

常時微動による大型構造物の振動特性

電力中央研究所 正員 梅井彰雄・増子芽夫

1. まえがき

原子力発電所原子炉建屋、ダム、鉄骨コンクリート建屋、等の構造物を含めた一般の構造物は、何らかの外力によって常に微小な振動の振動をしている。この微小振動は、その構造物特有の動特性に応じて振動であると考え、この微小振動を計測し、振動分析することによって、実在の構造物の動特性を把握しようとする事がしばしば行われる。この構造物の常時微動計測は、起振実験の様な大掛りな作業を必要とせず、実在の構造物を傷つける恐れもなく、比較的簡単に行える利点を持っている。

又、振動の小さな領域の弾性振動であるので、強震時の構造物の応答算定における初期値としての資料にもなる。

最近では、常時微動測定が起振実験の予備試験として行われたり、起振実験に代るものとして行われる。これは、測定が簡単である他に解析が統計的な法によるので、その信号処理方法が、最近、急速に整備されて来ているためである。

電力施設等の大型構造物の耐震性調査のため、いくつかの大型構造物について、常時微動計測を行ない、固有振動数、振動モード、減衰定

数と求め、起振実験結果や地震応答結果、理論計算結果のそれ等と比較し、構造物の常時微動利用の適用性を調べたものである。尚、常時微動測定と起振実験は同時期に行っているため、測定条件はほぼ同じである。

対象とした構造物は次の通りである。

- A: PWR型原子力発電所原子炉格納施設外周コンクリート ($H \approx 43 \text{ m}$)
- B: BWR型原子力発電所原子炉建屋 ($H \approx 45 \text{ m}$)
- C: PWR型原子力発電所原子炉格納施設外周コンクリート ($H \approx 46 \text{ m}$)
- D: コンクリートアーチダム ($H \approx 130 \text{ m}$)
- E: ロックフィルダム ($H \approx 93 \text{ m}$)
- F: 鉄骨コンクリートビルディング ($H \approx 40 \text{ m}$)
- G: PSコンクリートサージタンク ($H \approx 34 \text{ m}$)
- H: 鋼製貯油タンク ($H \approx 10 \text{ m}$)
- I: コンクリート道路橋 (デビダグ方式) ($L \approx 220 \text{ m}$)

図-1に構造物の概略寸法を示した。

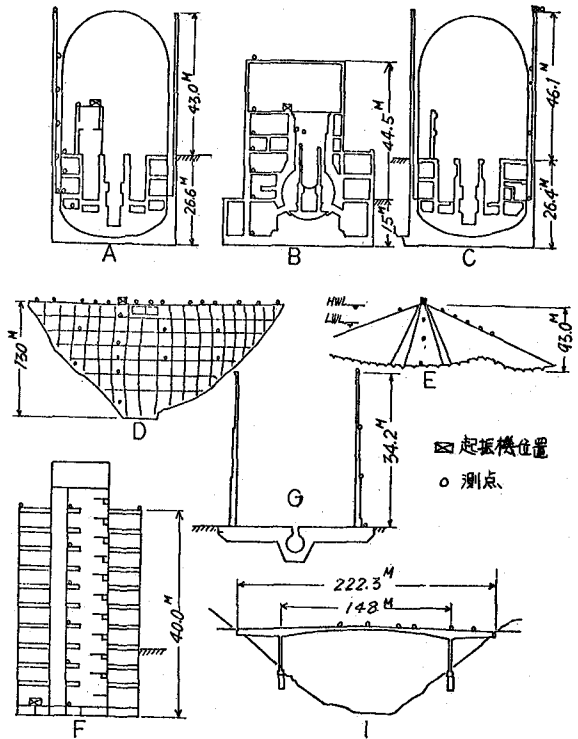


図-1 大型構造物の概略寸法

2. 測定 及び 解析方法

起振実験、地震観測についての測定、解析方法はここでは省略し、常時微動についてのみ簡単に述べる。

測定は、高感度地震計（周期： 1.5 sec ，出力： 16 V/kine ），直
流増幅器，データレコーダーを
基盤構成とし，4～9 基を同時記
録する。記録時間は全ての構
造物について1回約5分間とする。
測定は構造物の他に，地盤，基礎
にも設け，又，周囲に直接的なノ
イズとなる雑振動源（例えば，発
電所，コンプレッサー，建設工事
，等）のある時は，その雑振動源
の条件の変更時の前後を測定し，

構造物に対する影響を確かめる様に
する。測定は昼夜の別なく，工事中の現場が多いので測定出来る周囲の
状況を判断して行う。

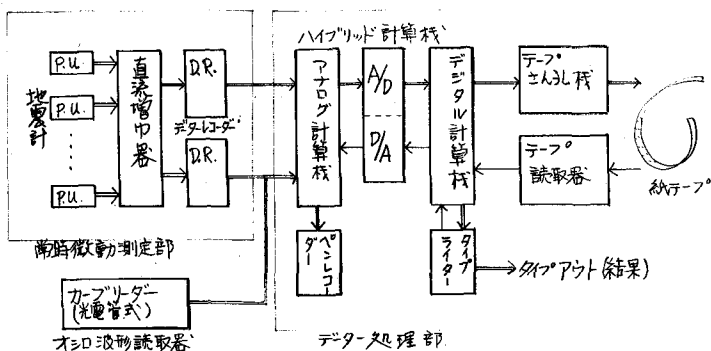


図-2. 測定、及び解析データ処理流れ図

解析方法は，一般に行われているパワースペクトル法を採用した。解析理論については，ここでは省略する。

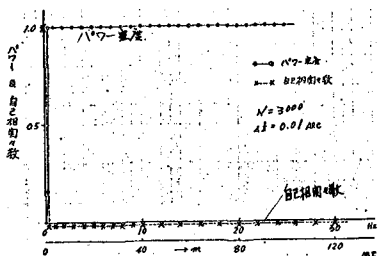
5分間の測定記録の中から，定常状態と考えられる任意の区間，30 sec間を一測定区間とし，2ヶ所抽出し， $1/100 \text{ sec}$ ごみでデジタル化し，3000ヶのサンプリング数を得，これについて自己相関係数とパワースペクトルを計算する。A/D変換，及び計算は，当研究所にあるハイブリッド計算機CLOAP2000Eを用
いる。

図-2に測定，及び解析の流れ図の概略を示した。以下，簡単に固有振動数，減衰定数，振動モードと求
める要領を述べておく。

固有振動数はパワースペクトルのピークを持つ振動数と卓越振動数として列挙し，その中から理論計算値，振
動モード，測定条件を考慮し，固有振動数を判断する。

振動モードは固有振動数に相当するパワースペクトル値の平均根値を振幅に比例する量として用いる。

減衰定数は，パワースペクトルが固有振動数による単峰形（1つのピークのみが存在する）を示している場合
は，自己相関係数から求める。バンドパスフィルター処理をし，その記録のパワースペクトルが単峰形になった時
も同様に自己相関係数から求める。パワースペクトルが，単峰形でない場合はパワースペクトル $1/2$ 法に
よって求める。この場合，次の様な補正係数を用いる。アナログ計算機で一質点系を模擬し，その入力として
単一パルス（図-3の様なパワースペクトルと自己相関係数をもち，
これを白色ノイズとして近似させる。）を用い，この一質点系の応答
のパワースペクトルから求めた減衰定数（みかけの値）とアナログ計
算機に設定した一質点系の減衰定数（理論値）の補正係数として用い
る。データ処理上の誤差（データの長さ，ウィンドウ効果，等によ
る誤差）は，この様に同一条件の下で計算する事で相殺する。



以上の測定，解析は全部の構造物について統一して行った。

図-3. 単一パルス

3. 結果

固有振動数、減衰定数について、常時微動、起振実験、地震観測、設計計算の値を表-1に示した。

表-1 固有振動数と減衰定数の比較

構造物	振動形 (次数)	常時微動		起振実験		地震観測		設計値
		振動数 Hz	減衰 %	振動数 Hz	減衰 %	振動数 Hz	減衰 %	
A PWR型原子力発電所(外国コンクリート)	m=1, n=1	—	—	6.75	4.3	—	—	4.31
	" 2	3.2	1~2	3.35	1.0	—	—	—
	(1) H=43m " 3	4.1	—	4.06	0.9	—	—	—
B BWR型原子力発電所(保力型建屋)	EW 1	5.4	4	5.65	1.4~2	—	—	3.83
	NS 1	4.5	6.8	4.6~4.75	—	—	—	3.78
	H=50m							
C PWR型原子力発電所(外国コンクリート)	m=1, n=1	4.6	—	4.67	2.9	—	—	5.41
	" 2	2.6	1~2	2.63	1.1	—	—	2.63
	" 3	3.6	—	3.51	0.86	—	—	3.51
	(2) H=46m " 4	6.1	—	6.0	0.69	—	—	6.25
D アークダム	非対称 1	2.7	2~3	2.7	2	2.6	—	2.6
	対称 1	2.9	—	2.9	—	3.0	—	2.8
	" 2	3.7~4.5	—	4.6	—	3.8~4.2	—	—
E ロックフィルダム	1	1.9~2.2	6.5	2~2.1	4~6	2~2.2	—	1.92
	H=100m 2	2.7~2.9	—	2.7~2.9	—	3~3.2	—	3.01
	3	3.5	—	3.5~3.9	—	3.5	—	3.49
F 鉄骨コンクリートビルディング	EW 1	2.3~2.5	3	2.5	9.6	2.3~2.4	—	0.96
	" 2	3~3.1	—	5.2	—	2.8~3.2	—	2.43
	H=40m NS 1	1.9~2	—	—	—	—	—	—
G サージタンク	m=1, n=1	5.1	—	—	—	—	—	5.6
	" 2	3.2~3.7	4	—	—	—	—	3.5
H 貯油タンク	1	8.8	—	—	—	—	—	1.0
	H=10m							
I コンクリート道路橋(ハイダング式)	鉛直 1	1.2	2~3	1.1	—	—	—	1.08
	2	2.6	1~2	2.6	—	—	—	2.51
	L=220m 横 1	0.8	4~5	0.8	—	—	—	0.86
	2	2.1	—	2.3	—	—	—	—

以下に、測定した構造物に共通して云える結果について述べる。

① 構造物の常時微動から求めた固有振動数の値については、起振実験結果、地震観測結果からの値と比較、特に差異は認められなかった。

② 減衰定数については、最も大きく卓越した振動数について求め、いくつかの平均値として表わした。

常時微動から求めた値が、起振実験結果よりやや大きい。これは、常時微動から求めた方には、相互に接続した固有振動数の影響を受け合っている事と、解析理論において構造物への入力は白色ノイズと仮定されるが、実際には何らかの振動特性を持っている事が多く、その影響を受け合っている事のためと考えられる。

③ 振動モードについて、最も大きく卓越した振動数(固有)について求めると、図-4に示した様に起振実験結果と良好一致を示した。

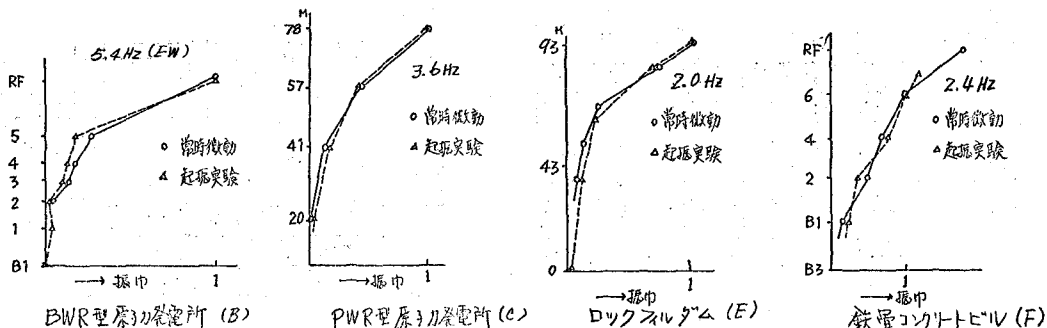


図-4 振動モードの比較

④ 構造物の常時微動に固有振動が卓越する場合、割当によって異なる場合もあるが、一般に、低次数の特定の固有振動数のみが大きく卓越する(例、アークダム、ロックフィルダム、原子力建屋(BWR型)では一次振動が

大きく卓越し、原状外周コンクリート、サージタンクの円筒形の構造物では、剪断一次振動 ($m=1, n=1$) よりも、オーバリング振動 ($m=1, n=2$) が卓越した。

⑤ 構造物の常時微動のパワースペクトルと、地震時の構造物の応答のパワースペクトルが非常に良く似ている場合がある。図-5に事例を示した。

⑥ 解析において理論的には構造物の入力と白色ノイズと仮定するが、実際の測定、解析において、厳密にはその必要はない。クレーンの走行停止時、発電機の停止作動時、自動車の走行停止時、等の振動源による力が構造物に作用したときの構造物の微動は、振動特性を捉える適切な情報を含んでいる事がある。このような振動源も場合によっては利用出来る。

⑦ 一斉、定常規則的な信号を発生する振動源、例えばタービン、エンジン、コンプレッサー、モーター発電機、トランス、等の振動源が、直接的に構造物に作用し、しかも大きなパワーを持っている時は、解析と困難にするので、出来るだけこのような様な振動のあるときは、避けて測定する事が望ましい。

⑧ 構造物への入力特性の全てを、把握する事は、不可能に近く、又、測定条件と白色ノイズ入力と考えられる様な状態にあく事もむずかしい。測定条件を出来るだけ明確にする事は基本的作業の一つであり、測定条件によって振動特性の検出の難易は大きく左右される。例えば、雑振動源はその振動数が数Hz以上にある場合が多く、大型構造物の低次数の固有振動は数Hz以下の振動数である事が多い。したがって、低次の固有振動数は比較的検出し易いが、高次の振動数は雑振動がある場合、その判別と分離が困難にする。

⑨ 卓越振動数(又は固有振動数)が、非常に近接して存在する場合、その分離がかなり困難であり、減衰定数を求める場合の誤差の原因の一つとなる。

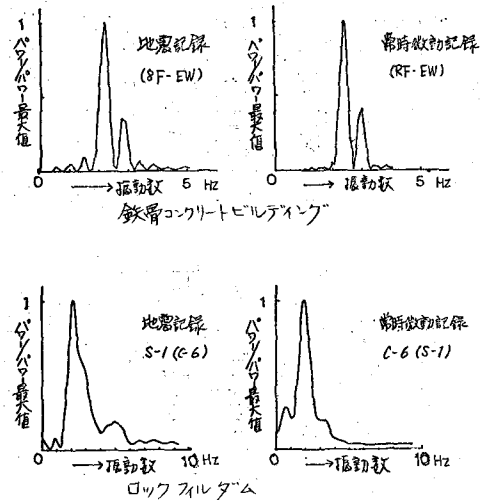


図-5 パワースペクトルの比較例

4. おおむね

いくつかの大型構造物について、その常時微動を計測し、動特性を求めて来たのであるが、構造物の常時微動には、その構造物の動特性に関する情報が、忠実に含まれている事が判り、測定、及び解析の精度、測定条件によっては、起振実験と同程度の精度で、これらの大型構造物の動特性を検出出来る可能性を示した。常時微動測定によって求めた値は、起振実験結果の値と近く、当初考えていた様な振動の振巾の大小による動特性の差異は、起振実験結果との比較において表われていた。

地震規則結果との比較においては、地震時の大型構造物の応答のパワースペクトルと、測定した構造物の常時微動のパワースペクトルが、非常に良く似ている場合がある(図-5)。構造物に作用した地震の規模は、あまり大きいものではないが、構造物の地震時の応答に関する情報も多分に含まれていると考えられる。詳しい検討はまたしているもので、どの程度までの情報が引き出せるかは、今後、事になるが、現在までに観測した地震応答記録とあって、卓越した固有振動数の値についてみると、常時微動から求めた値と大きな差はない。

以上で初期の目的は達せられ、構造物の動特性の把握にその構造物の常時微動を利用する事は、有効な手段の一つであり、特に低次数の固有振動数の検出に限れば、計測が容易である長、結果の精度から大きな利用性がある。