

フレクスリップ工法による超高煙突施工時の振動性状

渡 辺 弘 之
横 田 治 彦
塩 谷 清 人
市之瀬 絃 一

§ 1. はじめに

フレクスリップ工法は、コンクリート強度が十分に出来ないうちに連続的に型わくをスライドさせ、構造物を施工しようとするものである。したがって煙突、サイロ等のように上に高い構造物の施工に適した工法である。しかし、この種の構造物施工時の耐震性の見地からは、

- 1) 高さ方向に対し、コンクリートの材令が異なる。特に、地震時の応答が大きいと思われる頂部ほど、コンクリート強度が十分に出ていない、
- 2) 頂部に作業床、型わく、タワークレーン等の重量物が集中している、

等の不利な条件が考えられる。

本報告は、これらの耐震性に関する資料を得るため、実際にフレクスリップ工法を用いた徳山曹達中央発電所9号ユニット200m集合煙突について、施工中の振動を測定することにより振動性状を把握しようとしたものである。また、煙突を棒要素モデルとして置換した場合の解析モデルの妥当性も検討した。

§ 2. 測定の概要

煙突の概要は図-1に示すように外筒(鉄筋コンクリート)部分高さ198.0m、内筒(銅管:6000φ)部分高さ200mの二重構造となっている。

実際の施工では、外筒部分完成後内筒の作業といった順

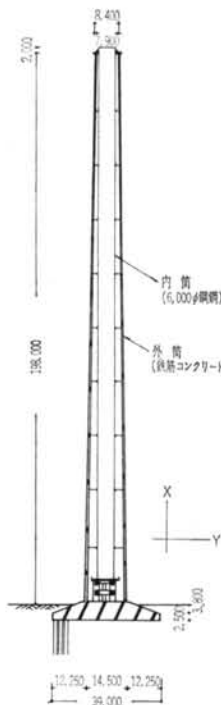


図-1 煙突の概要

序で進められる。したがって振動の測定は、外筒施工時において4回(48.4m, 103.4m, 141.8m, 198m)実施した。図-2に各測定時における外筒の高さと測定位置を示す。外筒198m完成時においては、現場の作業安全上の問題から測定を断念せざるを得ず、したがって頂部だけの振動測定にとどめた。また、当初予定していた常時微動では、振動レベルが小さいため、頂部に設置されているタワークレーン稼動時における応答も併せて測定した。測定を実施した期間は、外筒施工時にあたる6月～8月の中旬にかけてである。

§ 3. 測定とデータ処理システム

測定に使用した機器を図-3に示す。ピックアップは歪みゲージ型加速度計を使用し、X、Y2方向ずつ計6点同時測定とした。そして記録された波形はアナログ量としてデータレコーダに収録した

データ処理については、データレコーダにより記録再生後A-D変換を行ない、フーリエ変換を用いて各次固

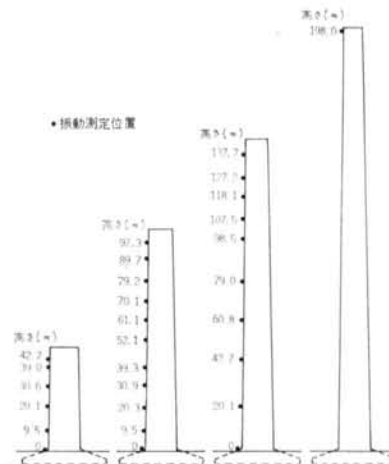


図-2 測定概要図

有周期，固有モードを求めた。図-4 にデータ処理システムを示す。

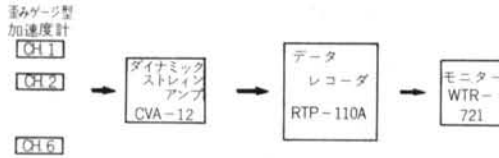


図-3 測定構成図

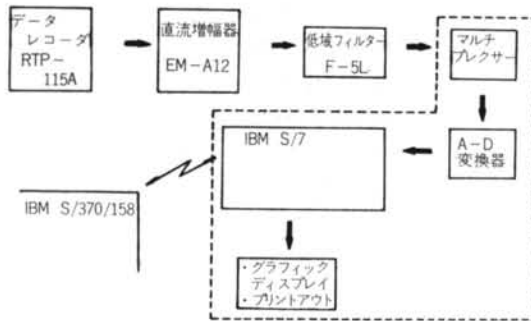


図-4 データ処理システム

外筒高さ (m)	固有周期 (sec)			固有振動数 (Hz)		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
48.4	0.330	—	—	3.027	—	—
103.4	1.078	0.259	—	0.928	3.857	—
141.8	2.105	0.455	—	0.488	2.197	—
198.0	3.413	0.819	0.402	0.293	1.221	2.490

表-1 固有周期

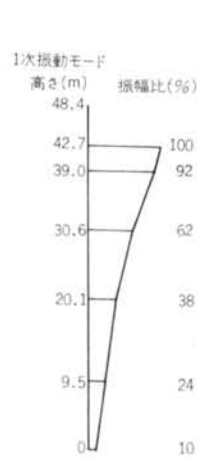


図-5

外筒高さ48.4mにおける振動モード

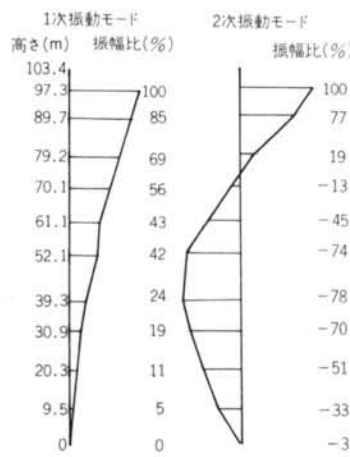


図-6

外筒高さ103.4mにおける振動モード

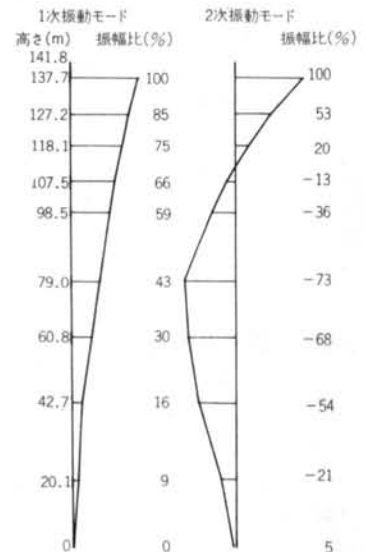


図-7

外筒高さ141.8mにおける振動モード

§ 4. 測定結果

48.4m, 103.4m, 141.8m, 198m の各施工時点における測定記録波形，フーリエスペクトルの一部を附図-1~4に示す。なお，X，Y各方向に対する固有周期のデータ上での差異は全く認められず，したがって今回はX方向の結果のみ取り上げることにした。

4.1 固有周期と固有モード

各外筒施工時点における記録波形のフーリエスペクトルのピークより，各次固有周期を求め表-1に示す。また，これらの周期成分に対する振幅と位相より振動モードを求め図-5~7に示す。しかしこれらは，外筒頂部のタワークレーンの強制力を利用したため，周期成分によって刺激が小さい場合もあり，必ずしも各外筒高さに対応した高次の特性まで求めることができなかった。また，外筒頂部近辺のコンクリート強度が十分に出ていない部分の詳細な性状，および198m施工時におけるモードについては，現場の作業安全上測定を断念した。

4.2 減衰比

一般に減衰比の測定は，自由振動試験から求めることができる。したがって，外筒各高さにおける減衰も，タワークレーンによる強制力急停止後の自由振動波形より求めることにした。その結果，外筒高さ141.8mを除い



図-8 外筒高さ 141.8m における自由振動波形記録

	減衰定数 (%)	
	1 次	2 次
141.8	1.1	—

表-2 減衰定数

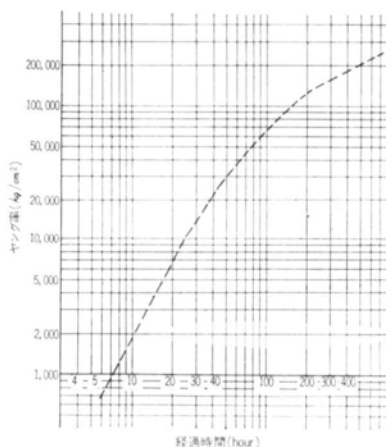


図-9 コンクリートの打設後経過時間とヤング率の関係
 では適正な記録を得ることができなかった。これはクレーンの加力方向が必ずしも一定でないこと、さらに、煙突のように円形断面を持つ場合は、任意の直径方向軸に対する曲げ剛性の若干の差異により、断面中心が一定直線上の運動からはずれて、水平方向に回転運動を伴ってしまう等の原因が考えられる。

図-8 は外筒高さ 141.8m 時における記録波形を、表-2 はそれから求めた減衰比を示したものである。

§ 5. 動的解析の概要

施工中の外筒の動的解析をするにあたっては、モデル化を行なう必要がある。モデル化に際しては多くの問題点があげられるが、そのうち主なものとしては、

- 1) 外筒の部分部分でコンクリートの材令が異なるため、コンクリートのヤング率、せん断強度をどのようにとらえ、モデル化するか、
- 2) 外筒頂部における打設後間もないコンクリート、鉄

筋、ロッドの剛性をどう考えるか、

- 3) 頂部のタワークレーン、型わく、資材、人間等のモデル化、
等がある。

本報告においては、これらの問題に対し次に示すような方針でモデル化を進めた。すなわち、1) に対してはコンクリートの初期強度研究例は少ないが、笠井・平賀・横山らの研究「コンクリートの初期強度に関する研究」(図-9)を参照して、設計強度 270kg/cm^2 のコンクリート打設後の経過時間とヤング率の関係から求めることにする。したがって、コンクリート打設後の時間的経緯は、1日の作業終了時を基準として、現場のコンクリート打設記録から経過時間を積算し求めた。2)の問題については、打設後間もないコンクリートと鉄筋、ロッドと型わくが地震時に一体となって挙動するか否かは不明であり、単純に鉄筋、ロッドの剛性を加えることに疑問がある。そのため、今回は鉄筋、ロッドの剛性を評価しないことにした。3) に対しては、タワークレーン、型わく、作業床、資材等を適当な質点として分布させ、これらの重量と煙突頂部廻りの回転慣性モーメントを求め、モデルの頂部に付加することにした。

5.1 外筒のモデル化

外筒部分のモデル化に対しては、実測結果と比較し易くするため図-2 に示す測定点に合わせて分割し、それぞれの区間を剛性一定の棒要素に置き換えた。そして各節点では、水平変位と回転角を有するものとした。図-10~13は各要素に与えるヤング率を示したものである。ここで、これらの図の1点鎖線は、実測時点の外筒高さにおけるコンクリート打設記録をもとに、図-9 から求めたものである。しかし、外筒頂部付近ではヤング率の変化が急激であるため、更に棒要素を細かく分割することにした。図-14は各外筒高さにおける分割方法を示したものである。

頂部における付加重量、回転慣性モーメントについては、施工の進展に伴い、型わく、作業床面積、資材も軽減して行くはずである。したがって、測定時点とほぼ同じ高さ 50m, 100m, 150m, 198m に対する付加重量、回転慣性モーメントを求め、近似することにした。表-3 に各外筒高さに対する値を示す。

基礎—地盤系のモデル化については、等価な円形基礎に置換し、地盤のばね定数、逸散減衰係数、回転慣性モーメントを算定し表-4 に示す。ここで、基礎の等価重量は本体および基礎上部の土の重量を加え合わせた値を用いた。

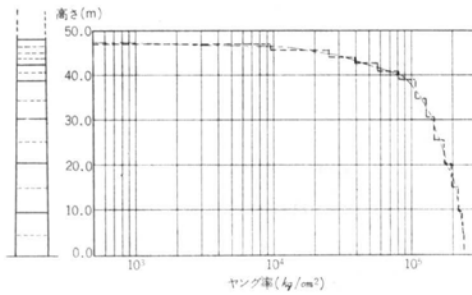


図-10 外筒各部のコンクリートのヤング率(外筒高さ48.4m)

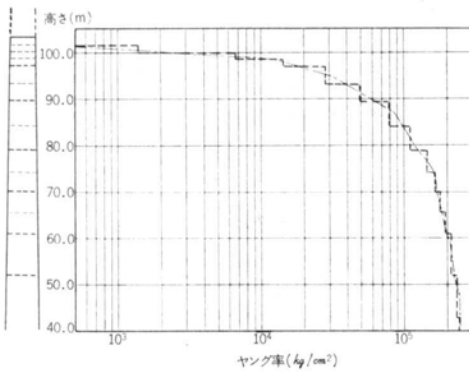


図-11 外筒各部のコンクリートのヤング率
(外筒高さ103.4m)

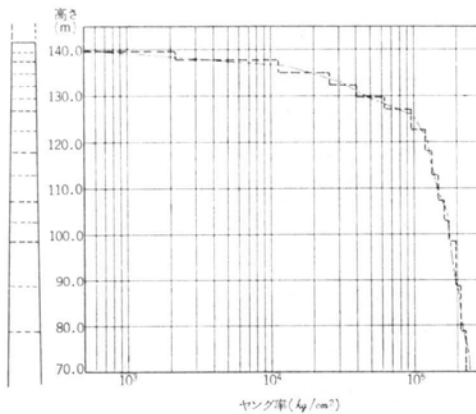


図-12 外筒各部のコンクリートのヤング率
(外筒高さ141.8m)

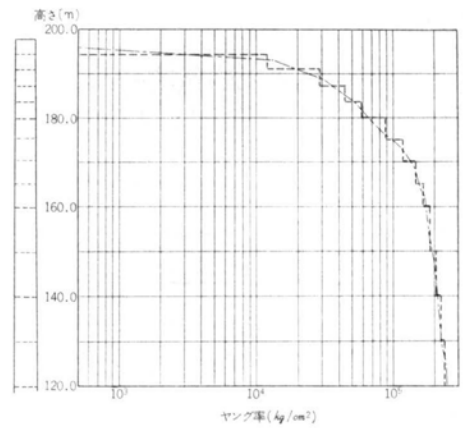


図-13 外筒各部のコンクリートのヤング率
(外筒高さ198.0m)

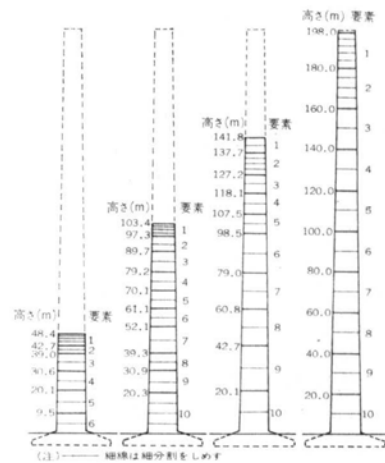


図-14 外筒の棒要素分割モデル

高さ (m)	重量 (t)	回転慣性モーメント (t・m ²)
50	74.43	1826.848
100	73.215	1656.54
150	72.0	1511.76
198	70.785	1406.86

表-3 各外筒高さに対する付加重量と回転慣性モーメント

基礎の自重 基礎上端の土の重量	14600 t + 2990 t = 17590 t	
基礎重心軸回りの 回転慣性モーメント	1.8088 × 10 ⁶ t・m ²	
ばね定数	水 平	2.87 × 10 ⁶ t/m
	回 転	5.3 × 10 ⁸ t・m
減衰係数	水 平	5.62 × 10 ⁴ t・sec/m
	回 転	3.58 × 10 ⁷ t・m・sec

表-4 基礎のモデル化

§ 6. 実測と解析結果の検討

6.1 固有周期

表-5 は外筒各高さにおける解析結果と、実測結果から得られた固有周期を示したものである。

ここに、解析(1)は煙突の施工上昇が2.5m/日であると

解析(1)

高さ (m)	固有周期(sec)			固有振動数(Hz)		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
50	0.384	0.166	0.110	2.604	6.024	9.091
100	1.089	0.253	0.162	0.918	3.953	6.173
150	2.105	0.497	0.221	0.475	2.012	4.525
200	3.325	0.847	0.368	0.301	1.181	2.717

実測結果

高さ (m)	固有周期(sec)			固有振動数(Hz)		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
48.4	0.330	—	—	3.027	—	—
103.4	1.078	0.259	—	0.928	3.857	—
141.8	2.105	0.455	0.218	0.488	2.197	4.590
198.0	3.413	0.819	0.402	0.293	1.221	2.490

解析(2)

高さ (m)	固有周期(sec)			固有振動数(Hz)		
	1次	2次	3次	1次	2次	3次
48.4	0.345	0.163	0.106	2.898	6.146	9.445
103.4	1.193	0.268	0.166	0.838	3.728	6.007
141.8	2.037	0.461	0.212	0.491	2.167	4.726
198.0	3.412	0.863	0.391	0.293	1.159	2.560

表-5 固有周期の比較

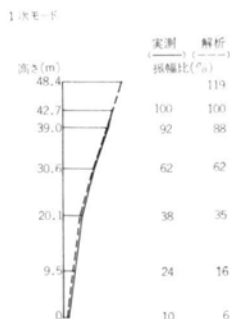


図-15 外筒高さ48.4mにおける振動モード

想定し、図-9からヤング率を推定したモデルより求めたものであるのに対し、解析(2)は前述したように現場の施工記録をもとにしたモデルより、ヤング率を求めて計算したものである。

6.2 振動モード

表-5の実測結果および解析結果の各次固有周期に対する固有振動モードを図-15~18に示す。ここに、実線は実測結果を、破線は解析(2)の結果を示す。198m外筒完成時のモードについては、実測データが無く、したがって解析結果のみを示した。

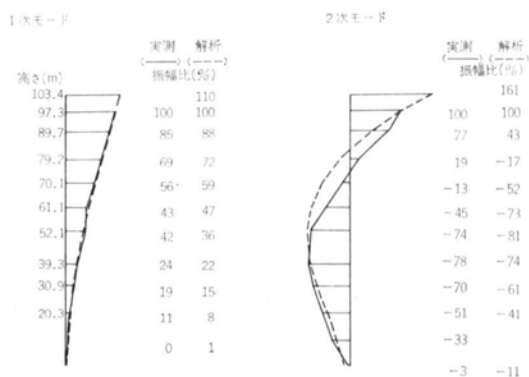


図-16 外筒高さ103.4mにおける振動モード

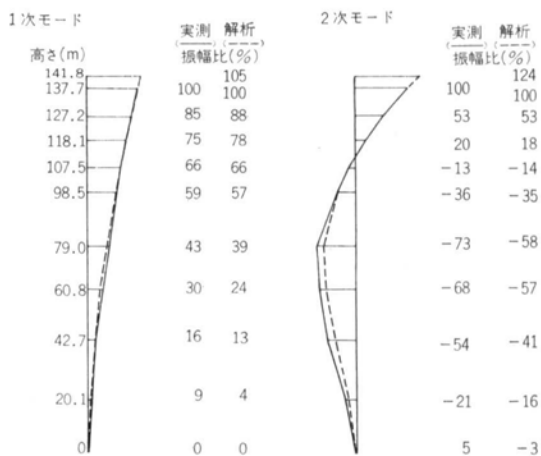


図-17 外筒高さ141.8mにおける振動モード

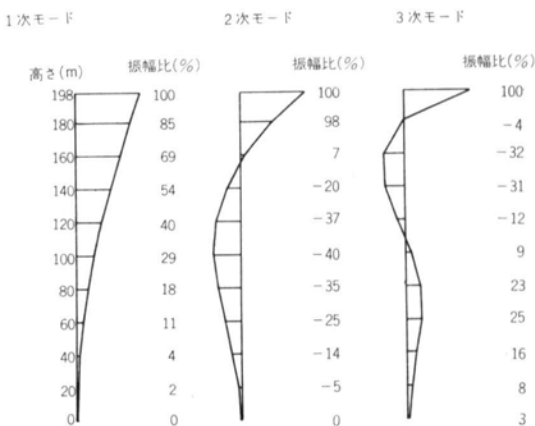


図-18 外筒高さ198.0mにおける振動モード(解析)

6.3 地震応答解析

つぎに、施工時における地震時の挙動を知る目的で応答計算を行なった。応答計算を行なうにあたっては、入力地震波を設定する必要があるが、一体どのような地震波を想定するかが大きな問題となる。実際、煙突施工時にどの程度の地震を経験する可能性があるかは、地域差や施工期間に関係してくるものと考えられる。したがって、今回は一応の目安として、El Centro 1940 N-S、十勝沖八戸 N-S の2つの地震波を最大加速度 100 gal で規準化し、解析(2)モデルに対する入力とした。計算は弾性計算とし、減衰比に関しては1次に対して2%を考慮した。

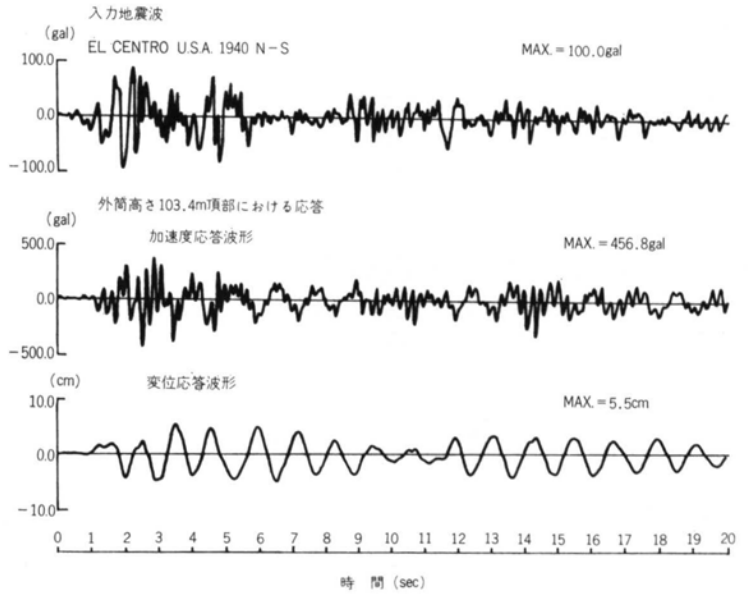


図-19 外筒高さ 103.4m 頂部における地震応答波形

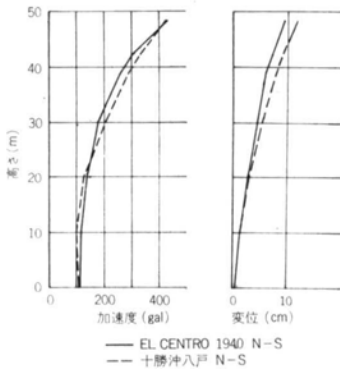


図-20 外筒高さ 48.4m における最大応答値の分布

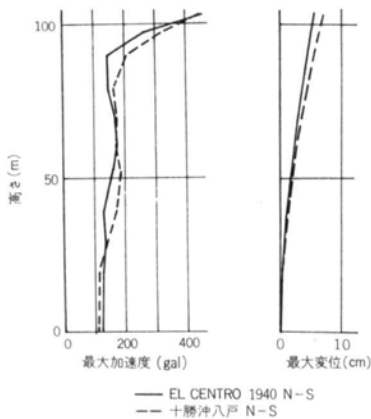


図-21 外筒高さ 103.4m における最大応答値の分布

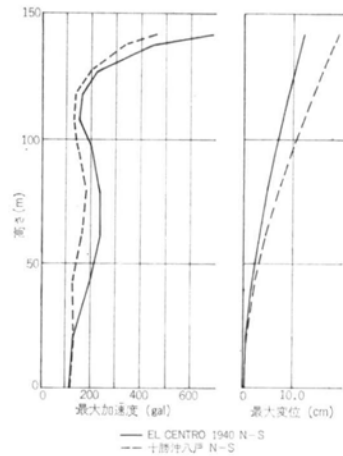


図-22 外筒高さ 141.8m における最大応答値の分布

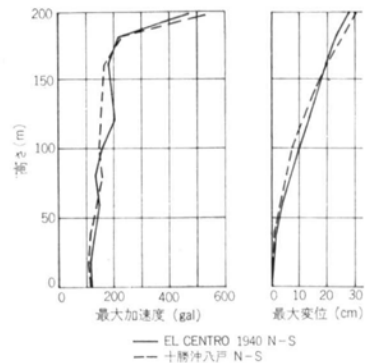


図-23 外筒高さ 198.0m における最大応答値の分布

図-19は、外筒高さ103.4mにおける頂部の応答波形の1例を示したものである。また、図-20~23に外筒高さに対する、最大加速度、最大変位の応答分布を示す。ここに、実線は El Centro 1940 N-S、破線は十勝沖八戸 N-S に対応している。

§ 7. まとめ

実測結果と解析結果に対する固有周期は、表-5に示すように良く一致している。ちなみに198mにおける固有周期は、実測結果で1次が3.413sec、2次が0.819sec、3次が0.402secであるのに対し、解析(1)ではそれぞれ3.325sec、0.847sec、0.368sec、解析(2)では3.412sec、0.863sec、0.391sec とほぼ実測値に対して両方とも数パーセントの範囲内に入っている。また、固有モードについても、データの無い198mを除いて図-15~17に示すように良く一致している。特に141.8mでは、2次モードについても良く合っている。したがって、煙突のように単純形状の構造物であれば、§5.に示したモデル化で十分な精度の固有値、固有モードを把握できることがわかった。

地震応答解析については、入力地震波の持つ固有の特性によって大きく左右されるため、一概に傾向を論ずることはできない。しかし、今回の解析結果のみに注目するならば、図-20~23からもわかるように、外筒高さにより変位・加速度に対する最大値の応答分布は若干異なる

っている。すなわち、外筒高さ48.4mにおける最大値の分布は1次モードの形状を示している。これに対し103.4m、141.8m、198mの各高さでは、変位分布を見る限り1次モードが支配的であるが、加速度分布については高次モードの影響が大きく現われている。特に、外筒頂部近辺のコンクリート強度が十分に出ていない部分では急激に折れ曲がり、かなり大きな値を示している。

しかし、これらは1仮定上の解析結果にすぎず、特に頂部付近の挙動を明確にするには、

- 1) 若令時の鉄筋コンクリートの力学的特性、
- 2) 型わく、ロッド、若令時の鉄筋コンクリート間の力の伝達、

等を詳しく解明する必要がある。

§ 8. おわりに

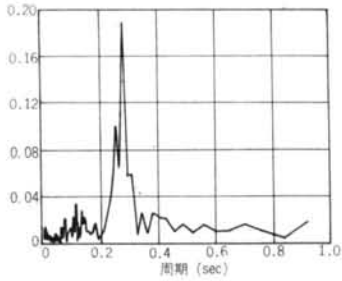
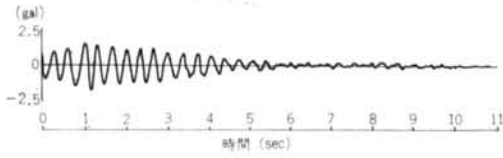
本報告は、フレクスリップ工法による煙突施工時の振動実測およびモデル解析結果を通して、振動性状を把握しようと試みたものである。その結果、実測と解析とは良く対応することがわかった。

しかし、施工時の地震に対する安全性、耐震性の見地からは、まだ多くの不明確な点が残されており、今後の課題となろう。

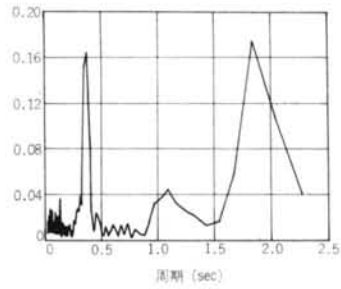
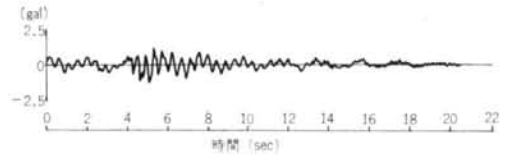
末筆ながら、現場での測定に便宜をはかっていただいた徳山曹達施設部の諸氏、および清水建設作業所の諸氏に感謝の意を表する次第である。

<参考文献>

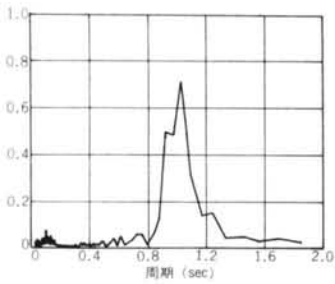
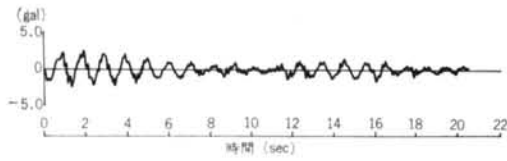
- 1) 笠井、平賀、横山：“コンクリートの初期強度に関する研究” セメント技術年報 Vol. 16~22 昭和37年~43年
- 2) 表、武田、安井、角田：“実存煙突の振動実験” 大林組技術研究所報 No. 11 1975



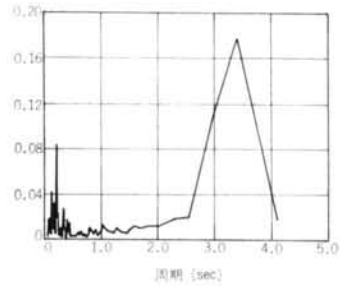
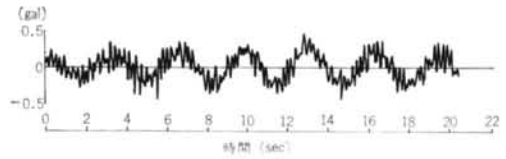
附図一 記録波形とそのフーリエスペクトル
(外筒高さ48.4m)



附図三 記録波形とそのフーリエスペクトル
(外筒高さ141.8m)



附図二 記録波形とそのフーリエスペクトル
(外筒高さ103.4m)



附図四 記録波形とそのフーリエスペクトル
(外筒高さ198m)