

論文 アルカリ骨材反応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}・渡部 雄一^{*2}・細川 高志^{*3}・日比野 浩^{*4}

要旨：アルカリ骨材反応（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、地震荷重に対する安全裕度を把握するための検討の一環として、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、過去に実施した試験結果と比較しながら、コンクリート構造体としての弾性係数を検討した。その結果、架台上部での弾性係数の低下は顕著であるが、1989年以降の低下は小さいことが分かった。

キーワード：アルカリ骨材反応，弾性係数，振動試験，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（1975年打設完了）について、地震荷重に対する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（梁の上下方向加振試験、架台の常時微動測定）、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、構造及び形状がほぼ同じで、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。

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、振動モードを確認する目的で、実機振動試験を

実施した。又、過去の振動試験の結果と比較し、その経時変化を調べた。

2.2 起振機による梁の上下方向加振試験

(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）のスイープ加振による梁の上下方向加振を行った。

1号機、2号機共、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。各梁の加振では、振動

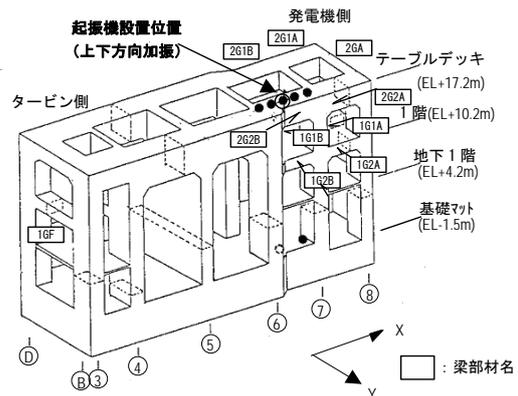


図-1 起振機・振動測定位置
(1号機, テーブルデッキ上 2G2B 梁加振)

*1 大成建設（株） 設計本部特殊構造グループ シニアエンジニア 工修（正会員）

*2 四国電力（株） 土木建築部建築技術グループリーダー

*3 四国電力（株） 土木建築部建築技術グループ 副長 工修

*4 大成建設（株） 技術センター技術企画部企画室 課長 工修

計は梁上の5点，基礎マット上の2点，起振機の振動子に設置し，加速度成分を測定した。

(2) 試験結果

各梁の加振時に測定した7点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-2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 $\pi/2$ となる最小の振動数であること及び梁全体がほぼ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-1に示す。1号機梁の固

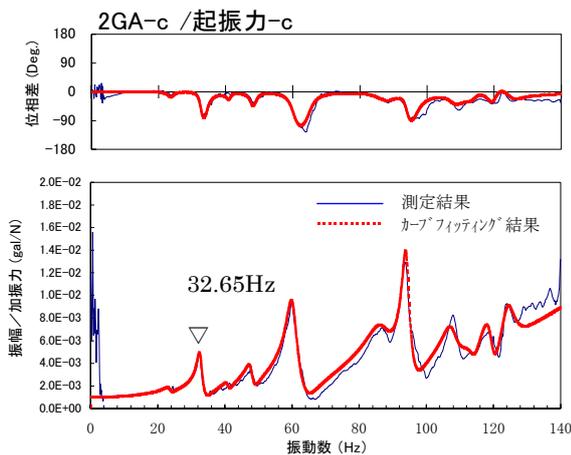


図-2 モーダル解析によるカーブフィッティングの例（1号機2GA梁）

表-1 モーダル解析による梁の固有振動数
(単位：Hz，括弧内は比率)

階	梁方向	梁名	1号機		2号機
			1989年	2003年	2003年
テーブルデッキ	X	2G1A	-	24.36 (0.92)	26.42 (1.00)
		2G1B	-	28.00 (0.88)	31.87 (1.00)
		2G2A	-	24.31 (0.93)	26.05 (1.00)
		2G2B	30.08 (0.93)	28.59 (0.89)	32.20 (1.00)
	Y	2GA	33.84 (0.96)	32.65 (0.93)	35.19 (1.00)
1階	X	1G1A	58.03 (0.97)	55.32 (0.93)	59.57 (1.00)
		1G1B	39.63 (0.96)	37.70 (0.91)	41.34 (1.00)
		1G2A	49.11 (0.92)	48.93 (0.91)	53.51 (1.00)
		1G2B	39.69 (0.94)	38.60 (0.92)	42.04 (1.00)
	Y	1GF	46.39 (0.95)	46.06 (0.95)	48.68 (1.00)

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%程度の小さな値となっている。1号機と2号機では，コンクリートの比重に5%程度の違いあることが分かっている。1号機と2号機の形状が全く同じとした場合，質量とRC規準（5条）により算定されるコンクリートの弾性係数の関係を1質点系の固有振動数の算定式に代入した場合，1号機の固有振動数は2号機に比べ3%程度小さくなり，10%の中にその影響も含まれていると考えられる。

また，1989年から2003年までの14年間における固有振動数の低下は小さいものとなっている。

2.3 架台の常時微動測定

(1) 測定方法

架台全体のスウェイ，ロッキングによる水平方向の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。

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及び架台のスウェイ・ロッキング振動を把握した。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。主要な振動測定位置を図-3に示す。

(2) 測定結果

常時微動試験における最大変位分布を図-4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が，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

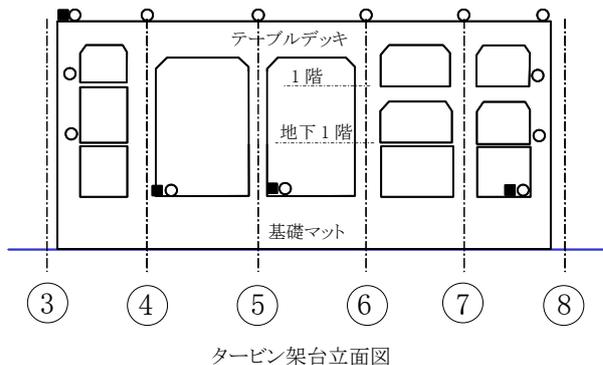


図-3 微動測定位置（1号機，主要点）

見られる。このことから、常時微動レベルでは、タービン架台と周辺建屋間で連続している EL.4.2m の床スラブ等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-2 に、振動モードの例を図-5 に示す。

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。梁の上下方向加振で記載したように、コンクリート比重の違いによる影響を3%程度

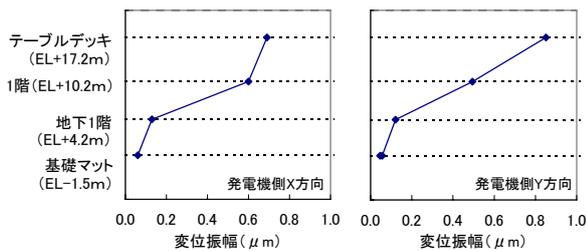
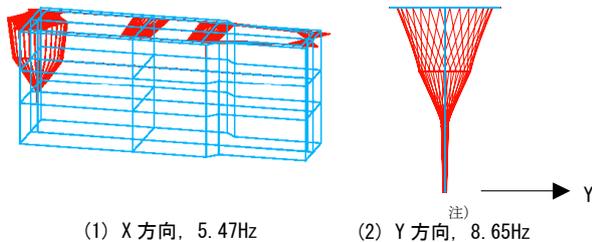


図-4 最大変位分布の例（1号機，発電機側）

表-2 モーダル解析による架台の固有振動数

(単位：Hz, 括弧内は比率)

測定方向	測定位置	1号機		2号機	
		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 (1.00)



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-5 モーダル解析による架台の固有振動数

とすれば、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-5 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。

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 測定方法及び測定位置

測定は、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-6 に示す。

2号機では5箇所検層法及び透過法により実施した。1号機では、5箇所(No.1-No.5)で検層法及び透過法により、7箇所(No.6-No.12)で透過法により実施した。図-7(a)に1号機の測定位置を示す。

3.3 弾性係数の算定結果

図-7(b)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

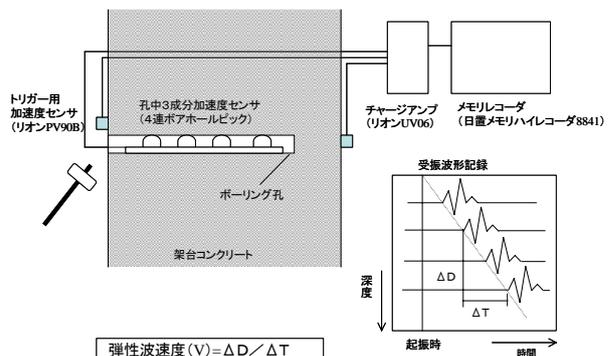


図-6 弾性波速度測定概念図

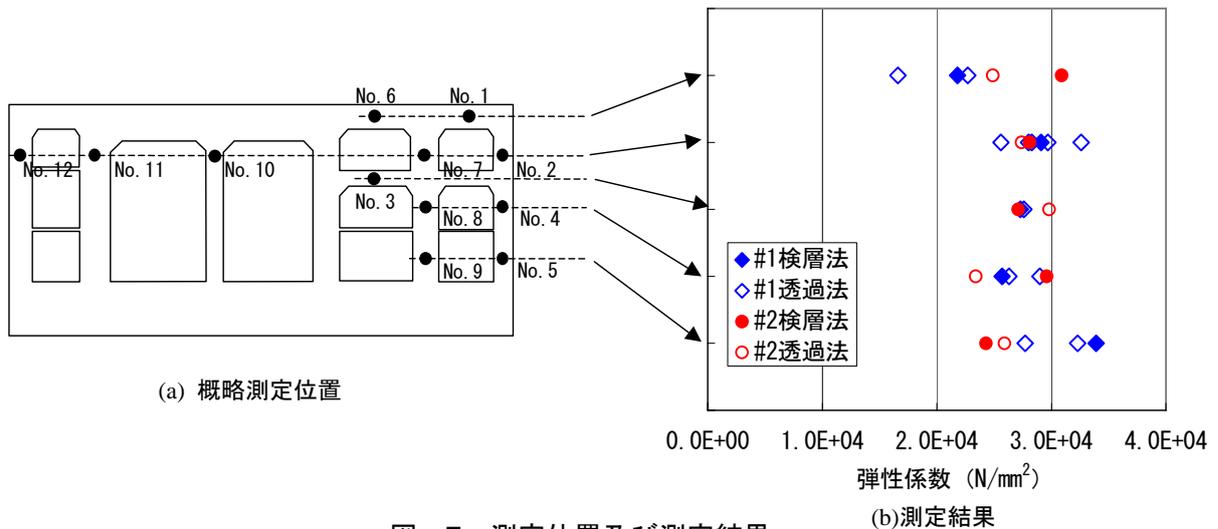


図-7 測定位置及び測定結果

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。

3.4 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、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。

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である基礎梁の剛性から算定）、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のうち、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

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を構成するコンクリート部材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は、3次元 FEM モデルを用いて行った。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。解析モデルを図-8 に示す。

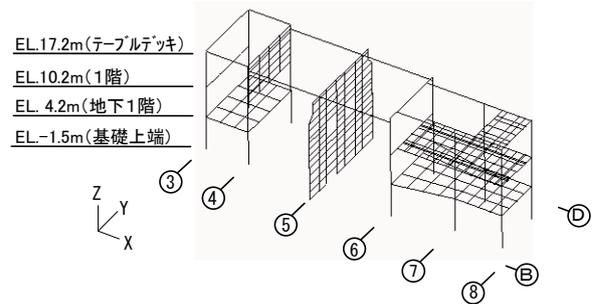


図-8 解析モデル（1号機）

4.3 EL.4.2m における拘束の影響

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、図-5 に示す常時微動計測の結果から 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-9 に示す

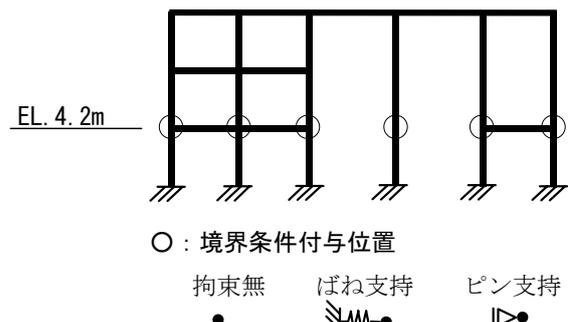
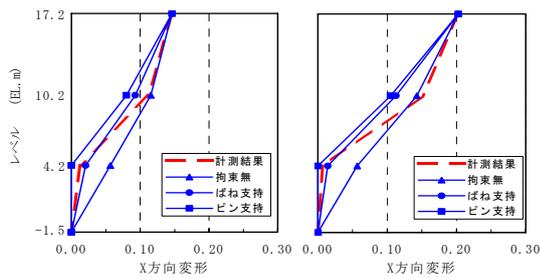


図-9 検討した境界条件



(a) 発電機側 (b) 高圧タービン側
図-10 変形モードの比較

較したものを図-10に示す。解析結果から、比較的振動計測の結果に近い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

(1) 梁の加振試験のシミュレーション解析

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、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ため、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。

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解析結果の一例（1号機タービン架台、CASE1、2G2B梁）を図-11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に関しては、計測値と解析値は概ね一致している。しかし、50Hz以上では対応がとれておらず、このモデルの評価限界と考えられる。推定した弾性係数を次項の(2)の結果と併せて図-13に示す。

(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、弾性係数は前項の(1)と同じ扱いとした。

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図-12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前項の(1)の結果と併せて図-13に示す。

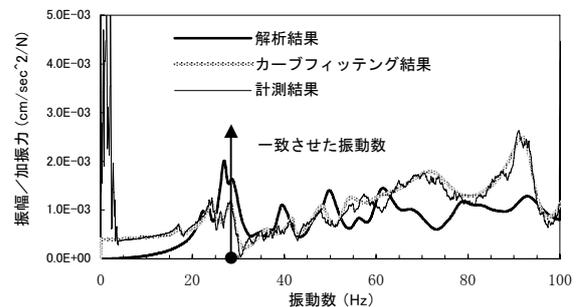


図-11 加振力に対する伝達関数の比較 (2G2B梁, CASE1)

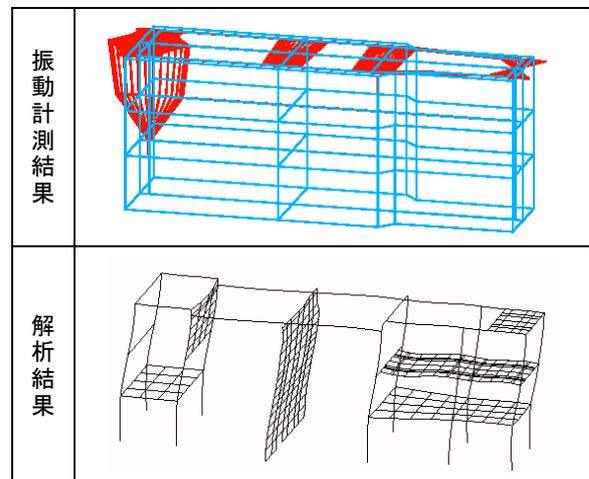


図-12 モード形の比較（1次モード、CASE1）

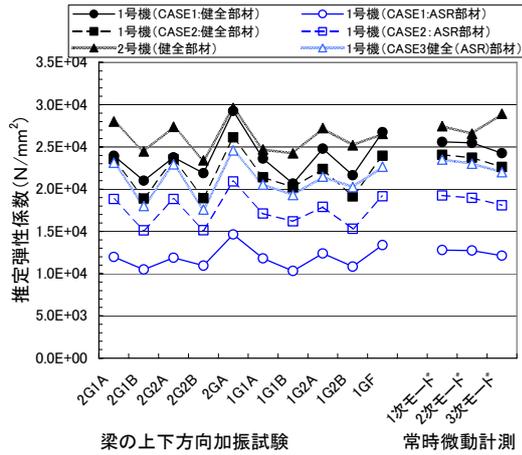


図-13 算定した弾性係数

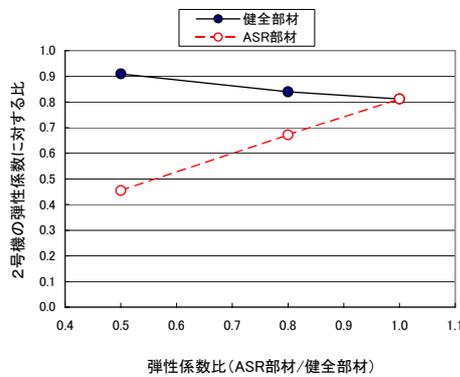


図-14 算定した弾性係数のまとめ

(3)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-14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-14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。なお、シミュレーション解析から求められた弾性係数は3章の弾性係数測定試験の結果に比べ小さめの値を示している。

5. まとめ

1号機と2号機タービン架台について各種試験及び解析を行い、以下のような知見が得られた。

【実機振動試験】

- タービン架台の振動モードにおいて、EL.4.2mにおいて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号機に比較して低下がみられたが、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る。

【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。

本検討は四国電力(株)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:梶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)、三菱重工業(株)、大成建設(株)が実施した検討の一部である。

参考文献

- 小柳洽, 内田裕市ほか: 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.
- 矢村潔, 長井吾朗ほか: 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.
- 棚橋和夫, 岩永武士ほか: 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.