

(44) 空洞覆工および周辺岩盤の変形挙動 —坑内温度の変化に伴う季節的変動—

顧問組 技術研究所 正会員 ○新井伸夫
顧問組 技術研究所 正会員 浦野和彦

Study on the Deformation Behavior of Underground Structures —Seasonally Deformation Induced by the Change of Atmospheric Temperature in a Tunnel—

Nobuo Arai, Technical Research Inst., Hazama Corporation
Kazuhiko Urano, Technical Research Inst., Hazama Corporation

Abstract

The followings are the conclusion of discussion with brief analysis, which was observed at the concrete lining and the surrounding rocks in Shin Usami Tunnel.

- ① As the atmospheric temperature inside the tunnel changes even a few degrees, the concrete lining is expanded or shrunk considerably.
- ② It was also proved that the surrounding rocks are deformed by the heat conducted from the concrete lining.

1. まえがき

重要構造物の地下立地をはじめ、種々の地下空間開発プロジェクトを推進していく上では、その施設を構成する空洞やトンネル等地中構造物の常時および地震時の挙動を定量的に把握し、その安定性を評価することが必要となる。また、施工後の構造物および周辺地盤の健全性を評価する手法を確立することも重要なことである。そのため筆者らは、JR伊東線新宇佐美トンネルにおいて、1983年より、東日本旅客鉄道株式会社および(財)鉄道総合技術研究所と共同で空洞の地震時挙動の観測および常時状態のモニタリングを実施してきている。

構造物施工後の長期的な安定性の監視、という観点に立って実施してきている常時状態のモニタリングでは、トンネル覆工および岩盤内のひずみと坑内の気温を12時間おきに集録している。観測をはじめて後2年程度の間は、トンネル掘削や軌道敷設工事が行われていたこと、ひずみ計がまだなじんでいなかったと考えられることなどから、覆工、岩盤のひずみはきわめて不安定な挙動を示しているが、その後はほぼ1年周期の変動を記録してきており、これらは吉川・他(1985)に示されている凍上圧によるトンネル覆工の変形とその傾向が良く似ていることが特徴的である。

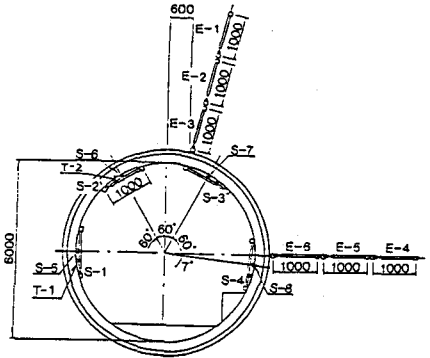
本報は、それら覆工、岩盤内のひずみの周期的変動に着目し、坑内気温の変化との関係について若干の考察を試みたものである。

2. 観測の概要

伊東線新宇佐美トンネルは、延長 3000mの単線トンネルで、内空断面は内径8mの円形、コンクリート覆工厚は30cmとなっている。主な観測は、山の被り厚さが約260mのトンネル中央部100m区間で実施している。観測区間は、主に変質玄武岩からなっており、P波速度(V_p)およびS波速度(V_s)はそれぞれ2.3~3.2km/s

ecおよび1.1~1.6km/secである。図-1にトンネル覆工部にとりつけたひずみ計、岩盤内に埋設したひずみ計の配置図を示す。なお、トンネル覆工部は12mピッチに打ち継目が設けられている。ひずみ計は、差動トランス型である。

1983年7月より実施してきている観測では、伊豆半島周辺で発生する地震の記録を観測、集録するとともに、覆工および岩盤内ひずみ計、坑内温度計により得られる12時間間隔の観測値をデータロガーに集録してきている。前述したように観測をはじめてから2年程度の間は、観測値はきわめて不安定な挙動を示しているが、その後はほぼ1年周期の変動を記録している。そこで、ここでは周期変動を現している期間のうち1986年以降のデータを検討対象とした。また、12時間毎のデータのうち、外環境が安定していると思われる夜間のデータをその日の代表値としている。



S-5~S-8: トンネル軸方向に設置
T-1、T-2: 温度計

図-1 トンネル覆工部および岩盤内ひずみ計配置図

3. 空洞覆工および岩盤内ひずみの周期的変動

3.1 観測結果の概要

1986年1月1日(経過日数 905日目)から1990年5月までの期間に得られたデータのうち、5日毎の値をプロットしたものを図-2~図-6に示す。これらの図から、以下のことがわかる。

①トンネル坑口から1500m入った地点にある当観測区間でも、1年周期で坑内温度は変動している。ただしそれは、新宇佐美トンネルにごく近い網代測候所の最高・最低気温(気象庁月報を参照)の変動と比較するとはるかに安定しており、その変動の幅は夏と冬の間でほぼ10℃程度である。(図-2)

②空洞覆工部周方向ひずみも1年周期の変動をしている。その変動の極性は、S-1とS-2~S-4で異なっている。S-2とS-3は、ほとんど同じ挙動を示している。また、S-1~S-3の変動幅に比べてS-4の変化は少ないようである。S-1とS-2~S-4の動きの間には、時間差があるように見られる。(図-3)

③空洞覆工部軸方向ひずみも1年周期の変動をしている。S-5とS-6~S-8は極性が逆の挙動を示し、その振幅はS-6~S-8がほぼ同程度であるのに対し、S-5は若干大きい。ここでも、S-5とS-6~S-8の間に時間差が見られる。(図-4)

④岩盤内ひずみのうちE-1~E-3については、E-3、E-2、E-1の順に(トンネルに近い方から遠い方へ)

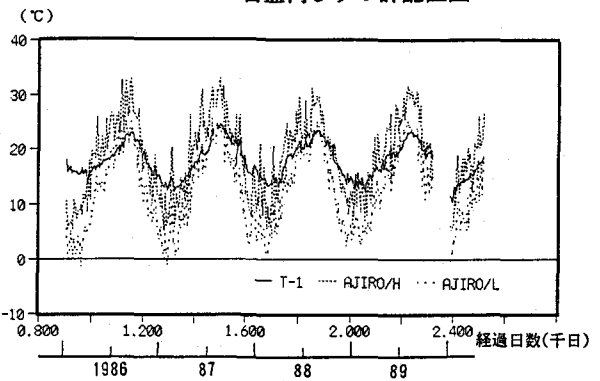


図-2 坑内温度(T-1)と網代測候所での最高気温(AJIRO/H)最低気温(AJIRO/L)

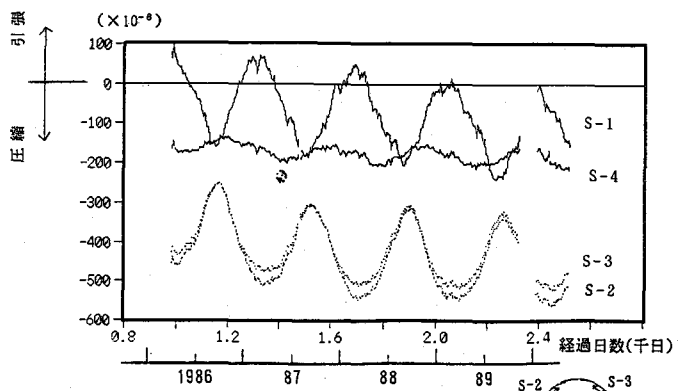


図-3 空洞覆工部周方向ひずみ

変動が伝播しているように思われる。変動の幅も E-3、E-2、E-1 の順に大きい。(図-5)

⑤岩盤内ひずみのうちE-4～E-6についても、やはりE-1～E-3と同様に、トンネルに近い方から遠い方へ向かって変動が伝播しているように見うけられる。ただしその変動幅は、E-1～E-3ほど大きくはない。(図-6)

次に、周方向ひずみと軸方向ひずみの関係を図-7に示す。この図からS-1とS-5は、ほとんど同じ挙動を示していることその他の空洞覆工部ひずみとは極性が逆なこと、S-1、S-5と他のひずみ変動との間に時間差があることが見てとれる。

3.2 観測結果についての考察

覆工部、岩盤内ひずみとも観測位置の違いなどにより、相互にタイム・ラグが若干見うけられるものの、それぞれはほぼ1年周期で変動している。さらにそれらは、坑内温度の変化と良い相関があるように思われる。そこで、これまでに観測された空洞および岩盤ひずみの変動は、坑内気温の上昇・下降に対応して、空洞や岩盤が膨張・収縮していることに起因して発生している、という作業仮説をたて、以下検証していくこととする。

空洞覆工部、岩盤内に設置されたひずみ計の材料は、 $1 \sim 2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ($0^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$) という線膨張係数を持っている。これに対し、コンクリートの線膨張係数はおよそ $10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ であり、岩盤も同程度の線膨張係数であると考えられる。よって、もし坑内気温の上昇・下降により空洞覆工が膨張・収縮していれば、それにより生じるひずみは、現在設置されているひずみ計により観測されうることがわかる。また、夏・冬間の温度差が約 10°C であることは、覆工部や岩盤内ひずみの変動の幅が 100μ 程度であることと良く対応していると考えられる。

空洞クラウン部の周方向ひずみ(S-3)とその近傍に埋設してある岩盤内ひずみ計のうち、最もトンネルに近いもの(E-3)を比較したのが図-8である。この図から、両者がほぼ同時に逆位相の変動をしているこ

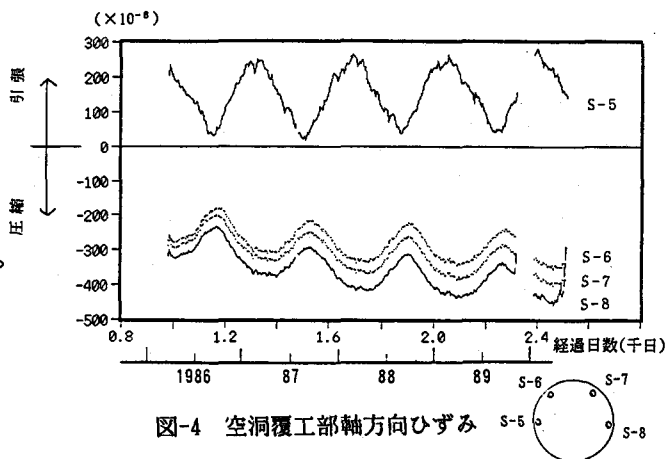


図-4 空洞覆工部軸方向ひずみ

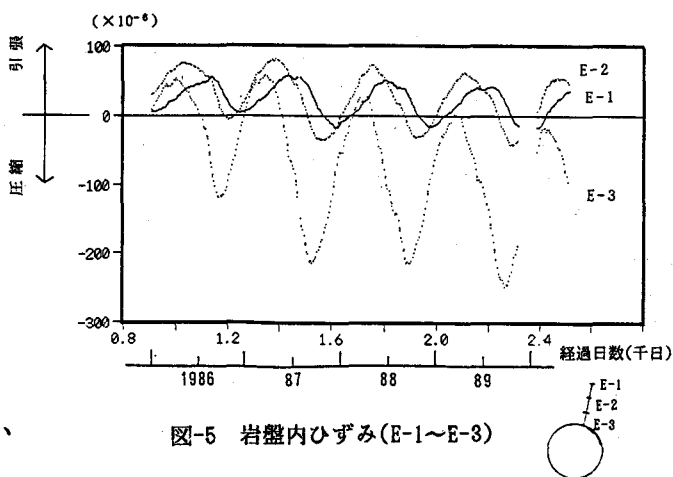


図-5 岩盤内ひずみ(E-1～E-3)

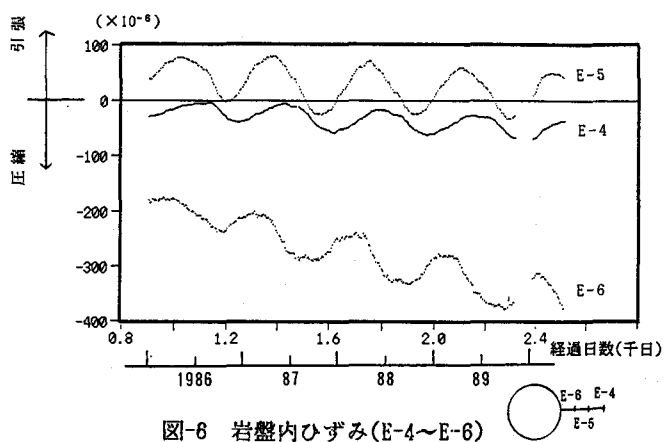


図-6 岩盤内ひずみ(E-4～E-6)

とがわかる。これは、空洞の膨張・収縮（S-3は、空洞膨張時には伸び、収縮時には縮む）により、岩盤内ひずみ計（E-3）が収縮・伸張している（ひずみ計の片方はライニング、片方は岩盤に固定されているため）、と考えれば理解しうることでありと思われる。その岩盤内ひずみ計について、E-1～E-3を比較したものを再び図-9に示す。空洞から遠ざかるにつれ、ピークの位置が遅くなり振幅が小さくなるという事実は、空洞内の熱が岩盤内を伝播し徐々に外側の岩盤を膨張・収縮させている、と考えれば理解される。

一方、空洞周方向ひずみの変動挙動については、以下のように考える（図-3 参照）。クラウン部（S-2、S-3）のひずみ計は坑内温度に対応して、伸張・収縮を記録しているが、これは空洞が膨張・収縮していると考えれば理解される。坑内温度の変化より若干の遅れがあることも熱の伝導であることを考えれば、妥当なことであると考えられる。S-4についても同様に現象を説明しうる。ただし振幅が小さいのは、S-4の近傍にメンテナンス通路が存在するためと考えられる。一方、側壁のひずみ計 S-1は、唯一異なった挙動を示している。これは、空洞覆工の膨張・収縮と矛盾しているように見えるが、このひずみ計が他と違い、覆工上に存在するクラックをまたいで設置されていることから、例えば坑内温度が上昇したときに覆工コンクリートが膨張し、そのためクラックが閉じようとして S-1のひずみ計は縮みを記録する、と考えれば現象を説明しうると思われる。

以上、坑内温度の上昇・下降に対応して空洞覆工および岩盤が膨張・収縮している、と考えることで観測事実を矛盾なく説明しうる事がわかった。なお、引張限界ひずみを越えた値を示しているように見える観測値に関

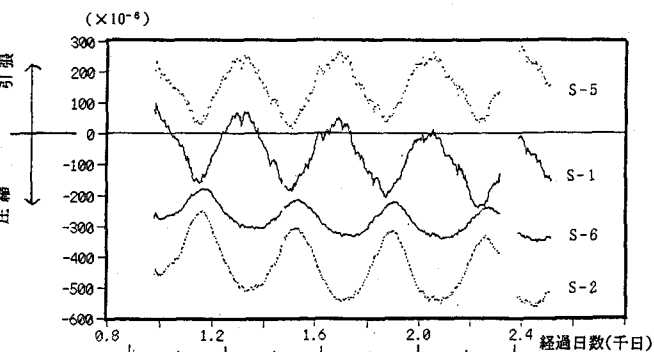


図-7 空洞覆工部周方向ひずみと軸方向ひずみ

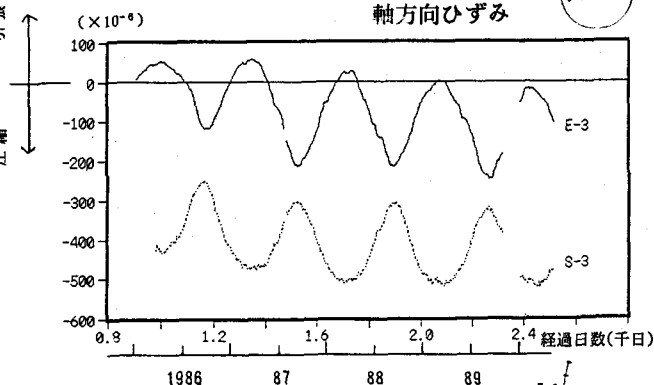


図-8 空洞覆工部周方向ひずみと岩盤内ひずみ

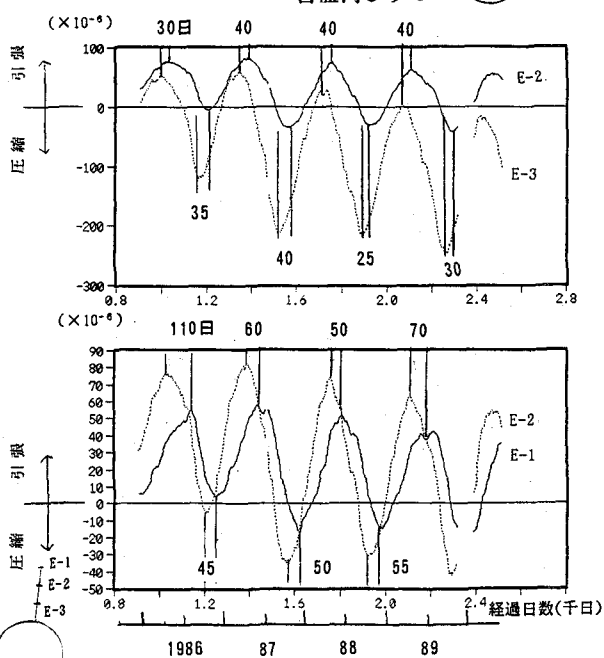


図-9 岩盤内ひずみ変動の時間差

しては、そのひずみ計のゼロ線はドリフトしており、測定点付近の覆工あるいは岩盤は実際には限界ひずみレベルを越えてはいない、と考えることで全体の挙動を定性的には説明しようと思われる。ただし、この点については、今後定量的な検討をすすめる必要があろう。

表-1 解析に用いた物性

	コンクリート	岩盤
ヤング率 (kg/m^2)	2×10^9	5×10^9
ポアソン比	0.2	0.3
密度 (kg/m^3)	2350	2200
熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{m} \cdot \text{day} \cdot ^\circ\text{C}$)	30.0	35.0
比熱 ($\text{kcal}/^\circ\text{C}$)	0.2	0.2
線膨張係数	10^{-5}	10^{-5}

コンクリートと空気との熱伝達率は、 $240.0 \text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{day} \cdot ^\circ\text{C}$

3.3 解析との比較

観測結果を説明するために展開した推論が定性的に正しいのかどうかを確認するために、汎用構造解析プログラムABAQUSを用いて熱-応力解析を行った。解析に用いた物性を表-1に示す。これら物性は、岡田(1986, 1987)を参考にした。岩盤内の温度についてはデータがないため、解析開始時の温度をコンクリート、岩盤とも 15°C とし、空洞の中心より40m離れたところに境界を設け、そこでの温度は常に 15°C で一定であるという境界条件を与えた。

以上の条件のもと、坑内気温として図-10に示すような温度変化を与え解析を行った。解析結果のうち、覆工および岩盤内の空洞半径方向の軸ひずみについてその経時変化を図-11に示す。この図から、解析結果は観測結果を定性的に良く説明していることが分かる。

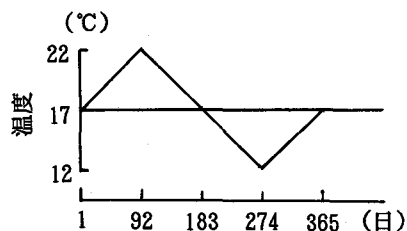


図-10 解析の際与えた坑内温度

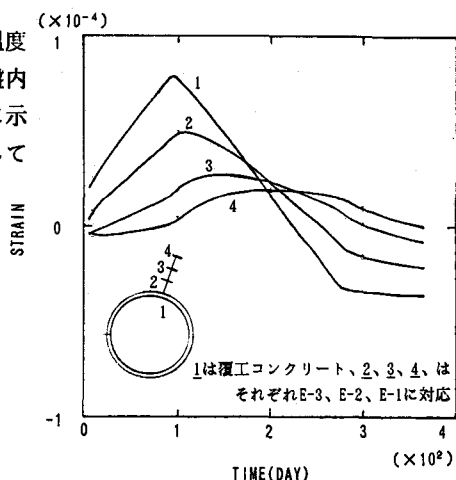


図-11 覆工および岩盤の空洞半径方向のひずみ(解析結果)

4. まとめ

新宇佐美トンネルで観測された覆工、岩盤内ひずみの周期的変動について、簡単な解析を含めた考察を行い以下の結論を得た。

- ①トンネル覆工は、トンネル内の気温変化に連動して膨張・収縮を繰り返している。
- ②岩盤内のひずみの周期的変動は、空洞覆工からの熱の伝播に起因する岩盤の伸張・収縮で説明できる。

5. あとがき

坑内温度の変化に起因する空洞覆工および岩盤の変形挙動について若干の考察を行った。今後は、解析をさらに進め、岩盤内の熱伝導特性の検討からゆるみ領域の把握などを試みると共に、土圧等他の要因にも着目し、空洞覆工および周辺岩盤の健全度を総合的に評価する方向へと検討を進めていきたいと考えている。

なお、本観測は、東日本旅客鉄道株式会社および(財)鉄道総合技術研究所と共同で実施しているものであり、観測結果の公表を快くお許しいただいた関係各位に感謝いたします。また、この検討にあたり有益な助言をいただいた(財)鉄道総合技術研究所トンネル研究室の朝倉俊弘主任研究員に感謝の意を表します。
 <参考文献>①吉川恵也・北川修三・川上義輝・馬場富雄：トンネル変状の傾向(2)、鉄道技術研究報告、No.1293、1985。②気象庁：気象庁月報、1986～1990。③岡田勝也：鉄道トンネルにおける断熱処理によるつらら防止工法に関する研究、鉄道技術研究報告、No.1324、1986。④岡田勝也：トンネルのつらら発生領域に関する統計的・理論的解析と一提案、鉄道技術研究報告、No.1349、1987。