ASRが生じた鉄筋コンクリート構造物の実機試験 及びシミュレーション解析

高倉 正晴*1・日比野 浩*2・中村 敏治*3・光木 史朗*4・村角 保行*4

Keywords: alkali-silica reaction, elastic modulus, vibration test, microtremor observation, elastic wave, simulation analysis アルカリ骨材反応,弾性係数,振動試験,常時微動測定,弾性波,シミュレーション解析

1. はじめに

アルカリ骨材反応(以下「ASR」という)については、 数多くの研究がなされており、ASRが発生したコンクリ ート部材の力学特性は、軸方向筋の拘束等に影響される ^{例えば1)}ことが知られている。本検討は、ASRによる膨張 やひび割れが発生した伊方発電所1号機タービン架台に ついて、地震荷重に対する正確な安全裕度を把握する検 討の一環として、ASRが発生したコンクリート構造体と しての弾性係数を推定するために行ったものである。

本検討では、ASRが発生した1号機タービン架台について実機振動試験、弾性波測定試験及びシミュレーション解析を実施した。なお、構造及び形状が同じで、ASRの認められない2号機タービン架台についても比較対象として同様の試験・解析を実施した。

実機振動試験では、1号機と2号機タービン架台の固 有振動数、固有モード等を確認した。また、過去の試験 結果と比較してその経時変化を調べた。弾性係数測定試 験では、1号機と2号機のタービン架台の弾性波速度を 計測し、タービン架台各部位の物性の違いを調査した。 更に、振動試験から得られた固有振動数や固有モードに ついてのシミュレーション解析より、タービン架台の周 辺構造からの拘束状況やタービン架台の弾性係数を推定 した。

2. 実機振動試験

2.1 目的

1号機、2号機タービン架台の固有振動数及び振動モ

*1 設計本部特殊構造グループ

- *2 技術センター建築技術研究所防災研究室
- *3 技術センター建築技術開発部建築生産技術開発室
- *4 原子力本部原子力設計部

ードを確認することを目的として、定期点検期間中のタ ービン停止状態において実機振動試験を行った。過去に 1号機、2号機タービン架台で行われた実機振動試験の 経緯を表-1に示す。

		2号機		
実施回	実施回 1回目 2回目		3回目	1回目
実施時期	1986.1	1989.6	1993.2	1991.4
実施条件	定常運転時	停止時	定常運転時	停止時
目的	3号機・登録 3号機・登録 3号機・1,2号 2号保う1,2号架 2号架 2号架 2号架 2号架 2号架 2号架 2号架	振動特性の変 化からタービ ン架化を評価す る。	山側の振動量 が大きなな が大きを究明 あための 基 る ため の 入手	経時変化の初 期値を求め る。 1号機との比較 検討
実施内容	 定常運転時 の振動測定 	 ・ 常測起よ上加起振 ・ 振動動 にの向の定 	 定常運転時の振動測定 	 常時微動 測定

表-1 実機振動試験の経緯 Vibration tests performed after completion

2.2 起振機による梁の上下方向加振試験

2.2.1 試験方法

梁部材レベルの上下方向固有振動数及び振動モードを 把握するため、動電型起振機(最大加振力 4900N)のス ウィープ加振による梁の上下方向加振を行った。

1号機、2号機とも、加振及び測定は、テーブルデッキ上5箇所及び1階の梁上5箇所で行った。図-1 にその一例を示す。加振・測定対象振動数範囲は 1989 年の1号機試験結果を考慮して 5~128Hz とし、目標加振力は 880N とした。

振動計はケース毎に梁上の5点、基礎マット上(また は地下1階)の2点、起振機の振動子に設置し、加速度 成分を測定した。1号機の振動測定位置を図-2に示す。



図-1 起振機・振動測定位置 (1号機、テーブルデッキ上 2G2B 梁加振) Location of exciter and measurement points at unit No.1



注:2G1B等は梁名称を表す。

図-2 加振点及び振動測定位置(1号機) Location of exciter and measurement points at unit No.1

2.2.2 試験結果

各梁の加振時に測定した 7 点 (マットまたは B1 階の 2 箇所、梁上 5 箇所)の加振力に対する伝達関数を用い てモーダル解析を行い、固有振動数、減衰定数及びモー ドシェイプを求めた。モーダル解析によるカーブフィッ ティングの例として 2GA 梁の中央点における結果を図-3 に示す。固有振動数の選定にあたっては、伝達関数に おいて起振力に対する位相差が約 π/2 となる最小の振 動数であること及び梁中央の振幅が明らかなピークを示 し、梁全体がほぼ1次モードで振動していることを基本 条件とした。

試験により評価された固有振動数を過去の試験結果と 比較して表-2 に示す。また、モーダル解析により得ら れた各梁の振動モードの例を図-4 に示す。1号機梁の 固有振動数は、2号機に比べ0.88~0.95 倍の値であり、 平均的に 10%程度小さな値となっている。この低下の 中には、1号機のコンクリート比重が2号機に比べ5% 程度小さいことにより、質量及び剛性(コンクリート弾 性係数)が小さくなり、この両者の効果による3%程度 の固有振動数の減少が含まれている。また、2号機梁に 対する1号機梁の固有振動数比を部位毎に比較すると、 2G1B 梁や 2G2B 梁などのテーブルデッキ上の梁の方が、 1階梁に比べて大きな固有振動数低下となっている。



図-3 モーダル解析によるカーブフィッティングの例 (1号機 2GA 梁)

Curve fitting of transfer function on beam 2GA at unit No.1

表-2 モーダル解析による梁の固有振動数 Natural frequency of each beam from modal analysis

			(単位:HZ,括弧内は比率)			
REL	沥士白	办专向 沕夕		1 号機		
四	条刀问	朱石	1989年	2003年	2003年	
		2G1A	-	24.36	26.42	
				(0.92)	(1.00)	
		2G1B	-	28.00	31.87	
	X			(0.88)	(1.00)	
テーブル		2G2A	-	24.31	26.05	
デッキ				(0.93)	(1.00)	
		2G2B	30.08	28.59	32.20	
			(0.93)	(0.89)	(1.00)	
	Y	2GA	33.84	32.65	35.19	
			(0.96)	(0.93)	(1.00)	
	X -	1G1A	58.03	55.32	59.57	
			(0.97)	(0.93)	(1.00)	
		1G1B	39.63	37.70	41.34	
1 階			(0.96)	(0.91)	(1.00)	
		1G2A	49.11	48.93	53.51	
			(0.92)	(0.91)	(1.00)	
		1G2B	39.69	38.60	42.04	
			(0.94)	(0.92)	(1.00)	
	Υ	1GF	46.39	46.06	48.68	
			(0.95)	(0.95)	(1.00)	





1号機と2号機を構造上同等と考え、且つ2号機を健 全な状態と仮定すると、1号機梁の固有振動数低下は経 年変化や ASR によるものと考えられる。また、1階梁 よりもテーブルデッキ上梁の固有振動数の低下が大きい のは、ASR 発生の程度の差によるものと考えられる。

2.3 架台の常時微動測定

2.3.1 測定方法

架台全体のスウェイ、ロッキング振動の固有振動数及 び振動モードを把握するため、常時微動測定を行った。



図-5 微動測定位置(1号機、主要点) Measurement points of microtremor at unit No.1

1号機、2号機とも、1ケースにつき 12 点の同時測 定を計5ケース実施し、テーブルデッキ上の振動(3ケ ース)及び架台のスウェイ・ロッキング振動(2ケー ス)を把握した。比較的静穏となる 17 時以降に、各ケ ースとも 25 分間程度の連続同時測定を実施した。測定 は変位成分とした。振動測定位置を図-5 に示す。 2.3.2 測定結果

常時微動試験における最大変位分布を図-6 に示す。 同図によれば基礎マット、地下1階間の増幅は小さい一 方で、地下1階(EL.4.2m)以上の水平方向では上階ほど 振幅が大きくなる1次モード的な分布を示している。こ の傾向は1号機、2号機ともに同様であり、またX、Y 両方向に見られる。

タービン架台と周辺建屋とは1階及びテーブルデッキ レベルでエキスパンションジョイントにより分離され、 構造的に独立しているが、地下1階の床スラブは連続し、 更にその下部で、躯体コンクリートは一部接している状 態にある。このことから、常時微動レベルでは、 EL.4.2m で床スラブを介して周辺建屋からの拘束を受け ていることが示唆される。

基礎マット上の測定点を基準とした伝達関数を用いて モーダル解析を行い、固有振動数、減衰定数及びモード シェイプを求めた。モーダル解析により推定したタービ ン架台の固有振動数を過去の推定値と比較した結果を 表-3 に、振動モードの例を図-7 に示す。

2号機については、2003年時に対する1991年時の固 有振動数の比は、Y方向高圧タービン側を除けば、X、 Y両方向、発電機側・高圧タービン側で顕著な差は認め られない。全体的にみると、2号機の固有振動数にほと んど変化はないと見てよい。

2号機の2003年時を基準とすれば、1号機の各方向の振動数は0.81~0.95倍の値を示しており、Y方向高 圧タービン側の方が低下の度合いが大きい。振動数低下の要因としては、1号機と2号機が完全に同一ではなく、



図-6 最大変位分布の例(1号機、発電機側) Maximum displacement distribution on generator side at unit No.1

表-3 モーダル解析による架台の固有振動数 Natural frequency from modal analysis

	(単位:Hz, 括弧内は比率)						
	測定	測定位置	1 号機		2 号機		
	方向		1989年	2003年	1991年	2003年	
	x	発電機側	5.45 (0.93)	5.26 (0.90)	5.71 (0.98)	5.83 (1.00)	
		高圧タービン側	5.28 (0.91)	5.47 (0.94)	5.71 (0.98)	5.83 (1.00)	
	Y	発電機側	7.11 (0.88)	7.61 (0.95)	8.14 (1.01)	8.05 (1.00)	
		高圧タービン側	7.95 (0.81)	8.65 (0.89)	8.86 (0.91)	9.77	



注) 本図(2)に示す Y 方向のモードシェイプは、架台全体で評価した場合の伝達 関数へのフィッティングが良くなかったために、高圧タービン側の計測点 のみを用いて再評価した結果である。ただし、振動数は架台全体で評価し た値を用いた。

図-7 タービン架台のモードシェイプの例(1号機) Mode shapes on natural frequencies

コンクリート比重、設備機器の配置、最下層壁の開口の 有無(2号機無しに対し1号機有り)等に違いがあるこ とが挙げられる。コンクリート比重の違いのみを考えて も、2号機に対し1号機は3%程度振動数が小さいもの と考えられ、ASR の影響等による1号機の固有振動数 の低下は、2.5~8.5%程度であるものと推定できる。

図-7 に示す、固有振動数における架台の水平方向振 動モードにおいても、最大変位分布の場合と同様に EL.4.2mにおける拘束の影響が認められる。

2.4 実機振動試験のまとめ

実機振動試験による1号機の固有振動数は2号機に比 ベ10%弱の低下を示しているものの、コンクリート比 重の違いによる影響を考慮すると、1号機の経時変化や ASR による影響がタービン架台全体の振動特性に与え る影響は小さなものに留まっていると考えられる。また、 1989 年から 2004 年までの 14 年間における固有振動数 の低下は小さく、これらの結果より推測すれば経年変化 や ASR の進行は今後ほとんどないものと考えられる。

3. 弾性係数測定試験

3.1 目的

1号機及び2号機タービン架台のコンクリートの物性 及びその分布を調べるために、架台の各部位で弾性波速 度測定を実施した。また、測定の際に採取したコンクリ ートコアの表面状態の観察を行った。

3.2 測定方法

測定は、以下の検層法と透過法の2種類の方法で行った。測定概念図を図-8に示す。

- 検層法:架台コンクリートにφ65mmのボーリング孔を 設け、その孔内に受振器を固定し、孔口表面で 弾性波を発生させ、その伝播速度を算定した。
- 透過法:タービン架台の柱または梁の前面で弾性波を発 生させ、部材を挟んだ背面に設置した加速度セ ンサーでこれを受振して、透過時間とコンクリ ート厚さから弾性波速度を算出した。





3.3 測定位置

2号機では5箇所で弾性波速度測定(検層法、透過法)を実施した。1号機では、5箇所(No.1-No.5)で 検層法及び透過法による弾性波速度測定を、7箇所 (No.6-No.12)で透過法による弾性波速度測定を実施した。図-9に1号機の測定位置を示す。



図-9 測定位置(1号機) Measurement points at unit No.1

3.4 弾性係数の算定結果

図-10 に1号機の各位置での弾性係数の算定結果を2 号機の結果と併せて示す。検層法の No.2~No.4 におい ては、1号機及び2号機の弾性係数は概ね近い値となっ ている。透過法についても、No.2~4 及び No.7~12 の 弾性係数は、概ね1号機と2号機で近い値となっている。 しかし、検層法の No.1、透過法の No.1 及び No.6、のテ ーブルデッキ部では、1号機の結果は他の部位に比べて 小さい値となっている。

3.5 採取したコンクリートコアの観察結果

No.1~No.5 において、採取したコンクリートコアの 表面状態の観察を行った結果を以下に示す。

- ・No.1のコア表面にゲル状の物質が観察された。他の コアについては認められない。
- ・コア切断面で骨材の観察分類を行った結果を図-11 に 示す。No.1~No.5 の全てのコアで反応の兆候が観察さ れたが、その割合は No.1 について顕著であり、テー ブルデッキより下部で採取したコアほど骨材の損傷劣 化の割合は小さいものとなっている。

3.6 弾性波速度測定のまとめ

1号機と2号機で実施した弾性波速度測定結果及び採取コア切断面での骨材観察結果より、1号機の弾性係数は、テーブルデッキにおいて低下が顕著であり、下部は さほど低下はしていないものと推定される。



図-10 弾性係数の算定結果 Evaluation results of elastic modulus

観察分類

タイプ1:変化なし(特に変状が認められないもの) タイプ2:反応リムあり(骨材周縁部が黒くなっているもの) タイプ3:ひび割れあり タイプ4:反応リム、ひび割れともにあり(タイプ2+タイプ3) タイプ1 タイプ2 タイプ2 タイプ2



(a) 観察分類



(c) 躯体表面部のコアの観察結果

図-11 採取コアの観察結果 Observation results of core

4. 振動試験のシミュレーション解析

4.1 目的

シミュレーション解析により、振動試験結果を適切に 表現できるタービン架台の弾性係数を推定した。

4.2 解析モデル

シミュレーション解析では、ねじれ等の3次元的な挙動を評価する必要があることから、3次元 FEM モデル を用いる。モデル化の範囲は、EL.-1.5m(基礎上端)~ EL.17.2m(テーブルデッキ上端)とし、タービン架台を 構成する柱、梁、壁、床について、ビーム要素又はシェ ル要素でモデル化した。

柱及び梁は、振動計測点等を考慮し、基準レベル及び 通り芯間を数分割した。上記の方針に基づき設定した解 析モデルを図-12に示す。



鉄筋コンクリートの物性値は、弾性係数を除き以下の 通りとする。鉄筋コンクリートの単位体積重量について は、弾性係数測定試験に伴い採取したコンクリートコア の密度から設定した。

ポアソン比:0.2

鉄筋コンクリートの単位体積重量:

23.1 kN/m³(1 号機)、24.4 kN/m³(2 号機)

4.3 EL.4.2mでのタービン建屋からの拘束の影響

EL.4.2m 以下において、タービン架台とタービン建屋 の躯体コンクリートは接している状態にあり、常時微動 計測のモーダル解析結果では、EL.4.2m で変形が拘束さ れたモード形が得られている。そこで、EL.4.2m 位置で のタービン建屋からの拘束の程度を把握するため、図-13 に示すように拘束無、ばね支持(ばね剛性は周辺部 の主要な構造部材と考えられる基礎梁から算定)、水平 方向ピン支持の場合について解析を行い、振動試験の結 果を最もよく評価できる境界条件について検討した。な お、この検討は、健全な2号機タービン架台について行 った。



各境界条件での固有値解析結果を表-4 に示す。表中 の推定弾性係数は、振動試験による固有振動数に一致さ せた場合の弾性係数を示す。また、1 次の固有モード (X 方向モード)について、タービン架台両端部(発電 機側、高圧タービン側)の縦系列の変形分布(モーダル 解析結果のテーブルデッキ部の値で正規化して表示)を 詳細に比較したものを図-14 に示す。

解析結果から、以下のことが分かる。

・ 拘束無の場合の推定弾性係数は、かなり大きい値となる。

表-4 固有値解析結果 Results of eigenvalue analysis

拘束 条件	拘束無		ばね支持		ピン支持	
次数	固有 振動数 (Hz)	推定 弾性係数 (N/mm ²)	固有 振動数 (Hz)	推定 弾性係数 (N/mm ²)	固有 振動数 (Hz)	推定 弾性係数 (N/mm ²)
1	3.86	5.17E+04	5.30	2.75E+04	5.94	2.19E+04
2	5.58	4.72E+04	7.44	2.66E+04	8.16	2.21E+04
3	7.07	4.33E+04	8.65	2.89E+04	9.68	2.31E+04

参考) 振動試験の結果:1次5.83Hz、2次8.05Hz、3次9.77Hz



・拘束無の場合のモード形は、柱脚部からテーブルデッキまで連続的に変形するモードであり、常時微動計測の結果とは異なっている。ばね支持とピン支持では、比較的ばね支持のケースが振動計測の結果に近い。以上より、EL.4.2mの境界条件として、ばね支持を用

いてシミュレーション解析を行うこととした。

4.4 振動試験のシミュレーション解析

4.4.1 梁の上下方向加振試験のシミュレーション解析 起振機の設置位置に加振力を作用させる定常加振解析 を行い、モーダル解析により推定された固有振動数、振 動モード、梁中央点の伝達関数との一致の程度から弾性 係数を算定した。

2号機タービン架台については、弾性係数は架台全体 で一律の値を与え、各梁に対して個別に算定した。

弾性係数測定試験から、1号機において EL.17.2mの テーブルデッキ部で弾性係数の低下が顕著であるという 結果が得られている。従って、1号機タービン架台につ いては、図-15 に示すようにテーブルデッキを ASR が 発生している部材(以後、ASR 部材と呼ぶ)とする。 弾性係数を算定するにあたり、健全部材に対する ASR 部材の弾性係数比(ASR 部材/健全部材)を 0.5

(CASE1)、0.8 (CASE2)、1.0 (CASE3) に固定して、 健全部材及び ASR 部材の弾性係数を算定した。なお、 弾性係数比 0.5 及び 0.8 は既往の文献 ^{1)~3)}を参考に設定 したものである。



図-15 ASR 部材の想定 Assumption of members with ASR

振動試験結果のモーダル解析により推定した梁の固有 振動数に一致するように、弾性係数を調整したモデルの 定常加振解析結果の一例(1号機タービン架台、 CASE1、2G1A梁)を図-16に示す。

50Hz 程度までの振動数域では、一致させた固有振動 数以外でもピークの位置に関して、計測値と解析値は概 ね一致している。推定した弾性係数を「4.4.2」の結果と 併せて図-17 に示す。



図-16 加振力に対する伝達関数の比較(2G1A梁、CASE1) Comparison of transfer functions (beam 2G1A、CASE1)

4.4.2 常時微動計測のシミュレーション解析

固有値解析を行い、モーダル解析により算定された固 有振動数、振動モードとの一致の程度から弾性係数を算 定した。なお、2号機タービン架台については、弾性係 数は架台全体で一律の値を与えた。1号機タービン架台 については、梁の上下方向加振試験に対するシミュレー ション解析と同じケースについて検討した。

振動試験結果のモーダル解析による固有振動数に一致 するように、弾性係数を調整したモデルの振動モードの うち、CASE1の1次モードを代表例として表-4に示す。 なお、常時微動計測のモーダル解析では別々に記録され た3ブロックの記録を同時に記録されたものとして処理 しているが、1号機では良好なカーブフィッティングが 得られていない。従って、ここではテーブルデッキ部の 動きに着目して一致の程度を判断した。

振動モードの形状は、振動計測結果と解析結果は、概 ね対応した結果となっている。算定した弾性係数を 「4.4.1」の結果と併せて図-17に示す。



表-5 モード形の比較(1次モード、CASE1) Comparison of mode shapes (1st mode、CASE1)



4.5 シミュレーション解析のまとめ

1号機と2号機タービン架台の算定した弾性係数の全 平均値について、ASR 部材と健全部材の弾性係数比と 1号機(健全部材及び ASR 部材)の2号機に対する弾 性係数の比の関係を図-18に示す。

採取されたコンクリートコアの単位体積重量等を用い て RC 規準式(5条)により弾性係数を算定すると、2 号機に対する1号機の弾性係数比(健全部材)は0.9 と なる。この関係を図-18 に当てはめた場合、ASR 部材と 健全部材の比は0.5~0.6 程度と推定される。



図-18 1 号機の算定した弾性係数結果のまとめ Summary of Elastic modulus estimated by parametric study at unit No.1

5. まとめ

1号機と2号機タービン架台について、実機振動試験、 弾性係数測定試験及びシミュレーション解析を実施し、 以下のような知見が得られた。

【実機振動試験】

- ・最大変位分布及び固有振動数における架台の水平方向 振動モードにおいて、EL.4.2mにおけるタービン建屋 からの拘束の影響が認められる。
- ・振動試験による1号機タービン架台の固有振動数は健 全である2号機に比較して10%程度の低下がみられ たが、コンクリートの比重の違いを考慮すると、1号 機の経時変化やASRによる影響がタービン架台全体 に与える影響は小さいものに収まっている。また、前 回計測した1989年からの固有振動数の低下は小さく、 ASRの進行はほとんどないものと考えられる。

【弾性係数測定試験】

1号機と2号機のタービン架台の弾性係数を比較する
 と、1号機テーブルデッキにおいて、弾性係数の低下
 が顕著であり、テーブルデッキより下部はさほど低下
 していないことが確認された。

【実機振動試験のシミュレーション解析】

- ・EL.4.2mの拘束条件として拘束無、ばね支持、ピン支 持をパラメーターとしてシミュレーション解析を行っ た結果、ばね支持とした結果が振動試験結果と比較的 合うことが分かった。
- ・EL.4.2mをばね支持としたシミュレーション解析から 1号機の弾性係数について検討した結果、ASR 部材 と健全部材の弾性係数比は 0.5~0.6 程度と推定された。

なお、本検討は四国電力株式会社殿により設置された 「ASR 鉄筋コンクリート構造物の強度評価方法検討会」 (委員長:瀧口克己東京工業大学教授、委員:桝田佳寛 宇都宮大学教授、西口磯春神奈川工科大学教授)のもと で、四国電力株式会社殿、三菱重工業株式会社殿、大成 建設株式会社が実施した検討の一部である。

参考文献

- 1) 小柳洽, 内田裕市等:低鉄筋比のRC部材におけるASRの膨 張拘束に関する研究, セメントコンクリート論文集, No.52, pp.786-791, 1998.
- 2) 矢村潔,長井吾朗等:ASR による損傷に及ぼす鉄筋拘束の 影響に関する研究,材料, Vol.43, No.491, pp.970-975, 1994.
- 3) 棚橋和夫, 岩永武士等: ASRによって劣化したRCはりおよび柱の力学挙動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.1, pp.843-848, 1996.