

論文 アルカリ骨材反応を生じたタービン発電機架台の経年変化について

谷口 幸秀*1・小川 浄*2・川江 宏*3・高木 正二*4

要旨:アルカリ骨材反応による膨張やひび割れが発生した伊方発電所1号機タービン発電機架台については、これまで構造の安定性を確認するため、膨張量や弾性係数などを把握し解析を行い、2005年までに報告してきた。その後、アルカリ骨材反応が収束した後も、構造物の監視を続けながらタービン発電機の運転を継続してきた。アルカリ骨材反応が確認された構造物について長期監視の事例が極めて少ないことから、本論文は、アルカリ骨材反応が生じた構造物の経年変化を計測管理しながら継続使用する維持管理の実例として示すものである。

キーワード:アルカリ骨材反応, タービン発電機架台, 経年変化, 維持管理

1. 概要

1977年に営業運転を開始した伊方発電所1号機のタービンと発電機を支持する鉄筋コンクリート製のタービン発電機架台（以下「TG架台」という）においては、運転開始の数年後から変形やひび割れが認められはじめた。

また、実構造物からの採取コアによる試験調査等の結果、1987年頃、TG架台上部のテーブルデッキ部における変形やひび割れが顕著であり、原因はアルカリ骨材反応（以下「ASR」という）の顕在化であると判断した。

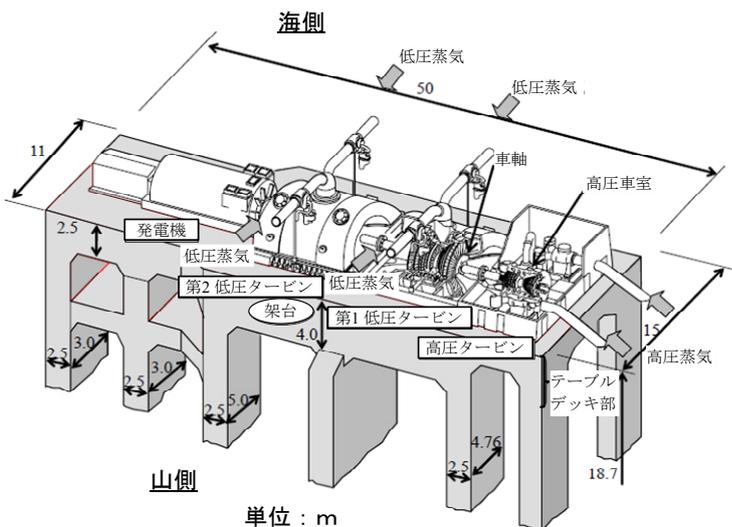
その後、試験調査や構造解析による評価を行いながら状態監視を継続し、2002年頃にはASRは収束状態にあると判断した^{1),2),3),4)}。また、ASRが確認された構造物について長期監視の事例が極めて少ないなか、反応が収束した後も、各種の計測調査および必要に応じた補修等の構造物の監視を続けながらタービン発電機の運転を継続し、現在に至っている。

2004年までのTG架台軸方向伸びや鉄筋ひずみの計測調査結果により、TG架台のASRの収束状態が継続していることを既に報告³⁾している。本論文では、2011年の運転停止を経て現在まで実施した各種の計測調査結果より、現在のTG架台の状態について検討・考察した。

TG架台の軸受け部に軸方向隙間の変化が認められた後に1981年以降順次、膨張等の状態を継続的に把握するために実施している主な計測項目を表-1に示す。

表-1 主な計測項目一覧

計測項目	計測開始年	計測箇所数
テーブルデッキの軸方向伸び	1982	20箇所
コンクリート内部温度	1986	7箇所
柱傾斜	2008	4箇所
鉄筋ひずみ(柱梁主筋)	1986	9箇所
梁せいひずみ	1996	2箇所
梁せい変位	2003	2箇所
反発硬度	2008	5箇所



- 規模**
- ・長さ : 50.0m
 - ・幅 (タービン側) : 15.0m
 - ・幅 (発電機側) : 11.0m
 - ・高さ (基礎マット上端から) : 18.7m
- 鉄筋**
- ・異型鉄筋 SD345 (旧SD35)
- コンクリート**
- ・設計基準強度 : 20.6N/mm² (210kg/cm²)
 - ・セメント : 中庸熱ホトランド[®]
 - ・細骨材 : 洗砂 愛媛県今治市蒼社川沖
 - ・粗骨材 : 砕石 山口県柳井産 安山岩⁵⁾

図-1 タービン架台 (TG 架台) の概念図

*1 四国電力(株) 原子力本部 伊方発電所 土木建築部 土木建築課 (正会員)
 *2 四国電力(株) 原子力本部 伊方発電所 土木建築部 土木建築課 課長 工修
 *3 四国電力(株) 土木建築部 建設計画グループ 副リーダー
 *4 四国電力(株) 原子力本部 伊方発電所 保修部 機械計画第二課 副長

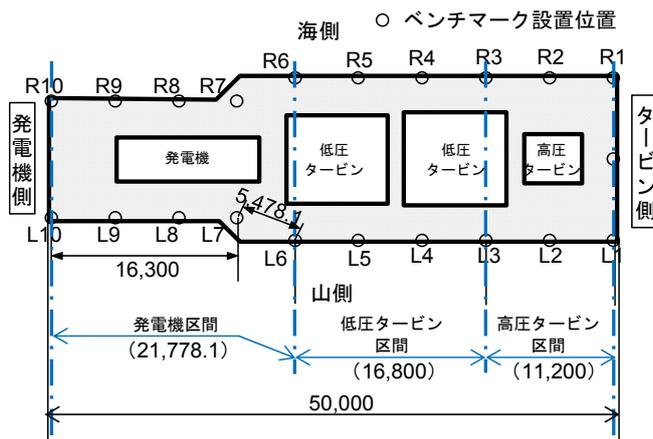
2. テーブルデッキの軸方向の変形傾向

2.1 ベンチマーク間距離

TG 架台テーブルデッキの軸方向伸び計測用のベンチマーク位置を図-2に示す。ベンチマークは、テーブルデッキ上端に海側/山側それぞれ10箇所設置されており、1982年よりベンチマーク間距離を計測し、その合計値をテーブルデッキ軸方向伸びとして管理している。

1982年12月(第5回定期検査時)を初期値とした2014年までのテーブルデッキ軸方向伸びの推移を図-3に示す。テーブルデッキ軸方向伸びは計測当初(1980年代前半)は増加が顕著であったが、その後は鈍化し、1991年頃以降はほぼ一定で推移し、2007年頃以降は、海側・山側とも漸減傾向となっている。

また、2011年の運転停止以降は、減少が顕著である。これは、運転停止に伴い、コンクリートの伸びに影響する要因の一つであるタービンへの蒸気配管内の発熱がなくなり、気温による影響のみになったためと考えられる。



() は、各区間のベンチマーク間の設定距離を示す。単位(mm)

図-2 ベンチマーク位置と各区間のベンチマーク間の設定距離

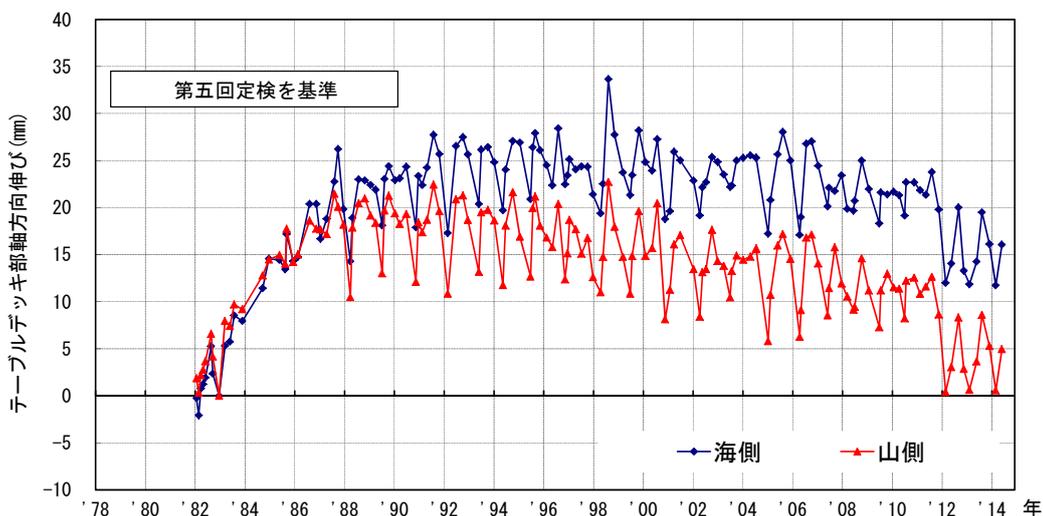


図-3 テーブルデッキ軸方向伸び

高圧タービン、低圧タービン、発電機の各区間におけるベンチマーク間距離の単位伸び量の推移を図-4に示す。単位伸び量は、各区間における伸び量の合計値を図-2に示す各区間のベンチマーク間の設定距離で除した値である。

3区間の単位伸び量は、高圧タービン区間の海側(0.5~0.75mm/m)が最も大きく、発電機区間の海側および山側(約0.5mm/m)、低圧タービン区間の海側(0.25~0.5mm/m)、高圧および低圧タービン区間の山側(0~0.25mm/m)の順で小さくなる。また、海側と山側の単位伸び量の差は、高圧タービン区間が顕著である。

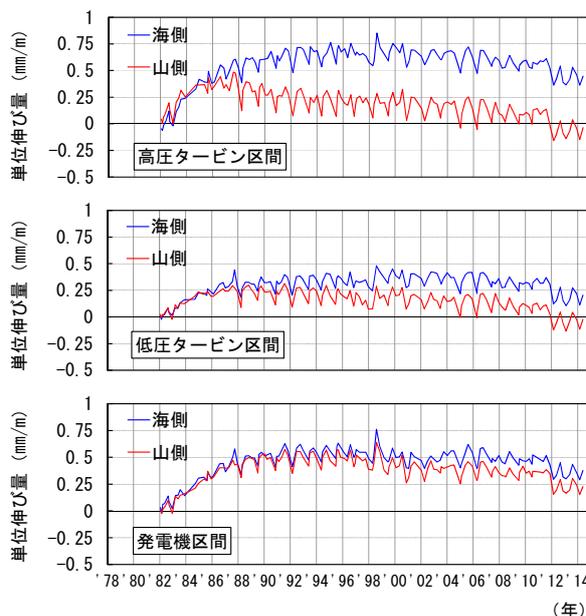


図-4 ベンチマーク間距離の単位伸び量

また、コンクリート内部温度の計測位置を図-5、同温度の設備区間毎の推移を図-6に示す。

海側は、3区間とも概ね20~40℃の範囲で推移し、山側は、高圧タービン区間（最高温度約50℃）が最も高く、低圧タービン区間（同約45℃）、発電機区間（同約40℃）の順に低くなる。山側のコンクリート内部温度が海側に比べ高い要因として、TG架台周辺の床開口が、山側は海側に比べ小さく、発電に伴う熱せられた空気が溜まりやすいことが考えられる。

ベンチマーク間距離の単位伸び量（図-4）とコンクリート内部温度（図-6）の関係を見ると、コンクリート内部温度が低い海側（3区間とも最高温度約40℃）において単位伸び量が大きく、山側においては、コンクリート内部温度が低い発電機区間（最高温度約40℃）の単位伸び量が最も大きい。このことから、TG架台においては、40℃付近にASRの反応を促進する温度範囲があったと考えられる。

更に、運転停止以降のテーブルデッキ軸方向の収縮量（海側7.9mm、山側8.3mm）については、コンクリート内部温度の低下による影響が大きい（表-2）。内部温度低下によるASR収束の状態変化はほとんどないものと考えられる。

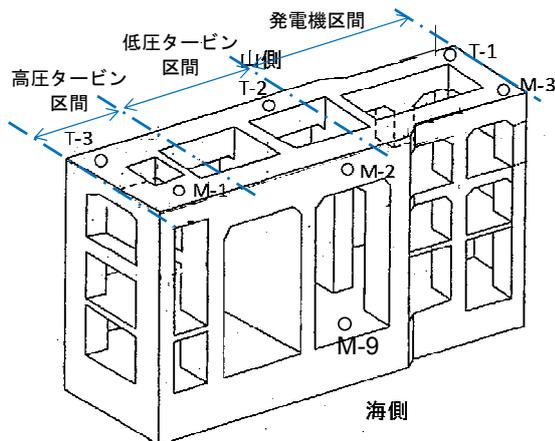


図-5 コンクリート内部温度計測箇所

2.2 柱傾斜

TG架台のコーナー部4箇所において、テーブルデッキ位置と柱脚位置（高低差約11m）の変位量の差を下げ振りにより2008年より計測している。TG架台の柱傾斜計測位置と計測開始時の変位量を図-7に示す。

計測位置4箇所のテーブルデッキ軸方向の変位量および海側・山側の変位量合計値の推移を図-8に示す。運転停止（2011年）までの変位量は、山側（B+D）は56~62mm、海側（A+C）は50~56mmであり、気温と連動しているが、年単位の变化は微少である。また、運転停止以降は、コンクリート内部温度の低下に伴い、変位量は減少している。

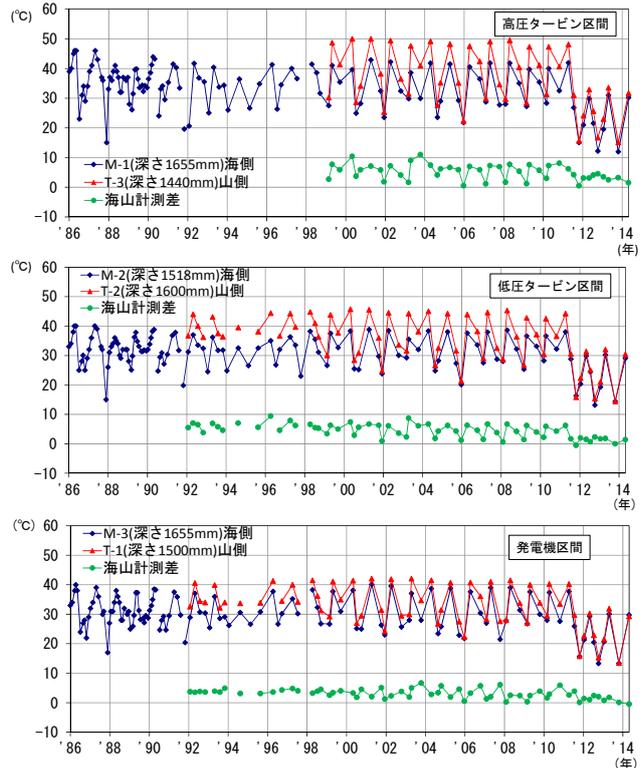


図-6 コンクリート内部温度計測値

表-2 コンクリート内部温度の低下による収縮量

区間	ベンチマーク間の設定距離(mm)	停止以降の軸方向の収縮量(mm)	停止以降のコンクリート内部温度低下(°C)	収縮量(mm) (温度低下による計算値)	
海側	高圧タービン	11,200.0	1.9	16.3	1.8
	低圧タービン	16,800.0	2.7	14.0	2.3
	発電機	21,778.1	3.3	13.3	2.9
	計	-	7.9	-	7.0
山側	高圧タービン	11,200.0	2.0	17.6	2.0
	低圧タービン	16,800.0	2.7	16.0	2.7
	発電機	21,778.1	3.6	15.2	3.3
	計	-	8.3	-	8.0

停止以降の軸方向の収縮量、コンクリート内部温度低下は、運転停止前後各3カ年の年間最低値の平均値の差を示す。

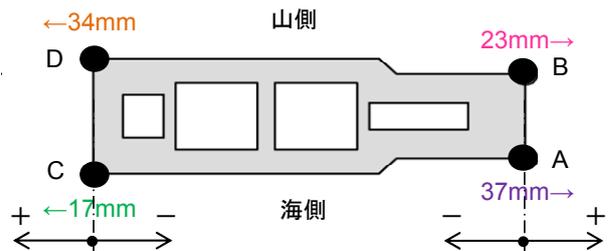


図-7 柱傾斜計測箇所と計測開始時の変位量

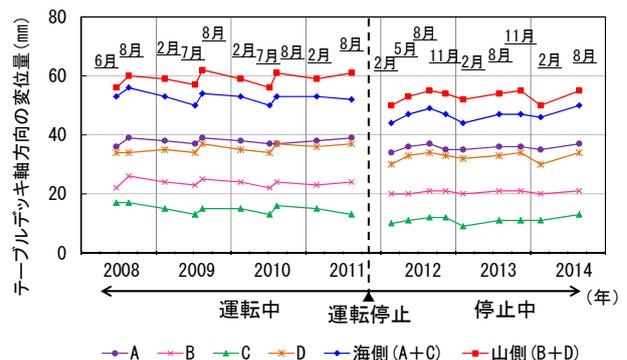


図-8 柱傾斜変位量の推移

2.3 鉄筋ひずみ

柱・梁の主筋に鉄筋計を設置し、鉄筋ひずみを 1986 年より計測している。計測箇所を図-9 に示す。

高圧タービン区間海側の梁主筋ひずみ (M-1) は図-10 に示すように、1990 年代前半のピーク以降は減少傾向であり、ベンチマーク間距離の伸び量の変化と整合する。

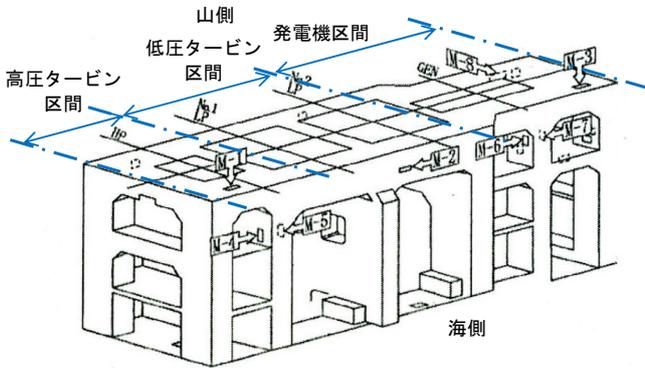


図-9 鉄筋ひずみ計測箇所

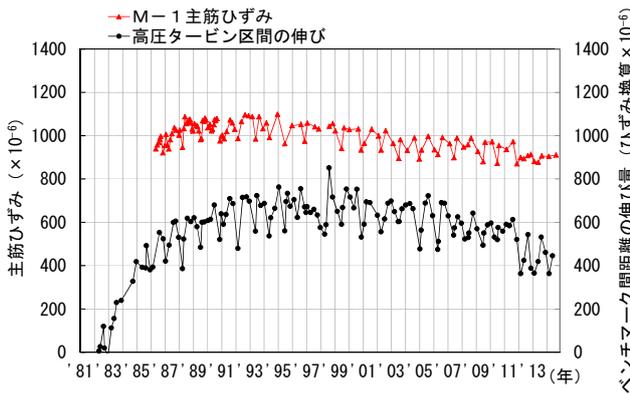


図-10 鉄筋ひずみ (M-1)

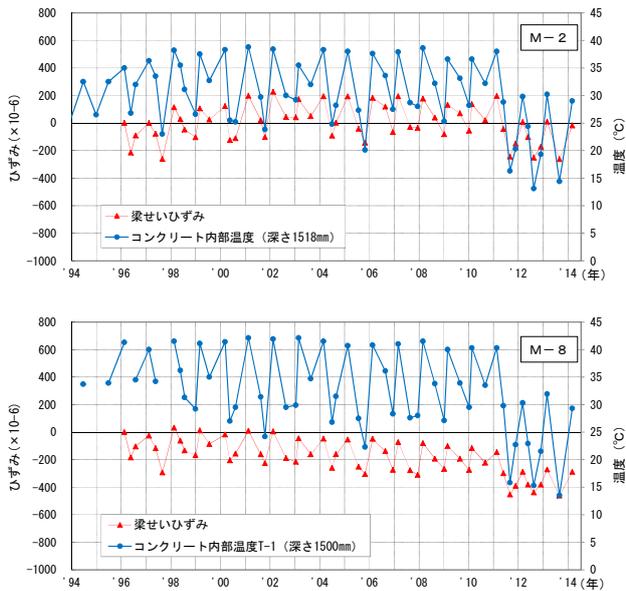


図-12 梁せいひずみ (M-2, M-8)

3. テーブルデッキの高さ方向の変形傾向

3.1 梁せいひずみおよび梁せい変位

梁側面に変位計を設置し、低圧タービン海側 (M-2)、発電機山側 (M-8) において、梁せいひずみを 1996 年より計測している。また、高圧タービン海側 (A-3) および発電機海側 (B-3) において、梁せい変位を 2003 年より計測している。計測位置を図-11 に示す。

M-2 および M-8 における梁せいひずみおよびコンクリート内部温度の推移を図-12 に示す。M-2 は、計測開始当初伸びていたが、2002 年以降は、 $-150\mu \sim +200\mu$ である。M-8 は、計測開始以降、概ね $0\mu \sim -300\mu$ であり、2 箇所とも内部温度の増減に連動して変位も増減している。また、運転停止 (2011 年) 以降は、収縮傾向を示している。

A-3 における梁せい変位およびコンクリート表面温度の推移を図-13 に示す。A-3 は、 $-0.2\text{mm} \sim +0.2\text{mm}$ の範囲でコンクリート表面温度の増減と連動し、運転停止 (2011 年) 以降は、コンクリート表面温度の低下に伴う収縮傾向を示している。

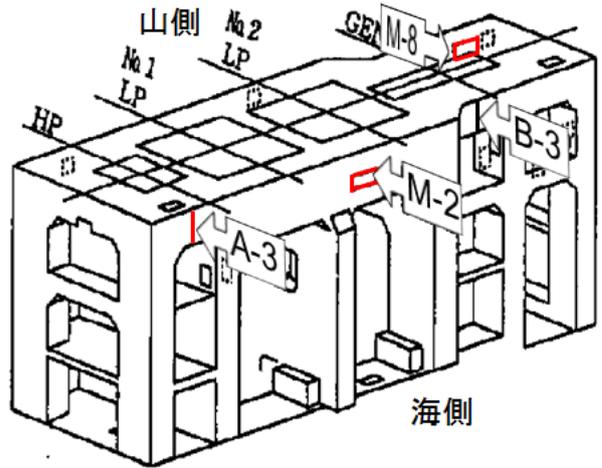


図-11 梁せいひずみ計測箇所

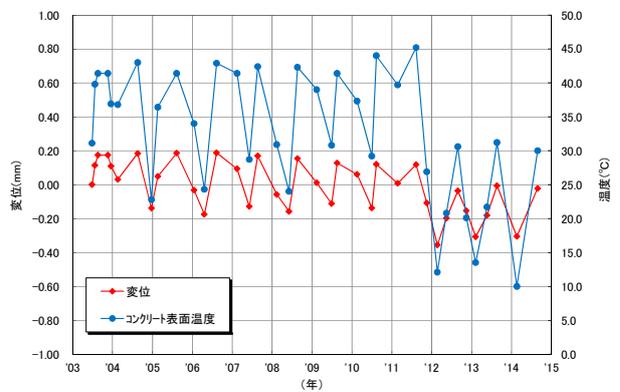


図-13 梁せい変位とコンクリート表面温度 (A-3)

4. コンクリートの強度傾向

TG 架台のコンクリート圧縮強度試験位置と試験結果を図-14、表-3に示す。

コアサンプルによる圧縮強度試験を2002年に行い、設計基準強度 20.6N/mm^2 を上回っていることを確認している。

さらに、強度低下がないことを確認するため、圧縮強度試験位置の近傍でリバウンドハンマーによるコンクリートの反発硬度計測を2008年より実施し、大きな変化がないことを確認している(図-15)。

表-3 圧縮強度試験結果

位置	強度(N/mm ²)
①	30.4
②	31.7
③	29.8
④	29.8
⑤	30.0

※コアサンプル3本平均

5. TG 架台の構造安定性

タービン発電機本体の隙間寸法の概念図を図-16に示す。

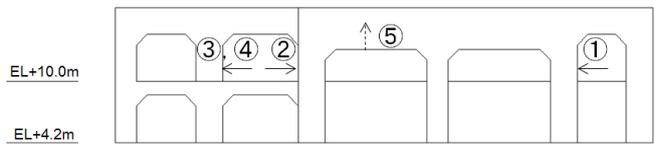
蒸気タービン車軸は、発電機車軸と結合され、スラスト軸受けにおいて位置決めされている。テーブルデッキ部に伸びがあった場合は、発電機の軸受けと車軸の相対位置を示す発電機軸受隙間寸法(エンドプレー値)の変化で把握できる。なお、この相対位置の変化は、定期検査時に必要に応じてスペーサを組み込み修正することとしている。

2004年時にテーブルデッキの軸方向伸び量を50mm、海側・山側の軸方向伸びの差を16mmと設定し、これらの値を用いた構造解析により、構造安定性を確認している¹⁾。

この構造解析に用いたテーブルデッキの膨張量については、建設時及び第5回定期検査時(1982年12月)まではエンドプレー値を計測し、それ以降はテーブルデッキのベンチマーク間距離を計測し、入力値とした³⁾。

現在は、テーブルデッキの軸方向伸び量および海側・山側の軸方向伸びの差は38.4mm、15.1mmであり、2004年の構造解析において設定した50mm、16mm以内に収まっており、構造上問題ないと考えられる(図-17)。また、前報告の2004年以降2011年の運転停止まで、発電機の軸受けと車軸の相対位置の変化に対し、スペーサの修正実績はなく、運転にも問題は生じていない。

断面



平面

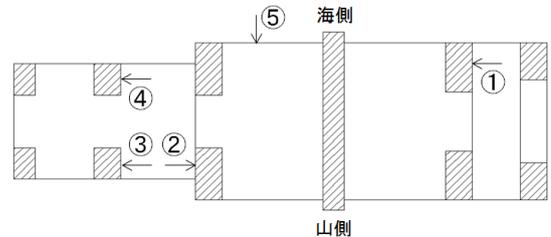


図-14 コンクリート圧縮強度試験位置

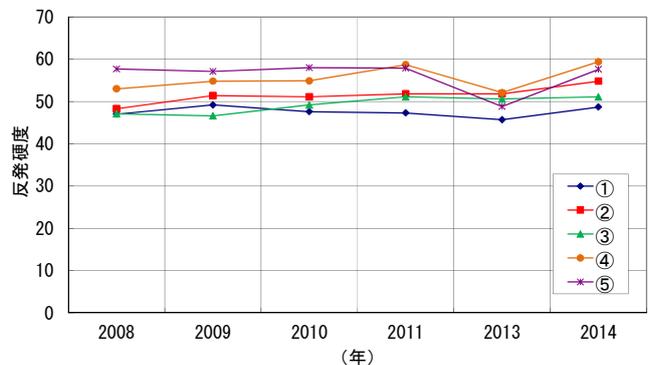


図-15 コンクリートの反発硬度

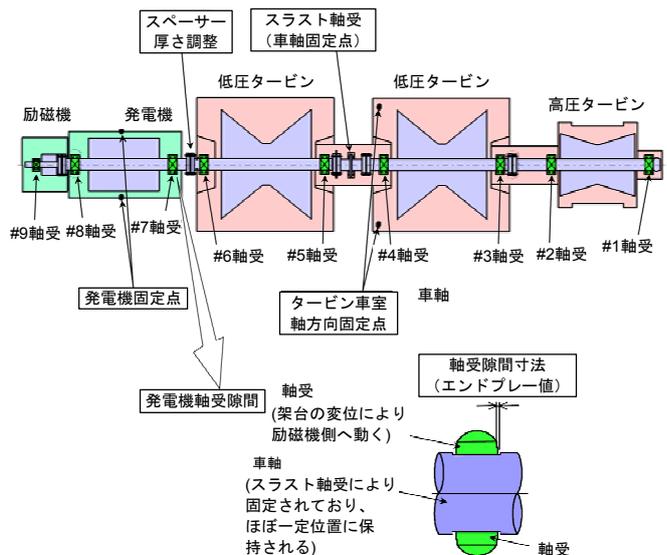
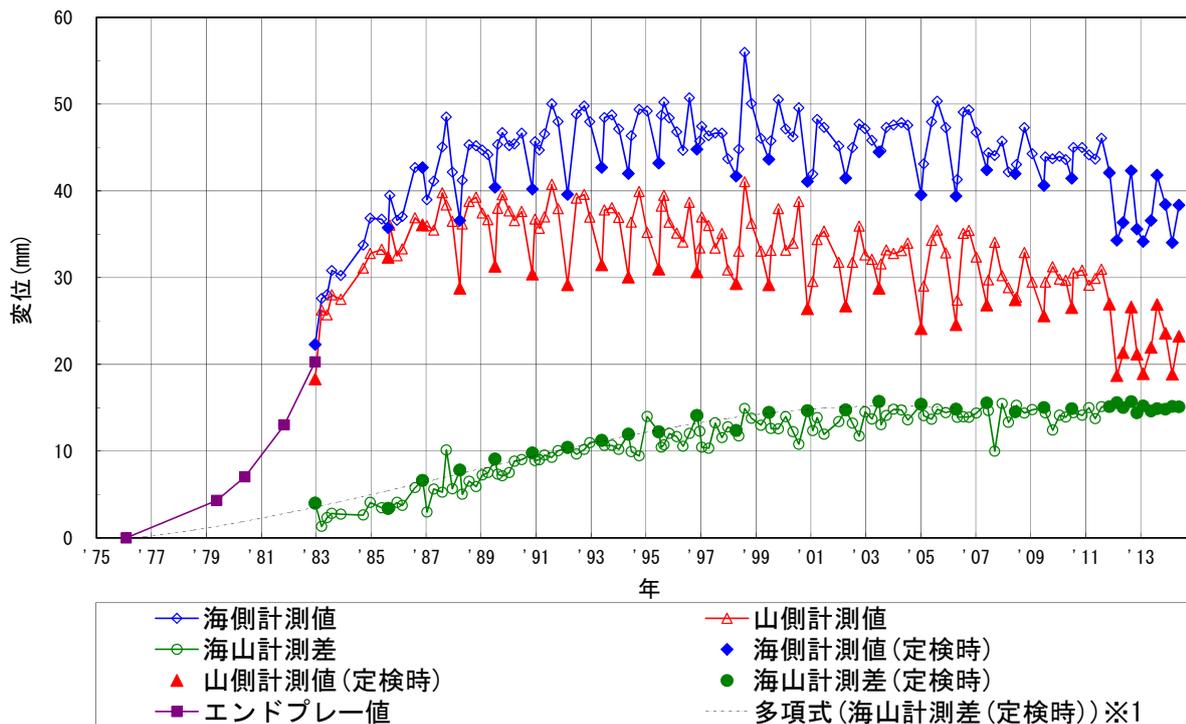


図-16 タービン発電機本体の隙間寸法の概念図



※1 多項式は、2004年までの海山計測差（定検時）を最小2乗法を用いて近似した3次関数である。

図-17 テーブルデッキの膨張量

6. まとめ

- (1) テーブルデッキの軸方向伸びや主筋ひずみなどの計測結果から、TG 架台の ASR は、ここ 20 年ほどの間、収束状態が継続している。
- (2) 2011 年以降の軸方向伸びは、コンクリート内部温度低下による影響を受けているが、環境条件が変化しても ASR の収束状態は継続している。
- (3) コンクリート強度の経年変化についても大きな変化はなく、テーブルデッキの軸方向伸びの差は、構造解析の設定範囲内に収まっており、TG 架台の構造安定性に問題はないと考えられる。
- (4) 本論で述べた各種計測により、ASR の収束状態を把握し、TG 架台を継続使用することができた。今後も現状の維持管理を継続していくことが重要である。

参考文献

- 1) Shimizu, H. et al. : Investigation of safety margin for turbine generator foundation affected by alkali-silica reaction based on non-linear structure analysis, SMiRT18 H03-4, 2005.8
- 2) 関本 恒, 清水 弘, 渡部雄一, 石川達也 : アルカリ骨材反応が生じたタービン発電機架台の強度評価に用いる物性の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No2, pp.1555-1560, 2005
- 3) 高倉岳夫, 石川達也, 松本直樹, 大島龍一 : アルカリ骨材反応を生じたタービン発電機架台の経年変化と膨張量, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No2, pp.1561-1566, 2005
- 4) 高倉正晴, 渡部雄一, 細川高志, 日比野浩 : 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No2, pp.1567-1572, 2005
- 5) アルカリ骨材反応調査研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会 アルカリ骨材反応調査研究委員会, pp.9-19, 1989