

IMPACT OF THE EAST JAPAN EARTHQUAKE ON THE KEKB TUNNEL

Mika Masuzawa [#], Hiromi Inuma, Takashi Kawamoto, Yasunobu Ohsawa and Ryuhei Sugahara
KEK

1-1 Oho, Tsukuba-shi, 305-0801

Abstract

KEKB completed its very successful operation on June 30, 2010. The dismantling of the KEKB main ring started in the fall of 2010 for the next project, called SuperKEKB. The East Japan Earthquake hit the area in the middle of construction on March 11, 2011. The tunnel, which will be used for SuperKEKB, received various types of damage from the earthquake. Most of the damage is concentrated around the tunnel joints. A survey of part of the tunnel indicates that the tunnel is deformed beyond the alignment tolerances for SuperKEKB. Therefore, resurvey and realignment of the existing survey network and the magnets are needed. Some parts of the tunnel continue to move even four months after the earthquake. The impact of the East Japan Earthquake on the KEKB tunnel is summarized and reported in this paper.

東日本大震災の KEKB トンネルへの影響について

1. はじめに

KEKB は 2010年6月30日にビーム運転を終了し、SuperKEKB^[1]へ向けての建設作業が始まった。SuperKEKB では加速器トンネルを始め電磁石等なるべく多くの加速器コンポーネントを再利用してコストの削減及び建設期間の短縮を図る。KEKB トンネルは、トリスタン建設時に造られたものであり SuperKEKB で3世代の加速器を経験することになる。このトンネルも今回の東日本大震災及びで様々な被害を受けた。特に目につくのがエキスパンションジョイントでの漏水、床面の盛り上がり、段差の発生等である。なかでも実験室とアーク部の境界でのエキスパンションジョイントでの被害が際立って大きい。これは、実験室側とアーク部の耐震強度が極端に異なることから発生したものと推測される。このような状況ではトリスタンから引き継いだ測量基準点座標への影響が懸念される。現在被害の把握をすべく基準点の再測量を進めている。今回、トンネル内の被害状況と各種測量結果について報告する。

2. KEKB トンネル構造

地震による被害状況を把握し解析する上で KEKB トンネル構造を理解することが重要である。図1は KEKB トンネル全体を上から見たものである。KEKB リングは周長約 3km、トンネル床は地表から約 11m に位置している。リングは筑波、大穂、富士、日光と呼ばれる4つの実験棟とその両側に約 100m 程伸びる直線部、それらをつなぐアーク部から成っている。四カ所の実験棟のうち KEKB では（そして SuperKEKB でも）筑波実験棟に電子・陽電子の両ビームが衝突する衝突点がある。それぞれの実験棟については杭打ち基礎が施され、アーク部については地中にフリーの状態で見られている。またトンネ

ルの熱膨張・収縮を吸収するため約 60m おきにエキスパンションジョイントが設けられている。図1にある切れ目がエキスパンションジョイントにあたる。

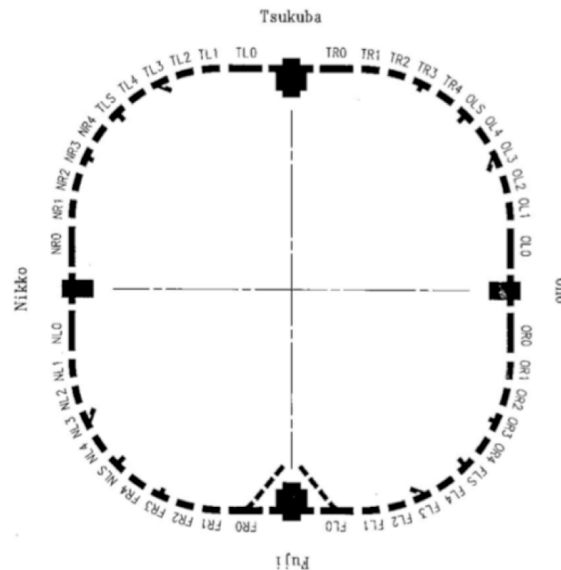


図1 : KEKB トンネル。トンネルは約 60m のユニットがエキスパンションジョイントを挟んでつながっている。

KEKB トンネルが位置する地盤については過去にボーリング調査が行われている^[2] (図2)。地表から 100m までのボーリングでは岩盤線には当たっていない。実験室地下床からは約 20m の鋼管杭が伸びており礫質層 (N 値>50) に届いているがその他のトンネル部分には杭打ちはされておらず砂や粘り層の中にフリーな状態で置かれている。表で読み取る限りアーク部の典型的な N 値は 10 程度と決して頑強な地盤でなないことがわかる。

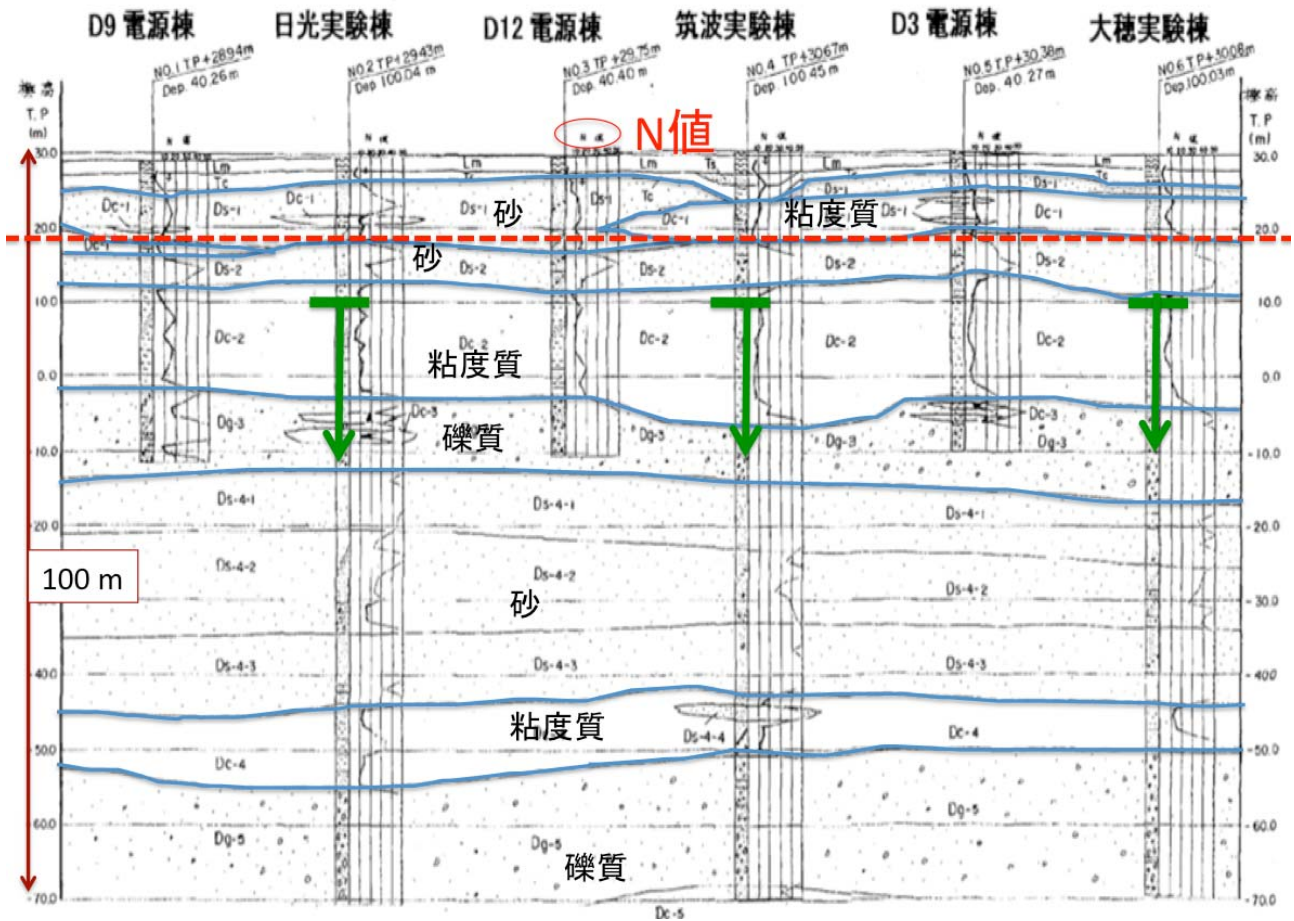


図2：KEKB トンネルボーリング調査結果。点線はトンネル床レベル、下向き矢印は実験室床からの基礎杭のおおよその長さを示す。

2. 地震後の目視調査

本格的なトンネル内の検査が出来るようになったのは4月に入ってからであった。最初の数週間はトンネル内照明も非常灯以外は消されている状態であったので被害状況の確認も懐中電灯を使って行わざるを得なかった。幸いKEKB主リングトンネル内では電磁石が架台から落下するというような被害は見られなかった。しかしながら図3の写真のように、電磁石が載っているベースプレートが大きく動いたような痕跡や、図4のようにエキスパンションジョイントから泥水が吹き上げたようなあとが地震発生後約10日後の調査で発見されている。また図5のように大きく開いたジョイント部分も数多く見つかった。またこれとは反対に、エキスパンションジョイントの隙間が狭まったように見える箇所も多くみつかっている。図6はエキスパンションジョイントの両側のトンネルユニットがぶつかり合ってジョイント間の隙間が狭くなっているように見えた箇所の写真である。ちなみに、地震発生直後の調査ではジョイントの隙間が狭くなっているケースの方が多く見られたが約1ヶ月後の調査では徐々に隙間が開いてきている様に見えた。

エキスパンションジョイントの所々では天井部か

らの漏水も発生し真下の電磁石の養生を図7にあるような応急処置として行った。漏水についてはその後の度重なる余震により新たに別の場所で発生したりもしている。



図3：エキスパンションジョイントにかかる電磁石ベースプレート。M12 ボルト用の孔は熱収縮・膨張を考慮して長穴にしてある。地震前には左側にボルトが寄っていたが地震直後にはボルトが右側に寄っていた。この移動量はコンクリートの熱膨張係数で想定される量よりも遥かに大きい。なお、写真縦に入ったマジック線は地震後の4月にマークしたもので、4月以降にこのボルトは大きくは動いてないことを示す。



図4：エキスパンションジョイントから吹き上げた泥水のあと。2011年3月22日撮影。



図5：ミリ単位で開いたエキスパンションジョイント。このような箇所がトンネル内で多数見られた。



図6：盛り上がったエキスパンションジョイント。地震直後の調査ではこのようにジョイントの隙間が狭くなった箇所の方が多く見られた。



図7：広がったエキスパンションジョイントからの漏水。水たまりが見える。左側は電磁石養生用のビニルシート。クラックは破壊されたジョイント部。

3. 測量

昨年秋から KEKB 主リングの解体・建設工事が始まった。また、SuperKEKB アライメント用に測量基準点を測量し精密測量網を完成させる作業も進めていた。精密測量網完成後のこのタイミングで今回の地震が発生してしまったのがなんとも残念である。今回精密測量網の健全性を確認するためにトンネル内測量を限られた時間のなかで行った。まず、余震の続く中ではあったが、トンネル内壁のレベルマーカー測量を行い、次に電磁石の傾きと高さ測量を行った。両者については本学会でそれぞれ報告されているので詳細についてはそちらを参照されたい^{13,4)}。いずれもエキスパンションジョイントのところで大まかく位置が変化しており、特に実験室とアーク部の境目での段差が目立つ測量結果が出ている。

本稿ではレーザートラッカーによる水平位置測量結果について紹介する。トラッカー測量は衝突点両側の直線部約 300m と大穂・富士実験室の間（南トンネル）について行った。まず衝突点周りを測量したのはその部分の電磁石配置が KEKB から SuperKEKB で大幅に変更になることからその部分にある電磁石が総撤去される前に状況把握をする必要があったからである。また次の測量場所として南アーク部を選んだのは、この部分で毎年沈下が進むことが既に判っており¹⁵⁾他と比較して地盤が弱く地震の被害が大きかったのではないかと推測したからである。まず筑波衝突点近辺での測量結果を電磁石位置の地震前後の変位として図8に示す。図中の変位ベクトルは適当にスケールされているが最大で約 2mm の変位に相当する大ききで描かれている。ベクトルの始点に各電磁石が置かれている。衝突点から両脇のアーク部へかけて徐々に変位ベクトルが大きくなって行くのがわかる。また何台かの電磁石が大きく、最大で 8mm 程度も動いてしまったことも判明した。これらの電磁石については現場で確認した所ベースプレート上にはっきりと移動したあとが見つかっている（図9）。この電磁石だけが特に大きく動いた原因は、本来使用すべき電磁石固定用ボル

トより小さいもので固定されていたからだ、という事が後の調査で判明している。

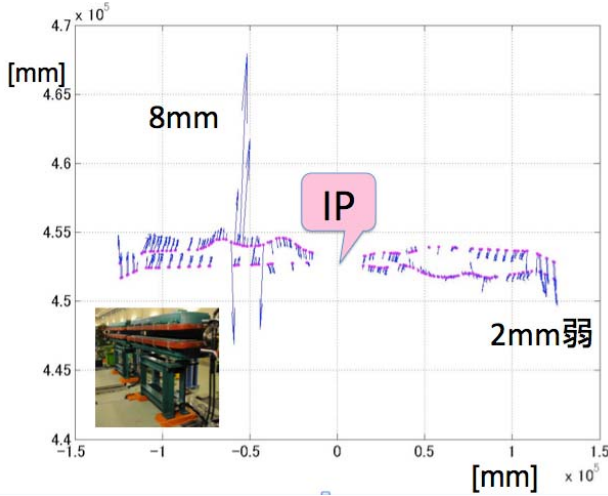


図 8 : 筑波衝突点近傍の電磁石位置の変化。

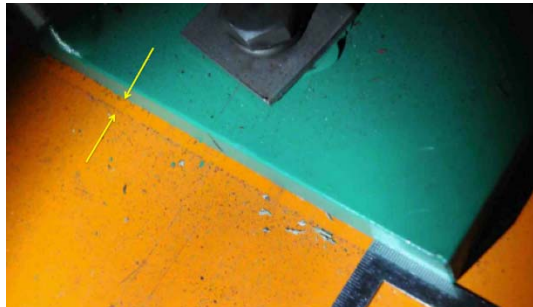


図 9 : 電磁石架台 (緑色) とベースプレート (橙色)。矢印で示した部分が今回の地震で動いたと思われる箇所。

図 10 大徳から富士実験室の間のアーク部での電磁石変位量を表したものである。ここで特徴的なのは変位ベクトルの向きがエキスパンションジョイントで変わっている点である。エキスパンションジョイントで挟まれたトンネルユニットがそれぞれバラバラに動いたことがわかる。またこの区間の両端はどちらも実験室側へ引っ張られるような変動をしていることもわかる。

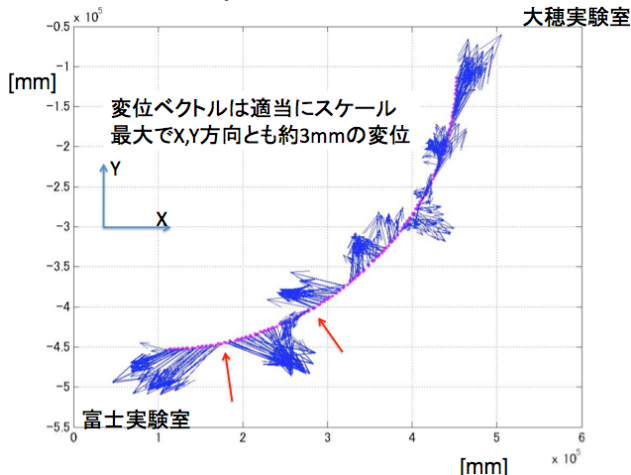


図 10 : 南アーク部電磁石移動量。エキスパンションジョイント箇所 (例) を赤矢印で示す。

4. 変動モニタ、その他の測定

基準点及び電磁石が大きいところでは 10mm 近く動いてしまったことがレーザートラッカー測量で判明した。変動の様子もエキスパンションジョイントで挟まれたトンネルユニット毎でバラバラである。これらの結果より、昨年構築した精密測量網の健全性は失われたと判断出来る。SuperKEKB へ向けて測量網の立て直し、例えば新しい基準点の定義、のような作業が必要になった訳である。

それでは震災から 5ヶ月近く経った今、トンネルの動きは止まったのであろうか。大徳実験室からアーク部へかけてのエキスパンションジョイントについて隙間間隔をレーザー距離計等で 6月上旬よりモニタしている。その途中経過を図 11 に示す。図中のスパイクはこの期間に発生した地震に対応する。プロットの番号は # 47 が実験室とアーク部の境目、数字が大きくなるに従って実験室から離れるという定義になっている。地震の度に一方向へ階段状にシフトして行く様子が特に # 47 で顕著である。ここに関してはモニタしてから僅か 2ヶ月の間にすでに 0.7mm も変動している。今後どこまで変動し続けるのか、現段階では予想がつかない。エキスパンションジョイント方向の変動はリング周長の変動と直結するのでその定量的評価が重要となる。しかしながら、リング内すべてのエキスパンションジョイントをモニタすることはセンサー数に限りがある等の問題であり現実的ではない。現在トンネル全体の変動をモニタする方法を検討しているところである。

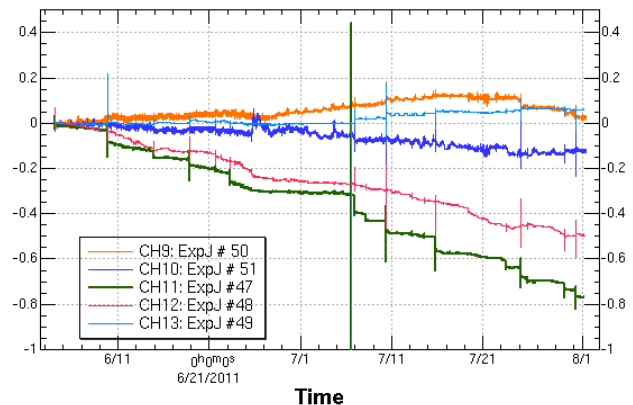


図 11 : 大徳実験室からアーク部へかけてのエキスパンションジョイントの変動。縦軸単位は mm。スパイクは地震に対応 (但し 7月 6日の大きなスパイクはセンサー確認時に発生した人工的なもの)。

この他南アーク部の大徳実験室側約 200m には HLS センサーを 10カ所設置しトンネル床レベルの変動を常時モニタするようにした。この HLS システムでもいろいろと興味深い情報が得られているがこれについての詳細は参考文献^[4]を参照されたい。

この他にトンネル各所での電磁石、ベースプレート、その近傍の床、の振動調査を開始した。図 12 に東アーク部対称点付近の電子リング用電磁石の振動想定結果を示す。10分間のデータについて振動振幅を周波数の関数としてプロットしてある。これ

を見るとこの電磁石の X 方向（ビーム進行方向に対して直角方向）の固有振動数は約 16Hz でこの周波数での平均振幅は約 $0.15\mu\text{m}$ であることがわかる。このあたりは東大通りに近く、交通量、特に大型車の通行と振動の相関が以前から指摘されている^[2]。今回も交通量との相関ははっきり見えており、時間で図 1 3 にあるように振動振幅が変化する。大型車通行時には例えば X 方向の 16Hz 振幅は平均値の 10 倍程度に拡大してしまうことがわかった。これらの振動が地震前に比べて悪化したのかどうか。これについては全く同じ電磁石での直接比較データがないので定量的な評価が出来ていない。しかしながら過去に測定して来た KEKB トンネルの他の電磁石に比べると $\sim 15\text{Hz}$ より高い周波数での振幅が有意に大きくなっている^[6]。このような電磁石振動が SuperKEKB の性能を劣化させるようなことがないかどうかについては加速器設計グループへ検討を依頼している。

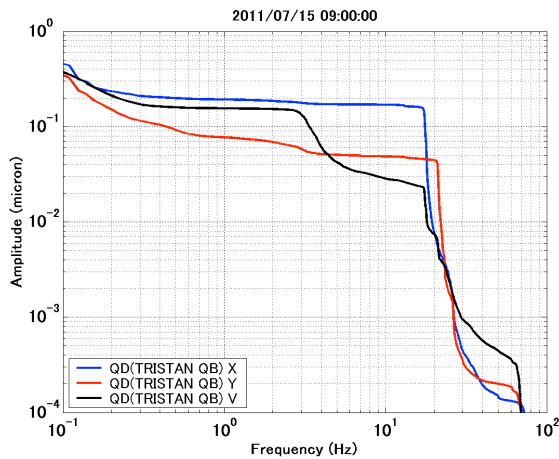


図 1 2 : 東アーク部電磁石振動。X,Y,V はそれぞれビーム進行方向と直角方向、進行方向、垂直方向に対応。

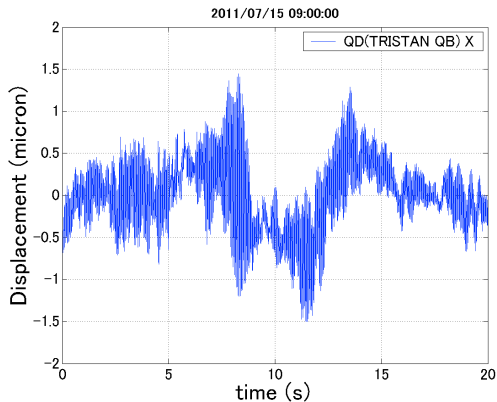


図 1 3 : 20 秒間の振動変位。交通量と車種により振動振幅が変化する。大型車通行時には $\sim 16\text{Hz}$ 振幅が $1\mu\text{m}$ を越える。

5. まとめ

震災で KEKB トンネルが変形し、電磁石及び測量基準点で構成する精密測量網も崩れてしまった。KEKB から SuperKEKB への移行で位置がそのまま保存されてそのまま再利用予定だった（いわゆる温存の）電磁石も動いてしまった。その結果 SuperKEKB でアライメントの対象電磁石候補数は約 1800 台と当初予定していた数の約 3 倍にも膨れ上がってしまった。具体的にどの電磁石をどれだけ修正するか、等については今後測量データを揃えつつ加速器設計グループと協議して決めて行くつもりである。SuperKEKB の建設期間もアライメントをどこまでやるか、に依存する部分もあるのでアライメントの現実的許容値を示して頂くことも必要であると考える。

地震後しばらく経ってからのトンネルの動きについてはエキスパンションジョイントのモニタ等からまだ部分的には動いていることが判った。例えば大穂実験室近辺のジョイント部では地震の度に一方方向にずれて行っている。

トンネル変動については局所的測定だけではトンネル全体像はつかめない。トンネル内測量及び測量基準点を地上部に上げて地上部での一括測量をすることなどを検討中である。

この他電磁石ベースプレート等の健全性についても振動測定を行う等して調査を続ける予定である。

トンネル構造そのものの健全性についても心配されるがこの件に関してはもう少し大きな枠組みで取り組んで行く必要があると考える。

今回の地震で KEKB 主リングでの被害がエキスパンションジョイントに集中していたのが特徴的である。また同じエキスパンションジョイントでも杭打ち構造の実験棟・直線部と杭のないアーク部での境界にあるジョイントで床レベルの段差等の変形が最も顕著に現れている。エキスパンションジョイントの功罪について考えるよい機会となったとも言える。

参考文献

- [1] M.Masuzawa, "Next Generation B-Factories", Proceedings of the first International Particle Accelerator Conference in Japan, Kyoto, May 23-28, 2010
- [2] R.Sugahara et al., "KEK および Spring-8 における常地震動測定", KEK Report 2003-12, Feb. 2004 A
- [3] Y.Ohsawa et al., "Level and Height Survey of the KEKB Magnets after the East Japan Earthquake", Proceedings of the 8th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [4] T.Kawamoto et al., "Measurement of KEKB Tunnel Level", Proceedings of the 8th Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, Aug. 1-3, 2011
- [5] M.Masuzawa et al., "Survey of KEKB Magnets and Monuments for SuperKEKB", Proceedings of the 11th International Workshop on Accelerator Alignment in Germany, Hamburg, Sept. 13-17, 2010
- [6] M.Masuzawa et al., "Vibration Measurements in the KEKB Tunnel", Proceedings of the 8th International Workshop on Accelerator Alignment in Switzerland, Geneva, Oct. 4-7, 2004