 応答曲線(ライナー有)

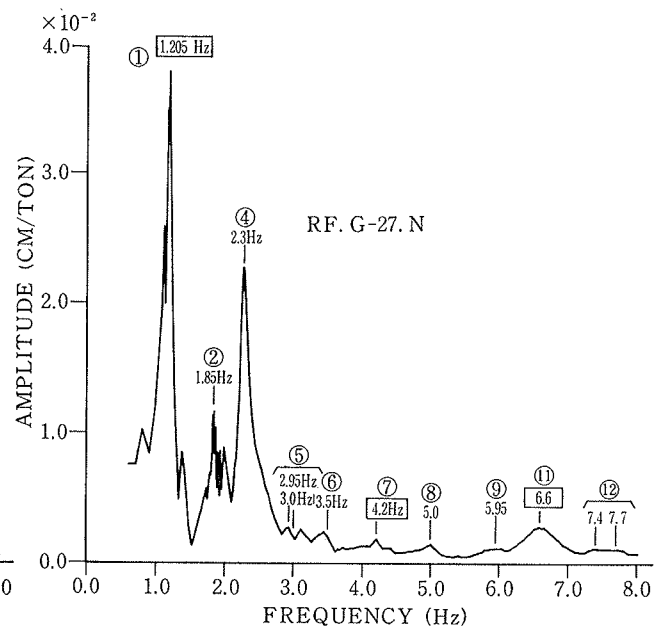


図-28 応答曲線(ライナー無)

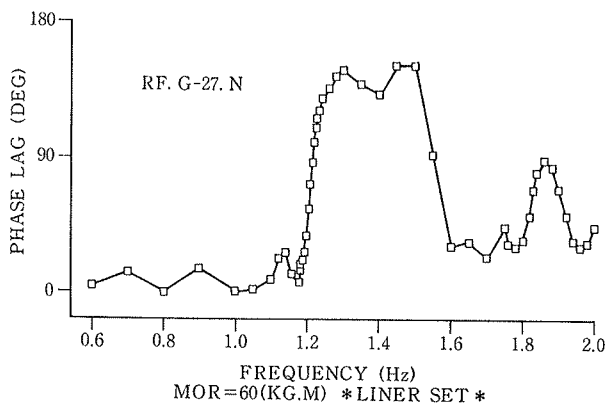


図-29 位相曲線(ライナー有)

準測点は、図-22に示した如く、ボイラー支持鉄骨上に4点、ボイラー本体ボックスティ部に2点、更に、図-23に示すE-5パネルに1点であり、合計7測点を設置した。

4.2.2. 立体振動モードの測定 ボイラー建家の各次共振点における、ボイラー支持鉄骨フレームおよびボイラー本体の立体振動モードを測定した。この実験は、ライナー有の場合のみ実施した。測定は、先に述べた合計7点の基準測点を設け、各階ごとに行なった。測点配置の例として、8F、6F、3Fについて各々、図-24、図-25、図-26に示す。ボイラー内部のパネル部測点については、図-23に示した7箇所のパネルについて順次、測定を行

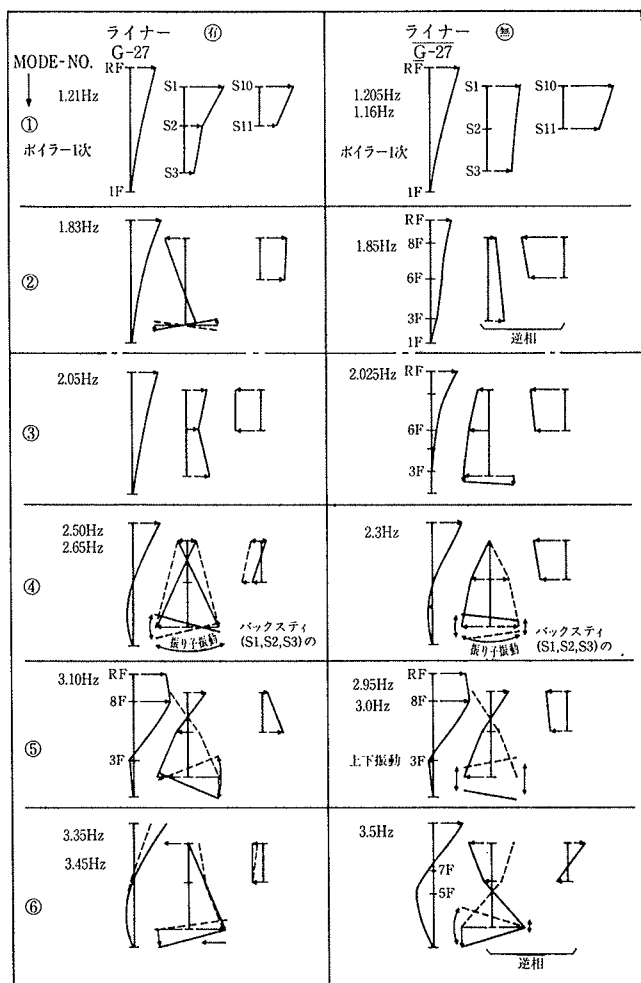


図-30 振動モードの推移(その1)

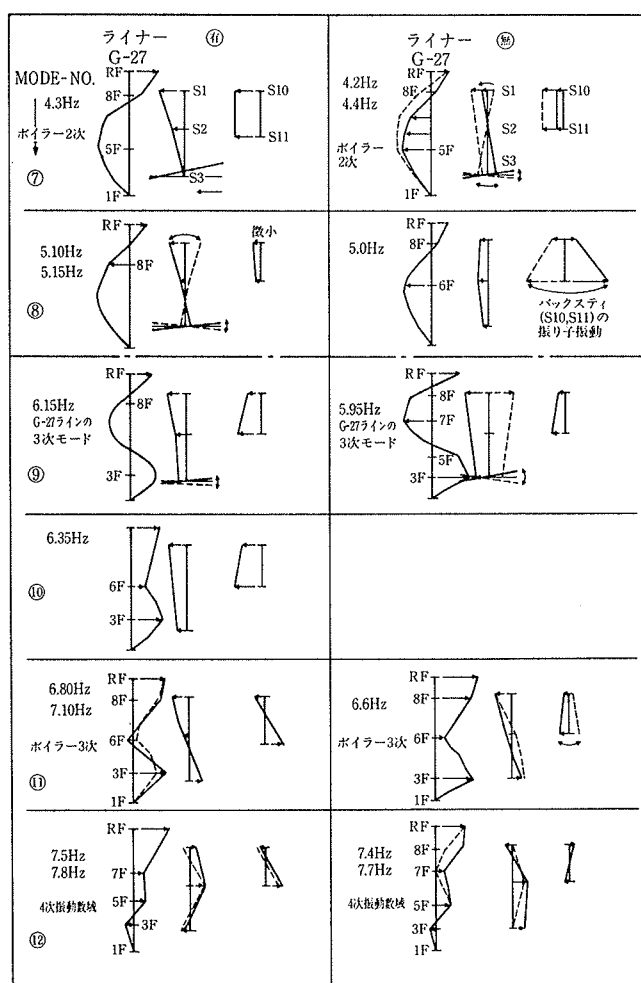


図-30 振動モードの推移(その2)

なった。最後に、ボイラー支持鉄骨フレーム基礎の、弾性変形の測定を行なった。これは、基礎上でメッシュに測点を設け、共振点における上下方向の変位量を測定したものである。

4.3. 実験結果

実験記録の数値化は、磁気テープから直接行ない、PLOTTERを用いて共振曲線、位相曲線、および振動モードを作図した。この際の位相曲線は、起振機からのパルス信号に対する位相遅れである。

4.3.1. 共振点検索実験の結果 共振曲線を描く際は、全加振振動数範囲(0.5 Hz~8.0 Hz)を3~5分割して、それぞれに異なる加振モーメントで加振し、加振力があるべく大きくなる様に考慮した。ここで求まる共振曲線は、実験データそのものである。更に、この共振曲線から全加振振動数範囲において、加振力1 tonに対する応答曲線を求めた。この応答曲線の例として、ボイラー支持鉄骨フレームのRF. G-27測点のものをライナー④について図-27に、ライナー⑧について図-28に示す。更に、図-29は、同測点の0.5 Hz~2.0 Hz迄の位相曲

線(ライナー④)の例である。以上の共振曲線および位相曲線から主な共振点を選択し、各々の共振振動数に対する振動モードの推移について、ライナー④と⑧の場合を比較して図-30に示す。最終的には、同図に示したMODE-No.の①から⑫迄の振動モードに分けられた。ボイラー建家全体が一体となって振動する全体1次、2次、3次の振動モードは、各々、MODE-No.①、⑦、⑩である。更に、ボイラー本体外箱部(バックステイ部)の主な共振点は、MODE-No.④、⑤、⑥、⑧である。例として、ライナー⑧の場合のMODE-No.④を図-31に示す。同図は、ボイラー本体外箱のS1、S2、S3が振り子振動を呈した共振点のモードである。同図の表示方法は、RF. G-27測点が最大応答を示す時刻から30°ごとに6分割して、各々の時刻の同時刻モードを半周期分(180°)描いたものである。又、ボイラー本体内部(パネル部)の共振曲線上のピークも、ほとんどが、この12種のMODE-No.に関連した振動数で生じている。パネル単独の共振点としては、E-5パネルの1.4 Hzのみを確認している。次に、各MODE-No.に対応する減衰定数

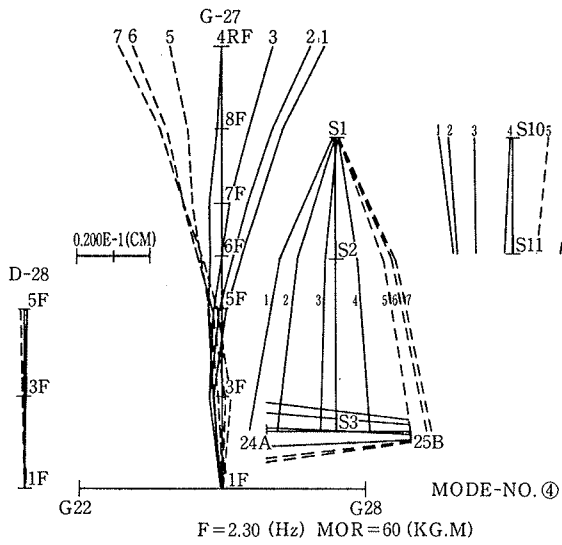


図-31 振動モード(ライナー無)

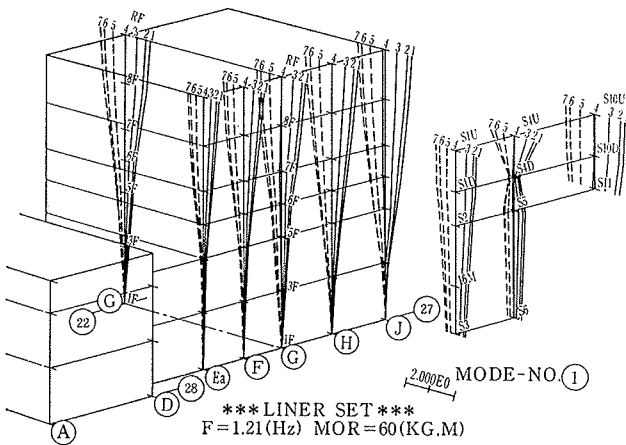


図-33 立体振動モード(ライナー有)

の推移を図-32に示す。この減衰定数は、各測点の共振曲線から $1/\sqrt{2}$ 法で求めたものの総平均である。ボイラー建家の全体1次、2次、3次の振動モードに対応する減衰定数は、ライナー有の場合、各々1.4%、4.0%、3.7%であり、ライナー無の場合、2.8%、3.6%、2.6%である。減衰定数は、全体2次(7)を境にして、全体1次(1)側ではライナー無の方が大きく、全体3次(11)側ではライナー有の方が大きい傾向がある。これは、各MODE-No.におけるボイラー支持鉄骨フレームとボイラー本体の振動量のやりとりに起因するものと推測される。

4.3.2. 立体振動モードの測定結果 ボイラー建家の共振点における、各階ごとの平面振動モードを測定し、基準点(RF. G-27)に対する振幅比で立体振動モードを把握した。例として、全体1次、2次、3次の振動モードの場合を各々、図-33から図-35に示す。同図の表示方法は、RF. G-27測点が最大応答を示す時刻から30°

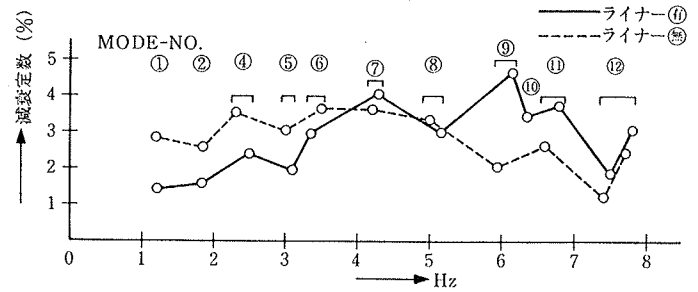


図-32 減衰定数の推移

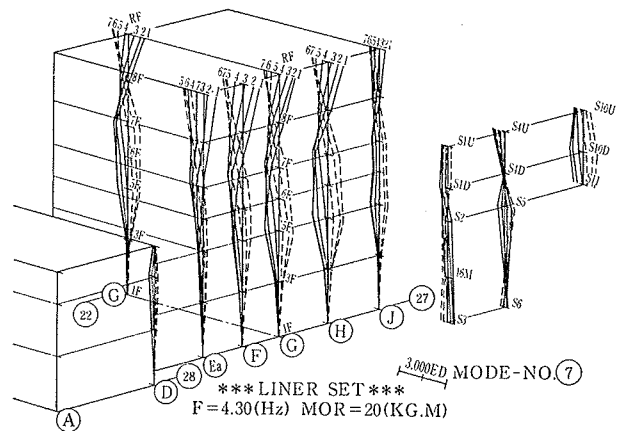


図-34 立体振動モード(ライナー有)

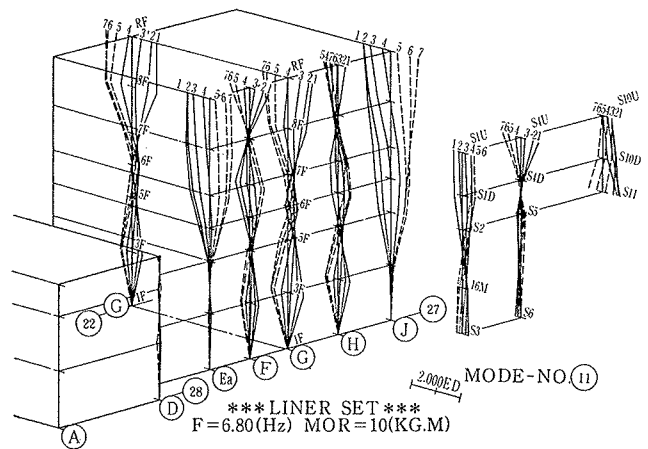


図-35 立体振動モード(ライナー有)

ごとに6分割して、各々の時刻における各測点の振幅比を求め、見かけ上の同時刻モードを半周期分描いたものである。ボイラー支持鉄骨フレームの立体振動モードの特徴は、次のようである。全体1次振動モードは、タービン建家側の拘束効果を受け、1通り側ラーメンが振られている。全体2次振動モードでは、その拘束効果は、さほど感じられず、ボイラー支持鉄骨フレーム全体が2次振動モードを呈した。全体3次振動モードでは、11、12通りの3ラーメンは同相的に振動するが、両サイドの10、11通りの2ラーメンは逆相的に振動し、モード

形状も1次あるいは、2次振動的であった。これは、中央の3ラーメンと両サイドの2ラーメンの剛性の差に起因すると推測される。

5. 振動実験のまとめ

基礎の振動実験における着目点をまとめると次のようである。(1)実機群ぐい基礎の振動実験を実施した。(2)その結果、表層地盤の共振現象による影響が顕著に表われ、表層の固有振動数の所で一つの大きなピークを示した(図-5)。(3)外側のくいと内側のくいに地震計を設置して、くいの挙動の違いを確かめた結果、全共振振動数において、ほぼ同じ動きをすることが分かった(図-7, 図-9)。(4)基礎の側壁土の掘削状態(加振方向の相違)により減衰定数に約1.8倍もの大きな差が生じた(表-1; 2.4 Hz)。

次に、ボイラー本体を吊り下げる前のボイラー支持鉄骨フレームの振動実験の結果をまとめると次のようである。(1)ボイラー支持鉄骨フレームの1次固有振動数は、NS方向が1.7 Hz, EW方向が1.8 Hzであった。(2)1次減衰定数は、NS, EW方向とも0.9%であった。(3)ボイラー支持鉄骨フレームの高次振動は、常時微動の解析結果から両方向とも、2次振動モード型が2.7 Hz~4.5 Hzの振動数域に、3次振動モード型が5.4 Hz~6.4 Hzの振動数域に有った。(4)タービン建家の1次固有振動数は、NS方向が1.9 Hzであった。

最後に、ボイラー本体を吊り下げた後のボイラー建家の振動実験の結果をまとめると次のようである。(1)ボイラー建家の全体1次、2次、3次の固有振動数は、ライナー㊟の場合、各々1.21 Hz, 4.3 Hz, 6.8 Hzであった。(2)1.21 Hz~2.1 Hzの振動数域では、ボイラー支持鉄骨

フレームは、1次振動モード型を示した。更に、3.3 Hz~5.2 Hzでは2次振動モード型を、5.9 Hz~7.1 Hzでは3次振動モード型を、7.4 Hz以上では4次振動モード型を示した。(3)ボイラー本体の外箱部(バックステイ部)および内部(パネル部)の主な共振点は、1.83 Hz~3.5 Hzの振動数域に有った。(4)ボイラー建家全体の1次減衰定数は、ライナー㊟の場合が1.4%であり、ライナー㊟の場合が2.8%であった。高次の減衰定数は、ほとんどが2%~4%の間であった。(5)ライナー㊟の場合の実験により、ボイラー本体の振り子振動のモードが顕著に表われた。

謝 辞

この調査研究は、中国電力(株)と当技術研究所との共同研究の一端として実施されたものである。この一連の振動実験を実施するにあたっては、中国電力(株)土木部建築担当、中国電力(株)岩国発電所建設所土木部建築課、中国電力岩国発電所3期工事共同企業体および三菱重工(株)ボイラー建設所の、多数の方々の御世話になりました。ここに深く感謝の意を表します。更に、当技術研究所振動研究室の此上典文職員他、関係者多数の方々に御協力いただいたことをここに記し、感謝いたします。

参考文献

- 1) 田村, 他: 火力発電所ボイラー建屋の振動特性に関する実験的研究(その1), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和55.9), pp.797~798
- 2) 田村, 他: 火力発電所ボイラー建屋の振動特性に関する実験的研究(その2)~(その4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和56.9), pp.913~918