

海底トンネルの覆工ひずみの 周期的挙動に関する考察

深沢 成年¹・小林 寛明²

¹フェロー会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 本社 (〒231-8315 横浜市中区本町6-50-1)
E-mail: nar.fukazawa@jrnt.go.jp

²正会員 (独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構 大阪支社 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原3-5-36)
E-mail: hi.kobayashi@jrnt.go.jp

青函トンネルでは、地震時の安全性の確認および日常の維持管理を目的として、各種の計測が開業当時より行われ、データが蓄積されている。そのひとつである覆工コンクリートのひずみは、周期的に変動する特徴的な挙動を示している。このような周期的な挙動を引き起こす要因を分析することで、覆工コンクリートの挙動に影響を与える因子を明らかにすることは、維持管理において非常に重要である。

そこで本稿では、ひずみと同時に計測されている他の環境要因との相関を分析し、ひずみの変動が坑内気温と潮汐との相関が高いことを明らかにした。さらに、その変動が覆工コンクリートに与える影響について評価し、今後の維持管理方法について提言した。

Key Words : undersea tunnel, cyclic behavior of lining strain, earth tide

1. はじめに

青函トンネル(延長: 53.85km)は、昭和63年の開業以来、すでに25年以上が経過し、北海道と本州を結ぶ大動脈としての役割を担ってきた。さらに北海道新幹線(新青森・新函館北斗間)が開業し、天候に左右されない交通輸送網として、その重要性がますます高まっている。

一方で、その置かれた環境については海底部の最小土被りが100m、最大水深が140mという他に類を見ない海底トンネルとなっており、独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構(以下、鉄道・運輸機構という)と北海道旅客鉄道株式会社(以下、JR北海道という)によって維持管理がなされている。

また、青函トンネルでは開業当時より、地震時の安全輸送の確保および日常の維持管理の観点から、地震発生時に列車を制御する警報地震計(NEW改: New Earthquake Warning System 改良型)、地震の規模などを早期に検知する早期地震検知・警報システム(UrEDAS: Urgent Earthquake Detection and Alarm System)、坑内の異常湧水を検知するための流量計、高感度ひずみ計、気温計、湿度計、気圧計を備えている。その他、本坑では3次元計測システムによる内空断面測定を行い、先進導坑、作業坑ではコンバージェンスメジャーによる内空断面測定と水準測量を行っている。

著者ら¹⁾は、本坑の内空変位量と覆工コンクリートの応力の関係に着目し、覆工コンクリートの健全性について評価している。また、既往の研究においても土谷ら²⁾は、本坑の内空変位量と湧水量に着目し、湧水量と周辺地山に作用する水圧の関係を浸透流解析により検討し、この結果に基づく水圧の変化を地盤、覆工背面への作用荷重とした変形挙動解析によって、覆工の維持管理に関する評価手法を提案している。また秋田ら³⁾は、掘削時の止水および覆工に水圧を作用させないための地盤改良を目的として施工された、トンネル周辺の注入域が長期にわたって健全性が保たれていることを確認している。

このように、青函トンネルで得られた各種の計測データについては、トンネルの健全性評価等に利用されているが、覆工コンクリートに設置されたひずみ計の計測結果については山口ら⁴⁾や先山ら⁵⁾などによって定性的な評価がなされているものの、特徴的な周期的変動のメカニズムやひずみに影響を与える因子については明らかとはなっていない。ひずみは覆工コンクリートの挙動を直接示すものであり、青函トンネルの安定性を評価するうえで、これを分析すること重要であると考えている。

そこで本研究では、覆工コンクリートのひずみの周期的な挙動に影響を与えている要因を分析、評価し、青函トンネルの維持管理方法について考察することを目的としている。

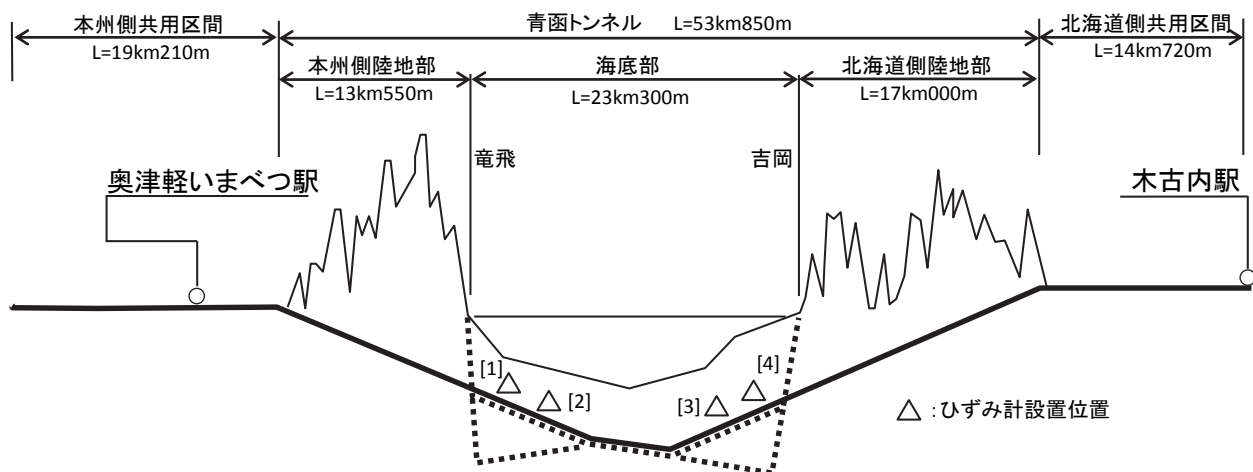


図-1 青函トンネル縦断面図

2. 覆工コンクリートのひずみ計測

(1) ひずみ計測の概要

ひずみ計は海底部において軟弱な地山や膨張性を呈した地山など、施工が難航した4地点に設置し、計測を行っている。青函トンネルの縦断面図を図-1に、ひずみ計設置概要図を図-2に示す。

1 地点あたりの測定断面は3断面で、各断面の間隔は50mである。起点側からA断面、B断面、C断面とし、円周方向のひずみ計をA断面とC断面に、トンネル軸方向のひずみ計を全断面に設置している。円周方向のひずみ計は、左右対称に1断面あたり7箇所としている。よって、青函トンネル全体で円周方向56箇所、トンネル軸方向28箇所計測を行っている。

ひずみは1分毎に計測され、専用回線により、JR北海道の管理部門に送信される。また、ひずみの変動量が大きくなった場合には、ブザーが鳴動するなどの警報装置と連動している。

(2) ひずみ計設置位置の地質と施工状況^{6), 7)}

ひずみ計の設置位置を表-1に示す。出水断層部の地質は、粘土化を強く受けた固結度が低い脆弱な凝灰角礫岩と凝灰岩である。この地質はモンモリロナイトを含む粘土化した岩盤であり、軟弱で切羽の自立が困難であった。また、作業坑で異常出水を起こした断層破碎帯が通過していることから、掘削工法をそれまでの底設導坑先進工法からサイロット工法に変更した。掘削は本州側から行っていたが、地質がかなり不安定なため、掘削を中止し、比較的地質が安定している北海道側より掘削を行うこととした。この区間の掘削時には、ストラットの変状や最大9cmの導坑支保工の押出しがあり、縫い返しを余儀なくされた。

火砕岩脈部の地質は凝灰岩を主とし、これに玄武質火

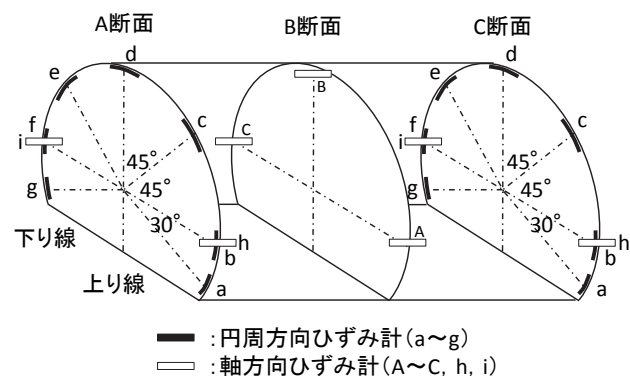


図-2 ひずみ計設置概要図

表-1 ひずみ計設置位置

地点番号	地点名	位置（青函トンネル入口起点）
[1]	出水断層部	16km800m 付近
[2]	火砕岩脈部	21km700m 付近
[3]	不整合部	30km000m 付近
[4]	F10 断層部	33km000m 付近

砕岩の岩脈が貫入している。大小の断層があり、凝灰岩は部分的に熱水変質が著しく、非常に複雑な地質構造をしている。掘削は、上半支保工の座屈および側壁コンクリートの押し出し等の変状が生じたため、地盤注入の範囲を、通常の掘削半径の3倍から4倍に拡大するとともに、全断面を早期に閉合するなど個所の対応をした。

不整合部は、工事着手前の地質調査で大規模な不整合（F1断層）が想定された個所であるが、当該個所は泥岩を主として地山は比較的良好で、大きな断層は存在せず地盤注入の効果により湧水も少なかった。

F10断層部はモンモリロナイトを多く含む膨張性地山で、本坑掘削にあたっては入念な地山注入が行われた。掘削は大きな地圧に抵抗するために、周壁導坑先進円形ショートベンチ工法を採用し、支保工には高強度鋼管支

保工（フープ付 12 インチ鋼管モルタル中詰支保工）を使用した。F10 断層部を含む一帯は青函トンネル最大の難工事区間となり、およそ 500m の区間の掘削に 4 年以上を要した。

(3) ひずみ計測の結果

計測結果を図-3～図-14 に示す。図には計測を開始した 1988 年 3 月から 2013 年 3 月までの結果を示しており、2009 年 3 月までは 4 日おきのデータを、それ以降は 1 日ごとのデータを使用している。引張ひずみを正とする。

円周方向のひずみは、周期がおよそ 1 年の変動を繰り返しながら漸増または漸減しており、現在ではほぼ収束しているように見える。全体的に引張ひずみを生じている個所が多いが、ひずみ計の設置個所による特徴的な傾向は見られない。大きさは最大で 600 μ 程度であるが、大半の計測結果は 400 μ 以下である。また、1993 年 7 月に発生した北海道南西沖地震 (M7.8, 震源から約 200km) では、地上部での警報地震計で 214gal の最大加速度、地点[4]の地震計で 56gal の最大加速度を観測した。また、地点[2]、地点[3]では 200 μ を超えるひずみの変動を記録したが、最大加速度を記録した地点[4]では 70 μ 程度のひずみの変動であった。

トンネル軸方向のひずみでは地点[2]において、他の計測位置の年変動と比較して数十倍の大きな変動となっている個所 (B 断面) がある。現時点でこれらのひずみ計が設置されている個所を容易に確認することができないことから、原因やデータの信頼性について言及することができないため、計測結果は掲載するものの議論の対象からは外すこととする。その他の計測結果では、円周方向のひずみと同様に、年変動を繰り返しながら漸増または漸減し、400 μ 以下で収束している。

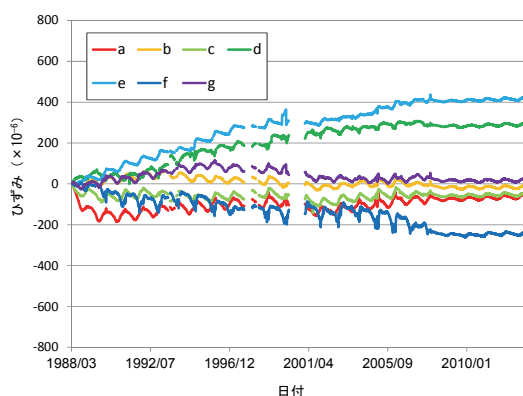


図-3 計測結果 (地点[1]A 断面円周方向ひずみ)

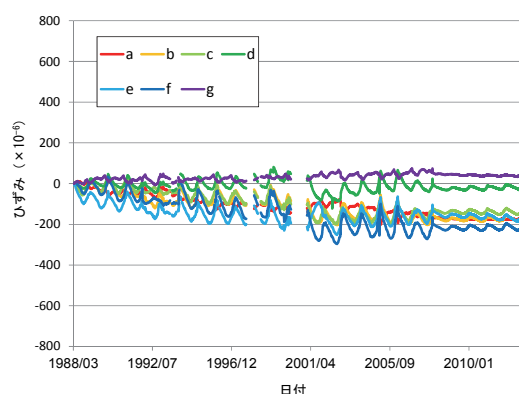


図-4 計測結果 (地点[1]C 断面円周方向ひずみ)

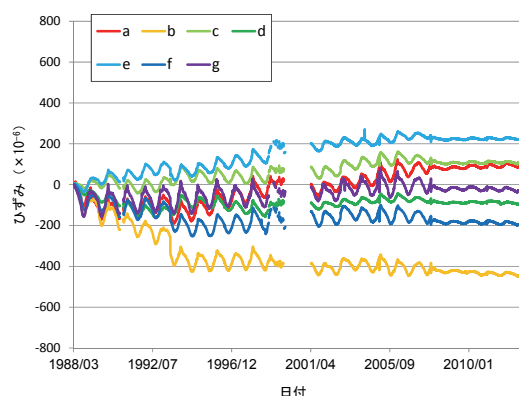


図-5 計測結果 (地点[2]A 断面円周方向ひずみ)

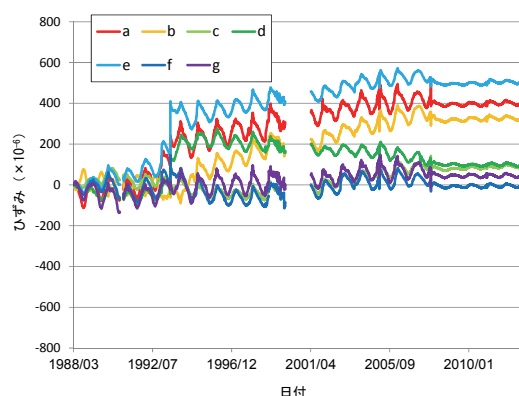


図-6 計測結果 (地点[2]C 断面円周方向ひずみ)

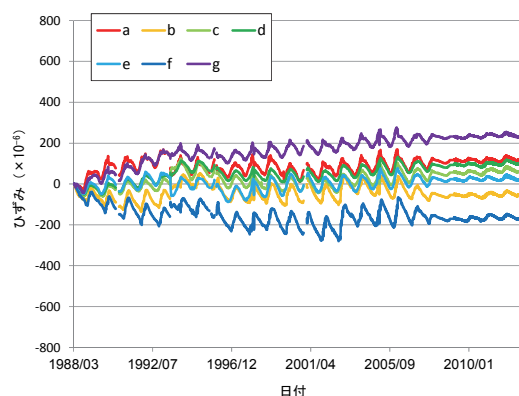


図-7 計測結果 (地点[3]A 断面円周方向ひずみ)

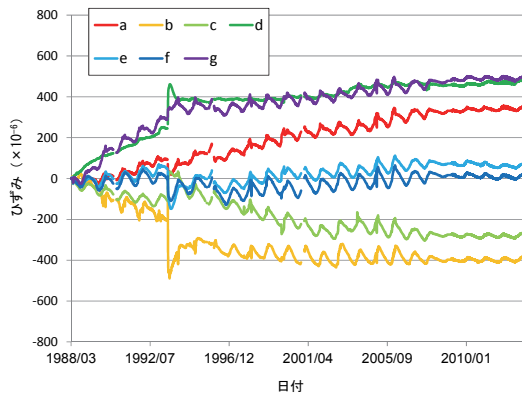


図-8 計測結果 (地点[3]C断面円周方向ひずみ)

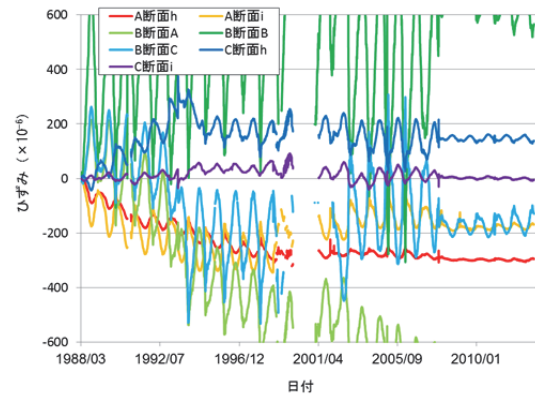


図-12 計測結果 (地点[2]軸方向ひずみ)

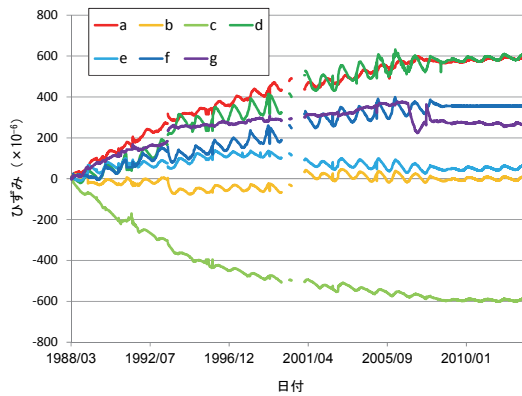


図-9 計測結果 (地点[4]A断面円周方向ひずみ)

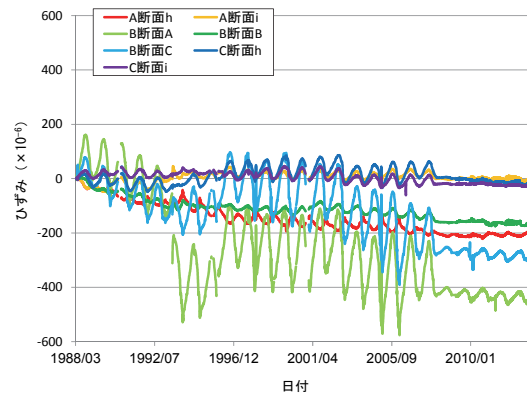


図-13 計測結果 (地点[3]軸方向ひずみ)

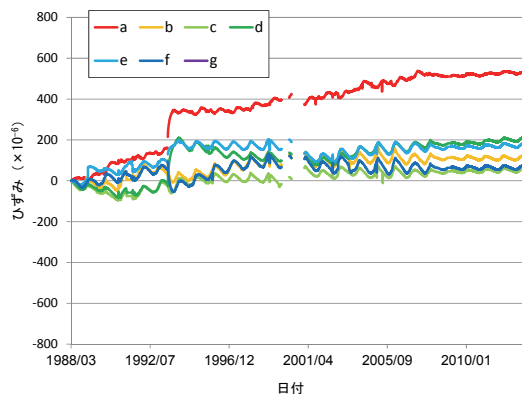


図-10 計測結果 (地点[4]C断面円周方向ひずみ)

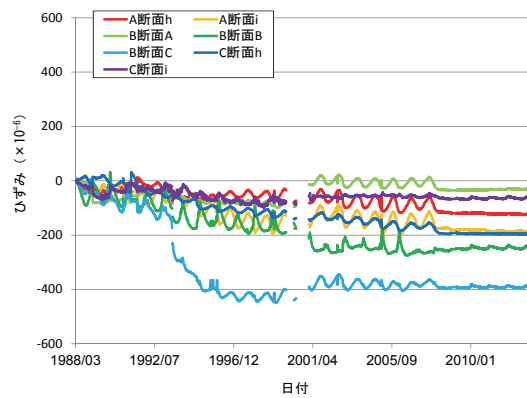


図-14 計測結果 (地点[4]軸方向ひずみ)

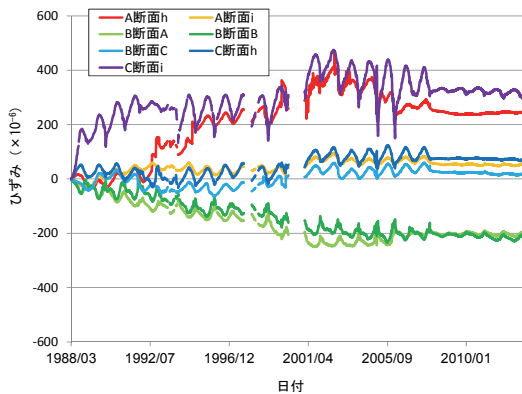


図-11 計測結果 (地点[1]軸方向ひずみ)

3. ひずみの周期的挙動に関する分析

(1) 坑内気温との相関

ここでは、ひずみが年変動を繰り返していることから、同じく年変動をする坑内気温との相関について分析する。本章では2012年10月から2013年10月までの1時間ごとのデータを使用して分析を行う。図-15にひずみと坑内気温との関係の一例を示す。ひずみは気温の下降とともに増加(引張側に変動)し、気温の上昇からやや遅れを伴って減少(圧縮側)へと転じる。その他すべてのひずみ計について確認したところ、円周方向のひずみは56

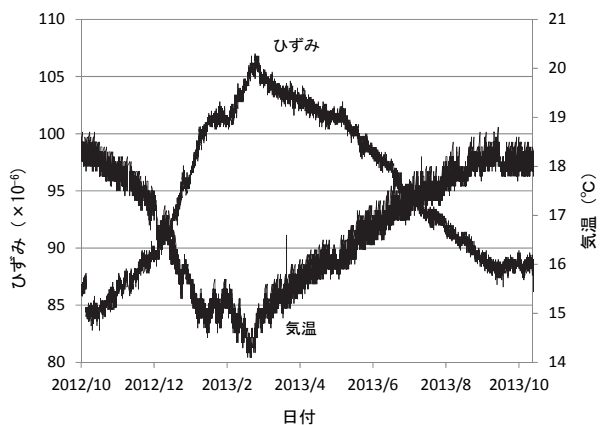


図-15 坑内気温とひずみ (地点[2]A 断面 a)

個所中 54 個所で逆位相を示しているが、トンネル軸方向については、28 個所中 12 個所で正位相も 10 個所あった。

次に、式(1)により、気温との相互相関関数を求める。

$$f_{xy}(\tau) = \sum_{t=0}^T \{x(t) - \bar{x}\} \cdot \{y(t + \tau) - \bar{y}\} \quad (1)$$

ここで、

$$-LAG \leq \tau \leq LAG$$

$$LAG = 180 \text{ 日} = 4320 \text{ 時間}$$

$$x(t): \text{気温}$$

$$y(t): \text{ひずみ}$$

$$T: \text{記録長}$$

図-16 に地点[2]における相互相関関数を示す。円周方向の極性およびパターンはほぼ同じであり、いずれも気温の下降に対してひずみは引張側に変動している。気温に対する遅れは数日から 1 か月程度である。トンネル軸方向については、A 断面のひずみ計 h, i では円周方向と同じ挙動を示している。B 断面においては、ひずみ計 C では円周方向と同様であるが、ひずみ計 A および B では逆位相となっている。C 断面のひずみ計 h, i においては正位相となっている。気温に対する遅れは、円周方向と比較するとやや少ないように見える。

(2) 潮汐との相関

潮汐とひずみの相関については、山口ら^{4), 5)}が、海面の干満時刻とひずみの日変化のピークが合致していると述べている。しかし示されているのは、山口ら⁴⁾が約 1 か月間の 2 個所のひずみ計、先山ら⁵⁾が 2 日間の 1 個所のひずみ計の計測結果のみを対象としている。

そこで本研究では、全てのひずみ計の 1 年間の計測結果を対象に、スペクトル解析を行うことによって、ひずみの周波数ごとの振幅値を算出した。計算には高速フーリエ変換プログラムを使用した。

ここで、潮汐の主要 4 分潮を表-2 に示す。起潮力は太陽と月の運動で決まるため、周波数軸上に展開された調

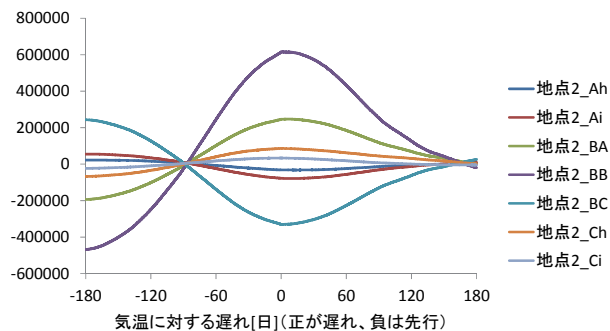
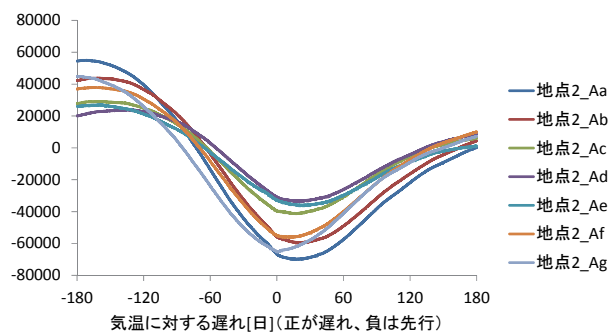


図-16 坑内気温とひずみの相互相関

表-2 主要分潮

種別	記号	名称	周期 (時間)
日周潮	O1	主太陰日周潮	25.819341
日周潮	K1	日月合成日周潮	23.934469
半日周潮	M2	主太陰半日周潮	12.420601
半日周潮	S2	主太陽半日周潮	12.000000

和展開を用いることで計算することができ、このときに展開された各成分を分潮と呼ぶ。その中でもとくに起潮力が大きな分潮がこの 4 分潮である。

図-17 に計算結果の一例を示す。縦軸はひずみと時間の積である。計算においては時間の単位を秒とした。図より、主要 4 分潮に対応する個所にインパルス状のピークが出ていることが分かる。この地点[2]のひずみのスペクトル解析の結果をまとめると以下ようになる。

- ・ M2 分潮は、円周方向ひずみにおいて顕著に認められ、7 測点のうち 6 測点において、4 分潮中最大の振幅を示している。一方で軸方向ひずみ (h, i) においては、ほとんど認められない。
- ・ 円周方向ひずみにおいて、M2, S2 分潮の振幅は同程度または S2 分潮が小さくなっている。
- ・ 日周潮の K1, O1 分潮は、円周方向ひずみでは全測点でピークがあるものの、軸方向ひずみでは K1 分潮によるピークのみが確認できる。
- ・ 円周方向ひずみにおいて、K1, O1 分潮の振幅は同程度または O1 分潮が小さくなっている。

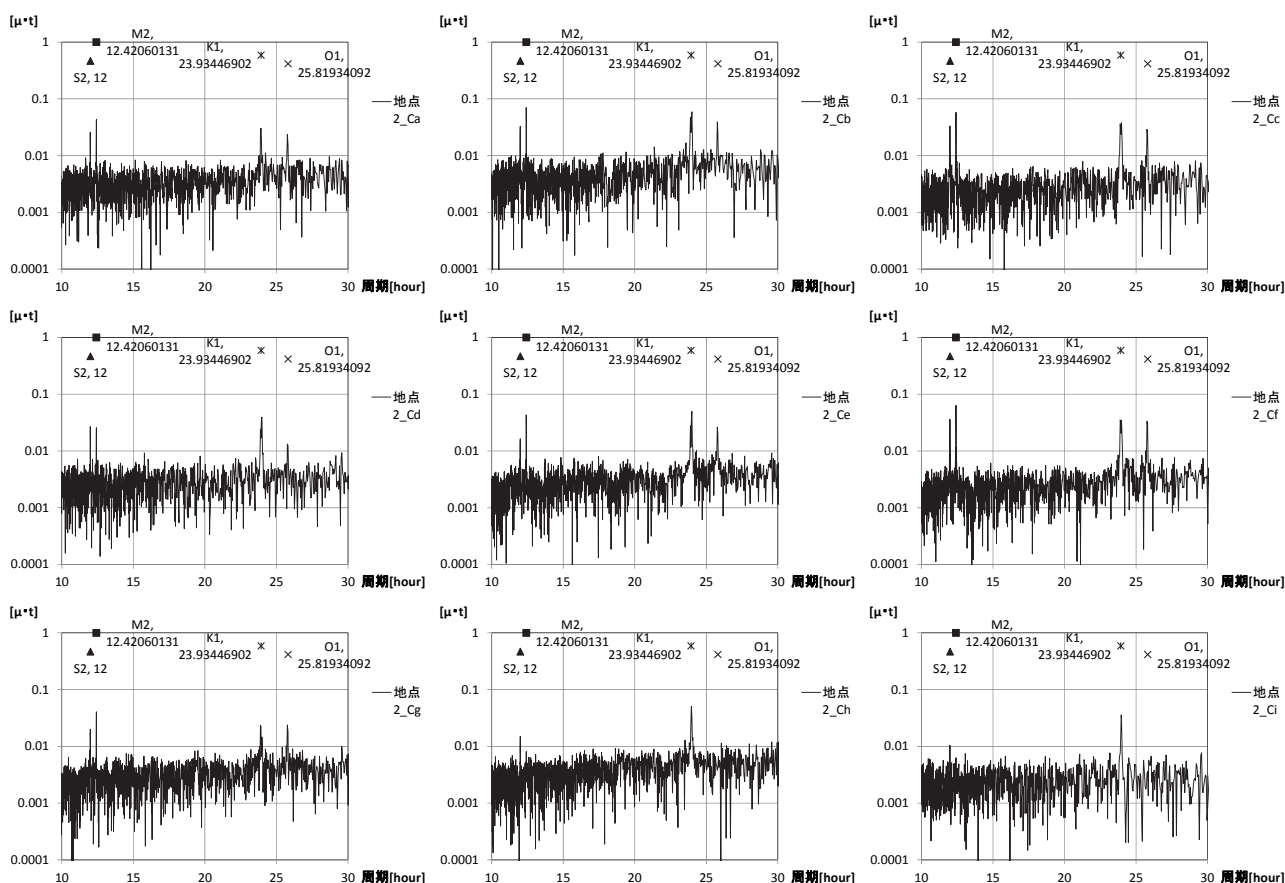


図-17 フーリエ振幅スペクトル

このように、日単位のひずみの計測結果からは年周期の大きな変動が顕著に見受けられるが、時間単位の計測結果を対象にスペクトル解析を実施した結果、ひずみの変動には潮汐の影響も受けていることが分かった。ただし、潮汐による変動は気温による変動よりも小さいため、覆工コンクリートの健全性に与える影響は無視して良いと考えられる。

4. まとめ

本稿では、青函トンネルの覆工コンクリートで計測されているひずみについて、その周期的な挙動について分析を行った。その結果、坑内気温と潮汐による影響があることが明らかとなった。中でも、気温についてはひずみに与える影響が比較的大きいことが分かった。

この気温によるひずみの変動を図-15 から 20μ とし、コンクリートの弾性係数を 22kN/mm^2 とした場合、ひずみの変動によって生じる応力は 0.44MPa と求めることができる。これは既報¹⁾の覆工コンクリートの強度と比較しても十分に小さい。また、潮汐による変動はこれよりも小さく、今後、潮汐力が大きくなる懸念もない。そのため、地震防災システムにおけるひずみ計測の役割は依

然として重要であるものの、通常の維持管理においては、これらの変動は考慮せず、内空変位量による確認を続けていくことでトンネルの健全性を評価することができると思う。

謝辞：本稿をまとめるにあたり、JX 金属探開株式会社廣岡氏には、ひずみの分析だけでなく、様々な有益なご助言をいただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 深沢成年, 小林寛明, 張信一郎, 三谷憲司, 保田尚俊, 朝倉俊弘: 内空変位の長期計測と覆工応力測定に基づく長大海底トンネルの健全性評価, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.72, No.1, pp.1-10, 2016.
- 2) 土谷幸彦, 倉川哲志, 工藤健, 小西真治, 小島芳之, 東畑郁生: 海底トンネルの覆工の長期挙動と評価に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.63, No.3, pp.825-834, 2007.9
- 3) 秋田勝次, 井浦智実, 朝倉俊弘: 海底トンネルで施工されたセメント水ガラス注入材の長期材料特性と性能の評価, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol.67, No.2, pp.95-107, 2011.
- 4) 山口文敏, 中村豊, 富田健司, 遠峯啓一: 青函トンネル地震防災システムに捉えられた 1993 年釧路沖地震, 地震工学研究発表会講演概要, pp.651-654, 1993.
- 5) 先山友康, 吉川大三, 坂井五郎, 三谷憲司: 重力の変化に呼応する青函トンネルの覆工コンクリート表面の歪, 土木学会第 51 回年次学術講演会概要集, pp.144-145, 1996.
- 6) 日本鉄道建設公団青函建設局: 津軽海峡線工事誌 (青函

トンネル), 1988.8

(2016. 8. 5 受付)

- 7) 日本鉄道建設公団青函建設局: 青函トンネル地質調査誌,
1989.

CONSIDERATION OF LINING STRAIN CYCLIC BEHAVIOR OF THE UNDERSEA TUNNEL

Naritoshi FUKAZAWA and Hiroaki KOBAYASHI

Since the inauguration of Seikan tunnel, the strain measurement of lining has been carried out. It has helped to confirm the soundness of lining aftermath of earthquakes and maintenance of the tunnel. It shows the characteristic behavior to cyclic amplitude. We consider that it is very important in maintenance by analyzing the factors that cause such the cyclic behavior.

In this paper, by analyzing the correlation between the strain and temperature that are measured at the same time, between the strain and earth tide, we also evaluate the effect of the behavior on the lining. In addition, maintenance methods of the tunnel have been proposed.