

大型工場建築建家の立体振動解析(その1)

渡 辺 清 治
寺 村 彰

概 要

最近の工場建築は、大型化・高層化の傾向があるにもかかわらず、この構造解析はほとんど在来の震度法により行なわれている。しかし、今後は、この工場建築も、試験結果と照らし合わせながら、動的解析方法を確立してより健全な構造設計にしなければならない。昭和44年11月以来、火力発電所建家(1棟)、製鋼工場転炉棟(3棟)の動的試験を行なってきた。これらは、大型工場建築、大型高層工場建築に属する。これらの試験結果に基づき振動解析を行なったところ、通常の高層建築の動的手法として、しばしば使われるところの、単一ラーメンを代表させる方法では解析できないことがわかった。この原因は、架構の立体振動、水平方向のねじれ振動、等にある。

本報告では、上記の工場建築の中の、火力発電所建家を代表として取り出し、工場建築の動的解析を行なったときに生ずる問題点を述べる。

1. 火力発電所建家について

この建家は、純鉄骨造6階建の火力発電所であり、臨海工業地帯に当社が施工したものである。

最高高さ：約38M、建築面積：約4400M²

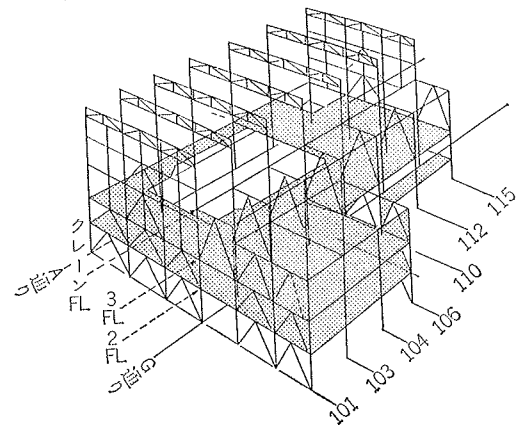
容積：約115,000M³

この建家は構造上種々の特徴があるので、以下にその大略を述べると、

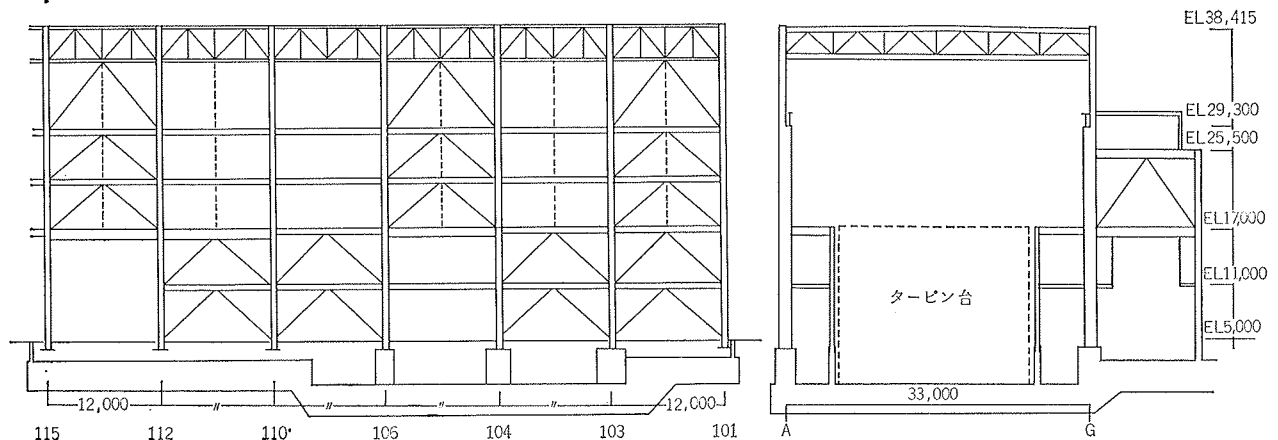
- 主要ラーメンの動特性が、非常に異なること。
- 水平骨組の剛性分布が、不均一であること。
- 内设される重量機械の設置場所がかたよっていて、荷重分布が不均一であること。
- 2階・3階の床面に、タービン台用の開口部があり、このためA通り側とG～M通り側とが分離していること。

e. 各階床面の形状が、不規則であること。

これらの構造上の特徴は、図1、図2に示される。したがって、複雑な振動性状が現われることが予想さ



図一2 第1期工事建家の架構概要図



図一1 A通り・106通りの架構図

れる。

2. 振動実験

当時、建設状況は、第1期工事(図1)の仕上げ工事がほぼ終了して、重量機械物の設置前であった。また、隣接して、同一の建家である第2期工事鉄骨建方第3期工事杭打工事が行なわれていた。実験対象建家は、図1・図2の第1期工事である。

実験項目は、建家の常時微動測定(5階レベル数か所)と、起振機(最大加振力10.0トン)実験である。常時微動測定波形は、(1)式により周波数解析を行なった。

$$F(\omega) = \left\{ \left[\int_0^T X(t) \cdot \cos \omega t \cdot dt \right]^2 + \left[\int_0^T X(t) \cdot \sin \omega t \cdot dt \right]^2 \right\}^{1/2}$$

$0 < t \leq T$
 $T = 20.0 \text{ sec}$
 $dt = 0.01 \text{ sec}$ (1)

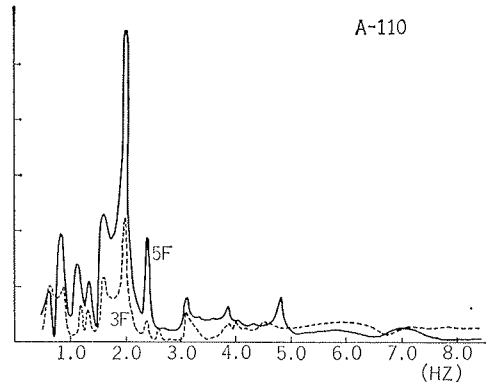
起振機実験の加振点は、モニター中央および、高次振動と床面のねじれ振動を測定するため3階、の2か所である。この測定器配置は、115通りから101通りまで、2スパン互に配置し、これらの測定波形は、それぞれ、不動点の波形を基準にして、時刻合わせを行なった。この方法により、この建家の全体的な変形曲線、共振点を得た。

3. 実験結果

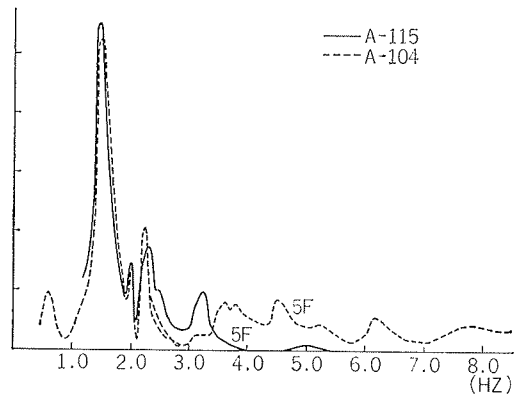
ロッキング・スエいの性状は、ロッキングは全く観測されず、スエイも解析として使える結果は得られなかった。

常時微動の周波数解析結果は、図3、図4に示される。起振機強制振動実験共振曲線は、図5、図6に示される。記号X1, X2, ……、Y1, Y2, ……、は共振点につけた名称である。Y1, Y2, Y3は、長辺方向の変形曲線である。これは、図7に示される。この変形曲線の特徴は、Y2, Y3について、A通りとG通りとの位相が逆であることである。A通り側・G通り側は、図1の左の図の架構に相当し、この架構は、梁・抜き・鉛直ブレース等で構成されているので、剛性が高く、せん断変形の割合が大きい。したがって、比較的安定した3次モードまででていたのに対して、A通りとG通りとが水平剛性の弱い屋根面で結ばれると、このような、逆位相になる場合もある。

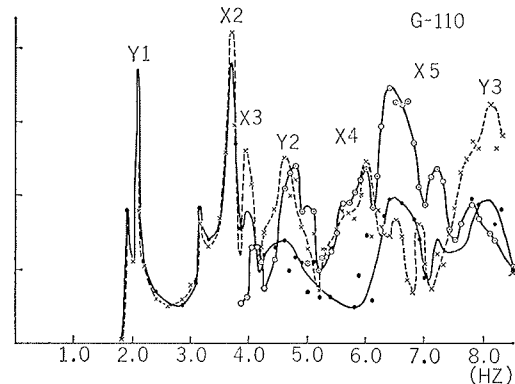
この現象は、起振機実験ばかりでなく、地震波をう



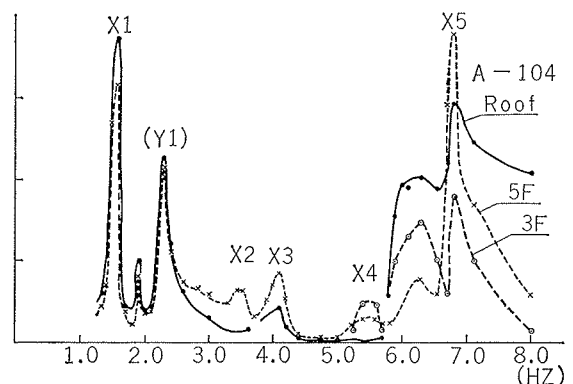
図一3 常時微動周波数解析(長辺方向)



図一4 常時微動周波数解析(短辺方向)



図一5 共振曲線(長辺方向)



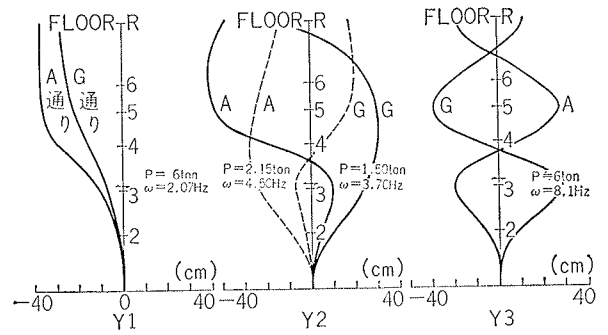
図一6 共振曲線(短辺方向)

けたときにも現われることが考えられ、水平部材に作用する応力を検討しなければならない場合もある。

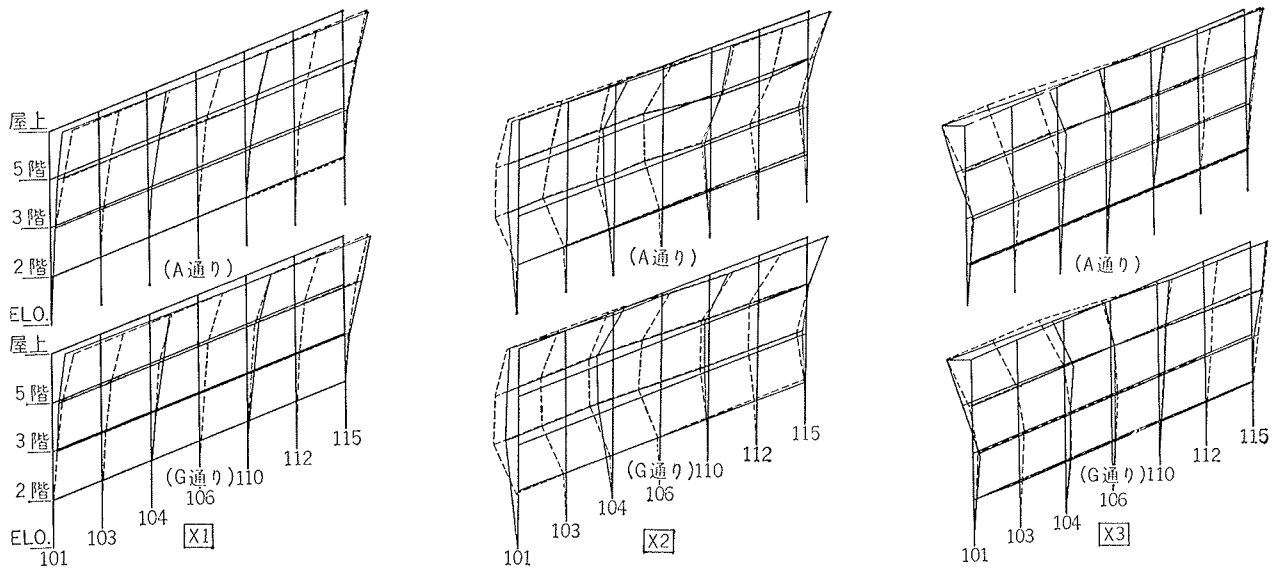
記号X1, X2……の変形曲線は、図8に、実線で示される。X1は、短辺方向の各ラーメン連成系の1次

測定階	1.6Hz	2.07Hz	2.3Hz	3.70Hz	4.5Hz	6.8Hz
屋上	.0375	.0145	.0327	.0190	.0298	—
5階	.0360	.0145	.0325	.0180	.0445	.0144
屋上	.0320	.0193	.0325	.0243	—	—
5階	.0320	.0193	.0400	.0183	—	.0174

表一 減衰常数



図一七 長辺方向の変形曲線(Y1~3)



図一八 短辺方向の変形曲線 (X1~5)

振動形である。X2以上の高次振動は、立体的性格の強い振動形である。

なお、これらは、短辺方向1成分の測定値だけを記入したが、各種変形曲線を見ると変形性状が理解できたためである。

4. 解析

115通りから101通りまでの7つのラーメン(単独ラーメン)に関する固有値計算結果(表2)を見ると、1次振動形X1に相当する振動数(1.60Hz)は、連成

系であることがわかる。そこで、以下に、多少、複雑になっている短辺方向の解析を示す。

ラーメン名称	1次振動数	2次	3次	4次	5次
101ラーメン	2.86Hz	4.78	9.40	10.22	12.35
103 "	1.08 "	1.84	2.92	9.52	11.45
104 "	1.13 "	1.90	3.64	7.13	9.12
106 "	—	—	—	—	—
110 "	1.45 "	5.10	8.00	9.50	10.44
112 "	1.19 "	2.32	3.27	9.33	10.23
115 "	1.74 "	5.18	7.92	10.91	15.84

表-2 単独ラーメンの振動数

解析は立体骨組の性質をできるだけ考慮して、骨組の不規性に起因する動的特性を検討しながら進めた。

解析方法：まず、単独ラーメンの固有値を計算した。すなわち、7つの単独ラーメンを、部材の曲げ、軸、せん断変形を考慮して、8節点で構成される7つの門型ラーメンに置きかえて、プログラム STEP-01 および、プログラム EIGEN により固有値計算した。この振動数は、表2に示される。次に、門型ラーメンの振動形を個々に検討して、さらに図9に示される3種のタイプ(a, b, c)に分類することが、ほぼ、可能であった。これを下式のせん断置換法により行なった。

タイプ a K_i : 1 節点目のばね常数

$$K_i = \frac{K_1 X_i - \sum m_i \omega_i^2 X_i}{X_i - X_{i-1}} \dots\dots\dots(a)$$

タイプ b (a), (b)両式から求める。

タイプ c

$$K_i = \frac{\sum m \omega^2 X_i}{X_i - X_{i-1}} \dots\dots\dots(c)$$

ただし、i 節点番号

ω 1次振動形振動数 (Hz)

次に、水平架構は、2階・3階が特に不規則なため図10、図11に示される床面の分割を行なった。点線で囲まれた破線の部分が、1つの要素を作っている。これらの1つの要素内では、コンクリートスラブ (t=200mm)があり剛性は高い。4階以上は、単独ラーメンの節点間を結ぶものとして、単位力を加えたときの静的変位量を、STEP-01から求め、剛性計算した。

5. 解析用架構図

以上の結果、図12に示される架構図になる。ここで、線材あるいは矩形面で示される1~19は、質量の集中を示す節点である。101, 115通りの2面は建家の両端にあり、梁、抜き、ブレース等で、結ばれているので、A通りとG~M通りとは同一変形すると仮定している。103, 104ラーメンは、架構形式が同じである。同様に110, 112ラーメンは4階以上がほぼ同じ架構形

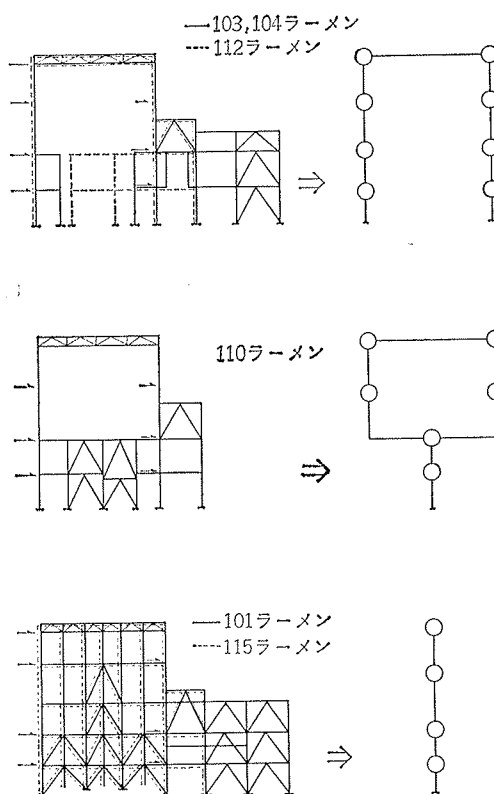


図-9 置換方法

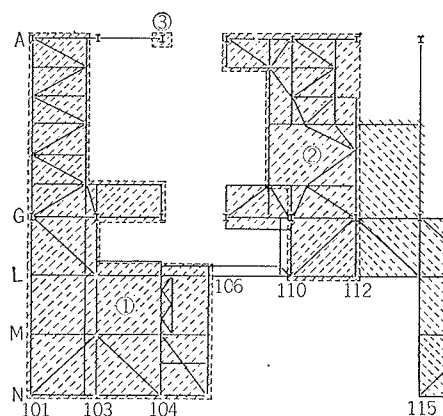


図-10 2階骨組図およびスラブ分割図

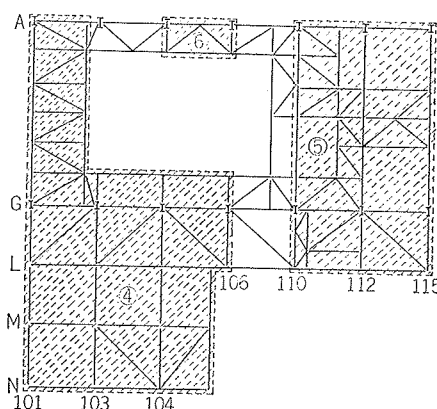


図-11 3階骨組図およびスラブ分割図

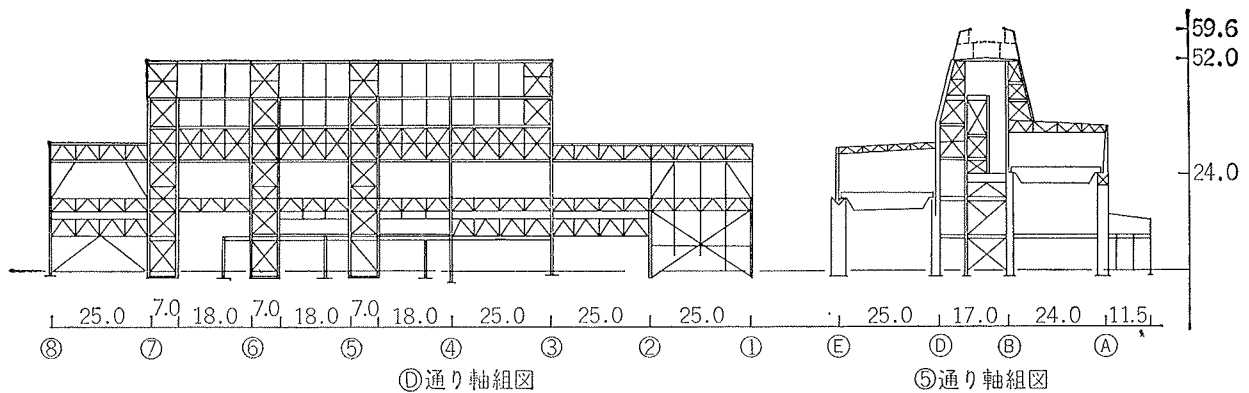
架構の特性を、さらに単純化して、節点数が、15の場合も行なってみた。この結果は、表4に19節点の場合と比較される。この場合、X1, X2, X3 に対しては、よく一致している。

これに対して、図13は、タービン台開口部を無視して、単独ラーメンを1本の節点系に置き換えて、7本からなる平面にした場合である。

この結果、計算振動数は、表5に、平面置換18節点の場合として示される。この計算結果は、振動数・振動形のうでで実測とかなり異なった。この場合の剛性は、もちろん、上記2つの場合と同じ評価をしている。

	実 験 値		理 論 値	
	振動数(Hz)	減衰常数(%)	振動数(Hz)	刺激関数
1 次	1.61	3.77	1.41	1.48
2 次	4.17	4.27	3.03	-0.24
3 次	5.89	4.73	3.57	-0.62
4 次	6.67	3.58	5.00	0.44
5 次	7.17	3.12	8.34	-0.05

表一六 転炉棟の実験結果との比較



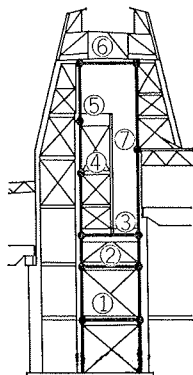
図一四 製鋼工場転炉棟架構図

8. まとめ：大型工場建築動的解析の考察

大型工場建築の耐震設計は、震度法で、高さ方向の係数から得られる力と、クレーン稼動によって生ずる力、風圧による力などを隣接するラーメンに伝え、このラーメンで、支持する方法、あるいは、さらに、水平ブレースなどで耐震ラーメンに伝えて支持する方法をとっている。そして、動的解析する場合は、これらの特に重要な架構をとり出して、地震応答を計算している。しかし、最近の工場建築は、大型化、高層化の傾向があり、内設される機械の複雑化に伴い、架構形態が複雑になる。この結果、床の平面的大きさが増し、平面骨組が不規則になる。同様に、架構そのものも、不均一性を生ずる。

図14は、某転炉棟の架構図である。転炉は5, 6, 7通りに1基ずつ配置(7通りは未設)される。これらの架構は同じである。そこで、図14の右図を、図15のように、吹抜部の影響を考慮して、固有値計算した。表6は、実測値と比較したものである。

この結果、振動形から検討する



図一五

と、変形量・位相の点からみて、かなり異なっていた。

これらの結果、各階平面骨組を考慮し、かつ、開口部、吹抜け等の構造的特徴を把握して解析することにより、実測値とほぼ、合うことがわかった。そして、また、水平方向のねじれ振動も、比較的低い振動数で生ずるが、実測値と、ほぼ合うことがわかった。

なお、この解析方法についてはいくつかの問題がある。たとえば、

1. 火力発電所建家の節点1, 2, 4, 5の節点内の回転慣性に対する影響。
2. 架構全体の成分立体振動の問題

これらは、今後、研究を進めていかなければならない。

なお、地震応答の結果は、本論で示せなかったので、次の機会に報告したい。

謝辞 本建物実験に関しては関係各社、東電設計株式会社、瀬谷部長、板橋氏、日建設計株式会社、萩原主任、内田氏と協同で行なったものでありますことを報告して感謝いたします。なお、研究を進めるに当たり、技術研究所中川恭次次長の指導を得、実験に当たり角田智彦研究員の協力を得たことを感謝いたします。