

MEASUREMENT OF KEKB TUNNEL LEVEL

Takashi Kawamoto, Mika Masuzawa, Ryuhei Sugahara
 High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

Due to effects of the Great East Japan Earthquake, it was expected that the KEKB accelerator electromagnets would be out of alignment. Therefore we surveyed the level of the KEKB tunnel and compared it with data taken before the earthquake. As a result, large displacements were observed in many places. Because it was thought that the tunnel level was still varying after the earthquake, we introduced a system called HLS (Hydrostatic Leveling System) and decided to measure the level continuously. Here, we report the results of the level survey and the level displacement observed by HLS.

KEKB トンネルレベル測定

1. はじめに

東日本大震災時の地震の影響で、KEKB 加速器の電磁石アライメントに関しては大幅な狂いが予想された。実際、数 10 m 間隔にある加速器トンネル構造体の継ぎ目 (expansion joint : コンクリートの熱膨張/収縮を吸収するためのギャップ) に於ては、間隔の変化や段差が目視出来るような状況であった。このため SuperKEKB 建設に向け現在のアライメント状況を評価するため、トンネルレベルの測量を実施し震災直前のデータとの比較を行なった結果、各所で大きな変位が観測された。このレベル測量には時間がかかり (全周で約半月)、また常時レベルをモニタ出来る環境が望まれたため、管の中の水位変化でレベルをモニタする HLS (Hydrostatic Leveling System) と呼ばれるシステムを試験的に導入する事にした。現在、一部のトンネル内にこの HLS を設置し、常時データを蓄積している。

ここでは、最初のレベル測量の結果と、HLS で観測されたレベルの変化について報告する。

2. 測量器によるレベル測定

2.1 レベル測量概要

KEKB トンネル壁面には、建設時にレベル測量用のマーカーが 10 数 m 間隔で設置されている。測量は、Leica のレベル測量器 N3 を用いて、隣接するマーカー同士のレベル差を記録しながら、リング全周 (約 3 km) に渡って行なう事になる。作業は震災後の 2011/3/28 ~ 4/14 に実施され、震災直前の 2011/2/21 ~ 3/8 に行われた同内容の測量結果と比較された。

2.2 レベル測量結果

図 1 にレベル測量の結果を示した。X 軸はビーム衝突点 (筑波実験室) からリング時計回りでマーカー位置 (m) を表し、Y 軸は震災後の隣接マーカーのレベル差から震災前の隣接マーカーのレベル差を引き算した値 (mm) を表している。

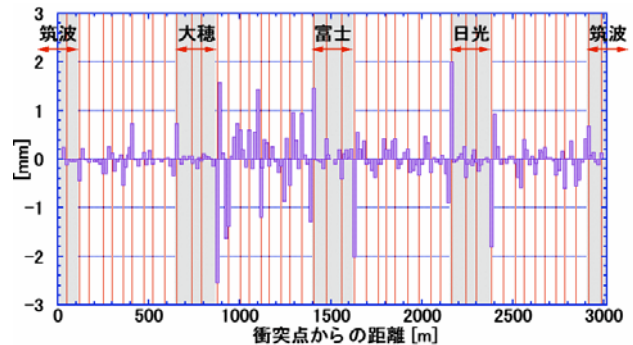


図1：震災前後でのレベル差の変化 (グレーは直線部, 他はアーク部, 赤線は expansion joint)

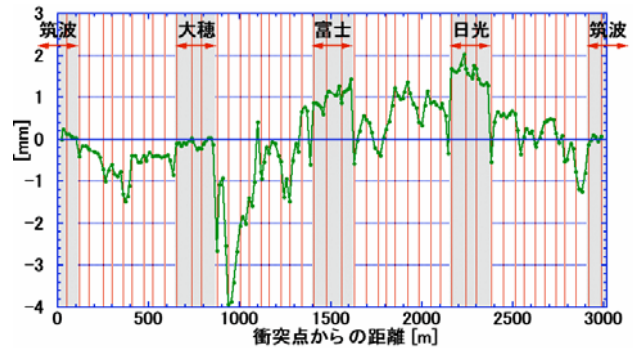


図2：震災前後でのレベル差の変化の積算

グレー部は KEKB リング中における各直線部で、KEKB 前身のトリスタンププロジェクト時代に実験室があったため、建設に当たっては杭打ちが施されているが、その他のアーク部はコンクリートトンネルが直接地中に埋められている。そのため震災前後でのレベル差の変化が、直線部では少なく、またアーク部は多め、さらに直線部とアーク部との境界では非常に大きくなった (最大で 2.5 mm) と推定される。Expansion joint を挟んだ箇所での変化も大きい傾向がある。また大穂実験室~富士実験室間は、既存の PS 加速器の建物の下にトンネルを設置した部分があるためか、他の場所に比べて変化が大きい。

ここは以前からトンネルレベルの沈下が大きい所でもある^[1]。図 2 の方は図 1 の値を積算したもので、筑波実験室のレベルを 0 とした時の相対的なレベルを表している。大穂実験室の右側（PS 加速器がある箇所）での沈み込みが大きい事が分かる。

3. HLS によるレベル測定

3.1 HLS 設置

上記のようにトンネルレベルの変化が認められ、またその後のレベル変化の様子を常時観測する必要があると考えられたため、HLS を導入する事になった。HLS とは、トンネル内に設置された管の中に水を通し、その水面の高さを静電容量センサで読み取るもので、床面に対して相対的に水面が上昇/下降する様子をレベルの変化に変換してモニタする事が出来る。センサにはロシアの BINP（ブドカ原子核物理研究所）製のものを採用した^[2]（図 3, 表 1）。



図3：HLS センサと配管

表1：HLS センサのスペック

測定レンジ	5 mm
分解能	< 1 μm
サンプリングレート	< 0.5 Hz
サイズ	直径 100 mm, 高さ 130 mm
電源	Power over Ethernet (PoE)

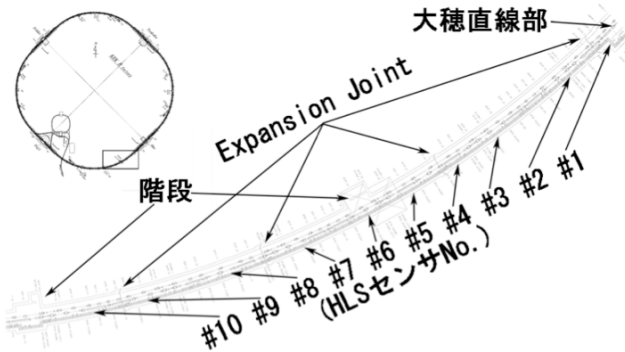


図4：HLS 設置場所

設置場所は、レベル差の変化が大きかった大穂実

験室から富士実験室へ向かうアーク部で、ここに約 190 m に渡ってフレキシブルチューブを敷設し、約 20 m 間隔で #1 から #10 までの 10 個のセンサを配置した（図 4）。フレキシブルチューブを使ったのは、敷設場所がケーブルや冷却水配管で込み入った場所だったため（他に適当な場所が無かった）、作業性を高めるためである。

3.2 HLS データ解析

図 5 に HLS で得られた約 3 週間分（'11/6/18～7/12）のデータを示した。X 軸は日付、Y 軸はレベル（ μm ）で、10 個のセンサデータをまとめて表示してある。所々データが飛んでいるのは、地震や HLS の調整によるものである。なおプロット開始時の各データの値を 0 に合わせてある。

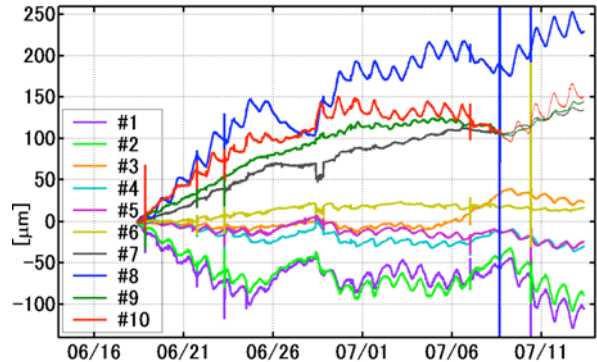


図5：HLS データ（'11/6/18～7/12）

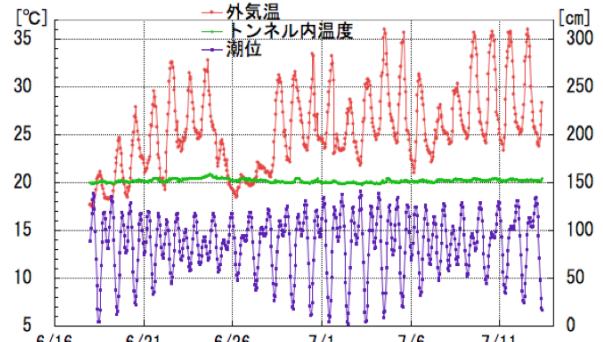


図6：内外気温と潮位（'11/6/18～7/12）

まず第一に目に付くのはデータに日較差がある事で、また気温の高い日が続くとデータが一方向にドリフトし、気温の低い日が続くと元に戻るようにドリフトする事から、これらは外気温（図 6 参照）にリンクしていると思われる。トンネル内の温度の変化は微少で、データの日較差を引き起こす様には見えない。日較差については色々議論があるが、日較差が大きい #1, #2 センサに関しては、地上部に建屋がある大穂実験室が近いため、日射によって建物が膨張する影響が大きいものと推察される。#10 に関しても地上部につながる階段室近傍のため同様の推察出来るが、同じく階段室近傍の #6 に関しては日較差が顕著ではなく、疑問は残る。また #8 も日較差が大きい、これは PS 加速器の linac の建屋が KEKB トンネルの #8 センサ直上付近に位置してい

るため(図 10 参照)、同様に地上部の建物の熱膨張の影響があると考えられている。

図 7 は各センサの値から #9 センサの値を引き算したプロットの抜粋である。1日に2回のピークが見られる事に気付く。図 8 の気象庁の潮汐データとも相関がある事から、これは地球潮汐の影響と考えられ、HLS が正常に動作している事を示していると言える。また図 9 に示すような地震によるレベル変化も何度か捉えられ、トンネル構造が安定していない事を示している。

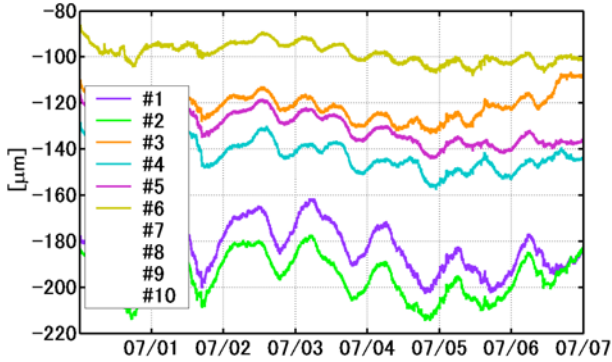


図7: HLS データ ('11/6/30~7/6)

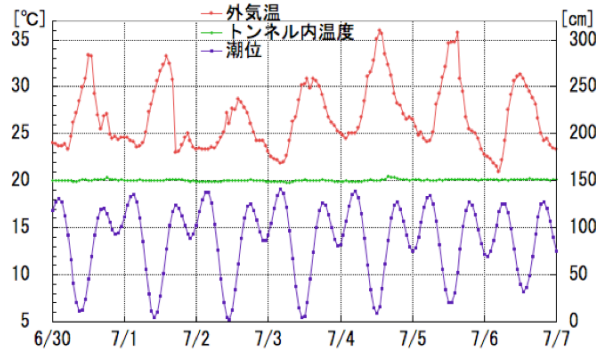


図8: 内外気温と潮位 ('11/6/30~7/6)

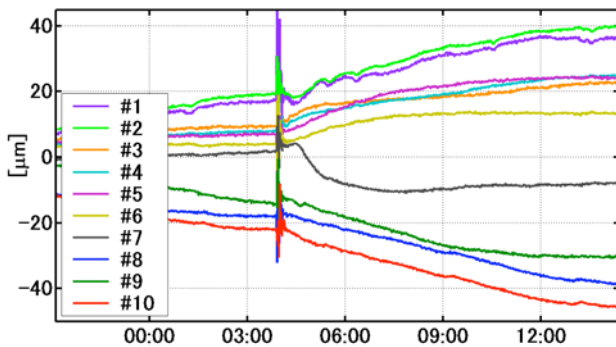


図9: 地震の影響 ('11/7/31 3:54 つくば市 震度3)

3.3 HLS 直上の地上部での重量物搬出作業

'11/6/28 のデータに約 20 μm の異常な沈下が記録されたため(図 5 中央)、KEK 内の各部署に確認した所、#7 センサの直上部辺り(図 10 丸印)にクレーン車(約 40 t)が入り、以下のような重量物の搬出作業が行なわれた事が判明した。

作業内容: 15 t のキャビティを 4 分割し搬出

作業時間: '11/6/28 9:00 ~ 19:30

搬出時刻: 11:30, 14:30, 16:30, 19:30

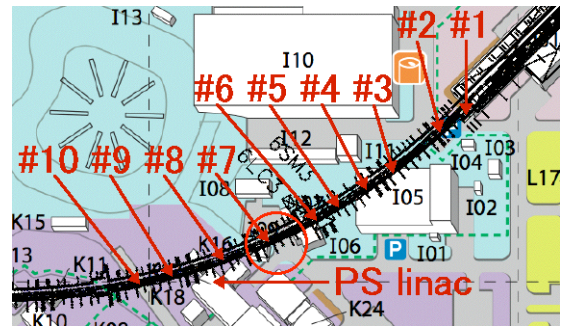


図10: HLS センサ配置と地上図

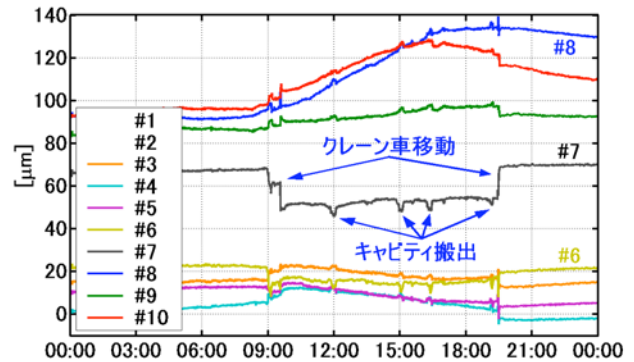


図11: #7 センサ部での沈下 ('11/6/28)

図 11 の #7, #6 センサのプロットを見ると、作業開始/終了時のクレーン車の移動による段差、及びキャビティ搬出時の小ピークがはっきり見て取れる。ただ #7 センサ近傍の #8 センサのデータには動きが見えない。これは、#7 と #8 の間に expansion joint があるため(図 4 参照)、影響が少なかったものと推察される。

4. まとめ

このようにして図らずも HLS の有用性が確認された訳だが、KEKB トンネルに関してはその剛性が疑われる結果となった。SuperKEKB 加速器運転に於てこのようなレベル変動が許されるのかどうかの検証、またトンネル構造に関しては周囲の土壌検査等が必要になるであろう。いずれにしても今後は HLS による長期的なレベル変動の観測、及びその守備範囲の拡大が必要である。

参考文献

- [1] M. Masuzawa, et al., "SURVEY OF KEKB MAGNETS AND MONUMENTS FOR SUPERKEKB", 11th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA2010), DESY Hamburg, Germany, Sep. 13-17, 2010
- [2] A. Chupyra, et al., "SAS Family of Hydrostatic Level and Tilt Sensors for Slow Ground Motion Studies and Precise Alignment of Particle Accelerators and Storage Rings". 8th International Workshop on Accelerator Alignment (IWAA 2004), Geneva, Switzerland, Oct. 4-7, 2004