

QCS 用移動架台の設計及び据え付け

DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE QCS MOVING STAGE

山岡広, 大澤康伸, 増澤美佳

Hiroshi Yamaoka, Yasunobu Ohsawa, Mika Masuzawa

High Energy Accelerator Research Organization

Abstract

The SuperKEKB project which is aiming for 40 times higher luminosity than that of KEKB accelerator is in progress at High Energy Accelerator Research Organization (KEK). At the interaction region, the QCS moving stage is installed to support the QCS magnet and some normal magnets. This QCS moving stage has to withstand against self-weight of 20 tons and the magnetic force of 7 tons, respectively. And also it is required to move 3.35m along the guide rail for the maintenance work. In this paper, it describes that design and construction of the QCS moving stage and floor improvement with self-leveling method to mount the moving stage, and also several kinds of test results are reported.

1. はじめに

本研究所では、7Gev の電子リングと 4Gev の陽電子リングから構成される周長 3km のドーナツ型衝突型加速器が設置されている。この加速器は KEKB 加速器と呼ばれ、現在、この加速器の更なる性能向上 (40 倍のルミノシティ向上) を目指して改良工事がおこなわれている。この計画が SuperKEKB と呼ばれる^[1]。ルミノシティ向上のため

には、ビームのサイズを小さくすると共に運転電流を増加させる事が必要となる。ビームサイズを絞るための機器が衝突点近傍にある QCS マグネットと呼ばれる最終収束超伝導 4 極電磁石である。

QCS マグネットは Figure 1 に示すように、QCS サポートフレームと呼ばれる支持フレームに取り付けられ、このフレームが QCS 用移動架台に支持される。また QCS サポートフレーム上には幾つかの常伝導電磁石が積載される。移動架台はこれらの重量

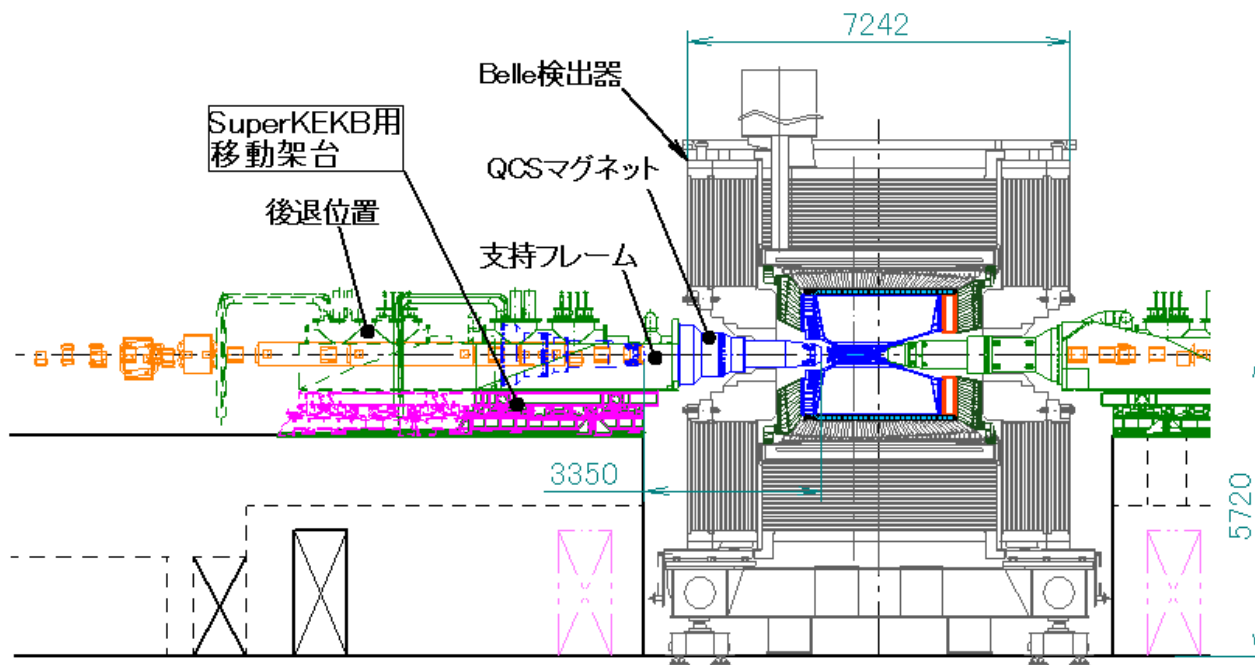


Figure 1: Layout of interaction region.

を安定に支持しなければならない。また、実験時(定常時)には、Belle 検出器に差し込まれたような状態に配置されるが、メンテナンス時は Belle 検出器の外側に後退する必要があるため、移動機構を設ける事でそれらを可能にしなければならない。又、

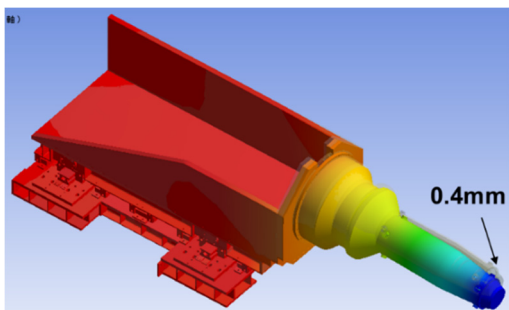


Figure 2: Deformation of QCS magnet due to self-weight.

- 外側方向 4000kg
但し、同時には作用しない。
(水平方向地震力)
- 0.3G

上記の荷重を考慮して各 부품のサイズやボルトの選定をおこなった。この時に用いられた設計基準は「鋼構造設計基準」である。構造解析を実施した一例を Figure 2 に示す。積載荷重及び自重を入力したときの垂直方向変位は QCS マグネット先端で約 0.4mm と計算された。応力は許容応力以下であった。メンテナンス時の QCS マグネットの移動は与圧式のリニアガイドを用いる事にし、この事により高精度の移動が可能となった。また電動/手動のどち

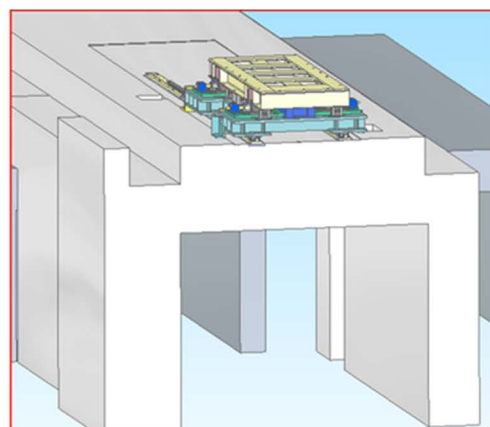
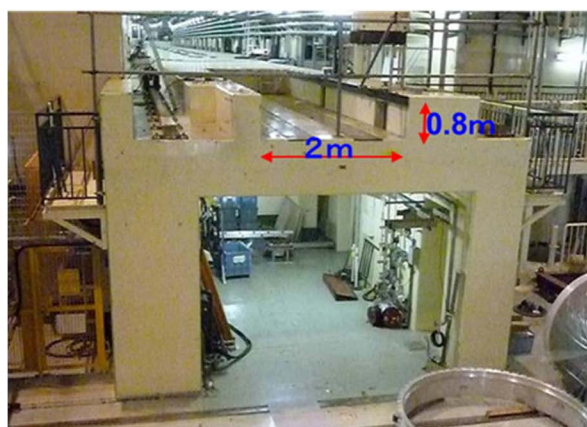


Figure 4: Floor improvement of concrete bridge.

ビームサイズが 50mm と非常に小さいため、各部品間やレールで生じるガタを排除して高剛性の構造をつくる必要がある。

2. 移動架台の設計

前述の通り移動架台の設計方針として、

- 積載されるマグネットを安定に支持できる事。
- メンテナンス時に移動架台が後退できること。
- 移動時には高精度にうごくこと。
- ガタを省いた高剛性・低振動システムであること。
- 詳細な位置調整ができること。

という方針を設定した。

荷重条件として

(垂直方向荷重)

- QCS マグネット重量 2500kg
- QCS 支持フレーム自重 10000kg
- 常伝導電磁石重量 4000kg
(軸方向電磁力)
- 内側方向 7000kg

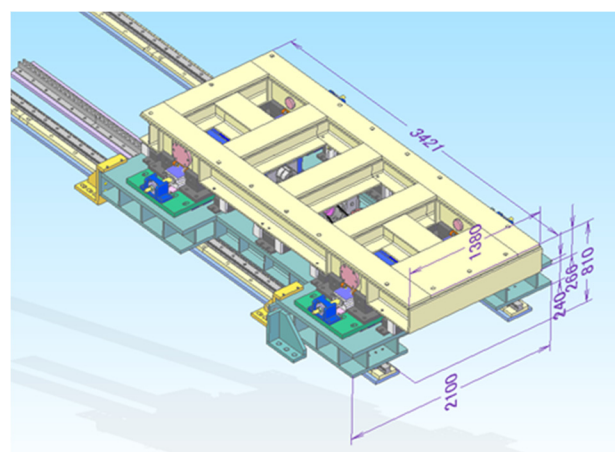


Figure 3: Isometric view of QCS moving stage.

らでも走行ができるようにした。電動による移動速度は 2m/min である。

構造物の定常状態でのガタを消去するために、移動架台は通常、床面の固定ブラケットに頑丈に固定しておくと共に、支持架台を止めている床面も後述

するセルフレベルング工法による超平坦度床を採用したことで、シムプレートを用いずにリニアガイドの敷設をおこなった。

移動架台の3D図を Figure 3 に示す。支持架台は H250 の H 鋼で組まれたフレームが上段と下段の 2 段構成になっている。2 段のフレームの間に位置調整が可能な機構及びモーターが組み込まれている。そして移動架台はリニアガイドに取り付けられ、レール上を 3350mm 電動または手動で移動できる構造となっている。

3. コンクリート架橋床改造工事

移動架台を設置する床は Figure 4 に示すように KEKB では約 800mm の深さの溝があり、ここに移動架台が設置されていた。SuperKEKB 用移動架台設置のためにはこの溝は不要なので鉄筋コンクリートでうめることにし、さらにその上面にセルフレベルング工法を用いた高平坦度床を施工する事にした。通常コンクリート床面に機械等を設置する場合、土台となるコンクリート面では平坦度約 10~20mm 程度あることから、機械面との間にシム等をいれて機械の平坦度をださなければならない。また、シムを入れる事によりすきまやガタが生まれてしまい、機械の振動特性に悪影響を生じさせることになる。し



Figure 5: Picture of self-leveling method work.

かし、セルフレベルング工法の場合、床面に特殊な樹脂をながすことで平坦度を 0.05mm/m 以下に抑えた超平坦度平面をつくる事ができる。このため、シム調整の手間を省略できると共に不要な隙間を排除することができる^[2]。

セルフレベルング床の施工 (Figure 6) では、厚さ約 7mm の特殊樹脂を流し込む事により、高平坦度の床面を製作しようとした。但しそのためにはあらかじめある程度の平坦度がでていないと効果が無いので、その前段階として樹脂コンクリートと呼ばれるコンクリートを鉄筋コンクリート上に約 20mm の厚さで施工した。このことにより平坦度 2mm 以下を確保し、この上にセルフレベルング床を施工した。しかし、施工後平坦度を測定したところ後述するように平坦度が許容値より大きくなってしまった。このためこのセルフレベルング床の上に再度施工した。再施工後は基準の平坦度をえることができた。

4. 各種試験

4.1 セルフレベルング床平坦度測定

前述したようにセルフレベルング床施工は 2 度おこなわれた。平坦度の測定は 1 等水準レベル WILD-N3 とレーザートラッカーでおこなわれた。2 回目施工後の測定結果を Figure 6 に示す。このデータはレーザートラッカーで測定されたものである。1 回目の測定では長さ約 4 m あたり平坦度が 0.4mm と測定され、これは基準値 0.05mm/m に対して

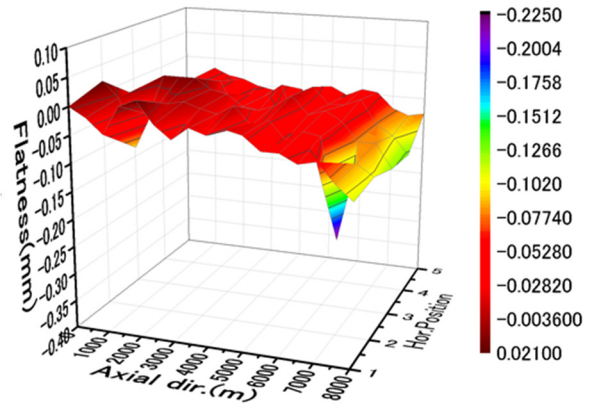


Figure 6: Measurement result of flatness of the floor after self-leveling work.

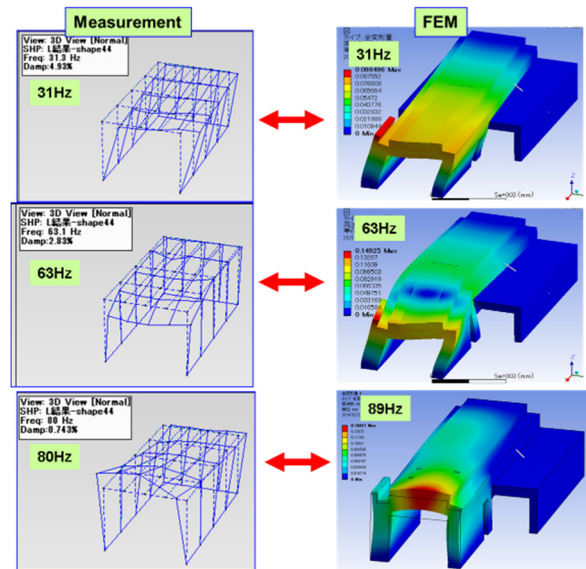


Figure 7: Comparison with natural frequencies between measurement and calculation.

0.1mm/m となってしまった。これは下地の樹脂コンクリートの平坦度が基準値 ($\pm 2\text{mm}$) より大きかったのではないかとと思われる。

このため 2 回目施工では 1 回目のセルフレベルング床の上に再施工した。この結果、平坦度は約 0.1mm 以下に抑える事ができた。

4.2 コンクリート架橋のモーダル試験

モーダル試験とは構造物を加振することで対象の構造物の固有振動数やモードシェープを実験的に求める試験である。架橋部上部の溝を鉄筋コンクリートで埋めたことと架橋部側面の開口部を塞いだことから振動特性が改造前と変わったと考えられる事からモーダル試験を実施する事にした。一般的なモーダル試験の試験手法としては、ハンマーを用いてインパルス加振し、そのときの応答を加速度センサーで測定し固有振動数とモードシェープを求める。しかし、今回は対象物が大きすぎてハンマー加振できない事から別の手法 (Operational Modal Analysis) を用いておこなうことにした。この手法は加振ハンマーを用いるのではなく、高精度のサーボ式加速度計を用いた。任意の点1点を入力側加速度として床面の振動を測定し、他の場所での床面振動を応答加速度として測定した。この (応答/入力) の関係から固有値とモードシェープを求めた。つまり加振源はコンクリート架橋の常時微振動である。また、FEM の固有値解析を実施し、測定値と計算値を比較した。

試験結果を Figure 7 に示す。1次モードは水平方向の横揺れで 31Hz と測定された。2次モードは水平方向の曲げモードで 63Hz、3次モードは 81Hz の縦方向と測定された。FEM の結果と比べてみるとほぼ一致した結果が得られた。3次モードでの測定値が低いのは実際の剛性が計算より低いためと思われる。

4.3 荷重重負荷試験

工場における仮組みの際、最大 10 トンの荷重を

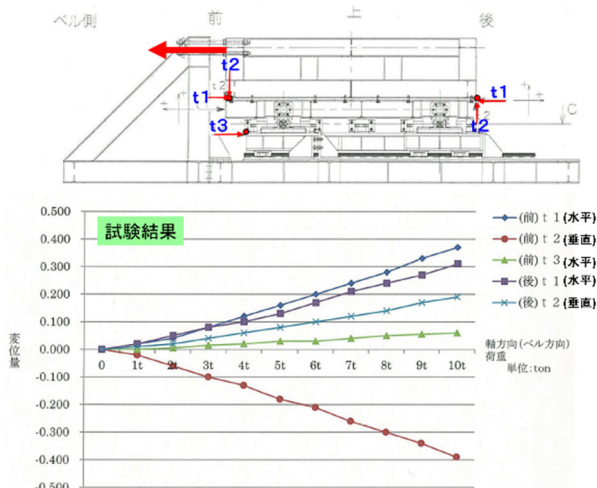


Figure 8: Result of strength confirmation test.

負荷し、移動架台に問題が起きないか試験した。移動架台の上部フレームの前部と後部にそれぞれ水平方向と垂直方向にダイヤルゲージを取り付け、更に下部フレームの前方側にも取り付けた。この状態で移動架台に 1 トン毎に荷重を負荷していき、そのときの荷重と変位の関係を測定した。また、荷重負

荷状態のとき、各部に異常な変形や曲げが無いチェックした。

試験結果を Figure 8 に示す。グラフを見ると負荷荷重に対して変位がほぼ直線的に増加しているため、永久変形は生じていないように考えられる。又、低荷重時でも急激な変位の増加が無い事から初期ガタは非常に小さいと考えられる。

最大 10 トンの荷重をかけたときの変位は 0.38mm 程度で、このことから軸方向電磁力 7 トンがかかったときは 0.23mm 程度の変形がおきると予想された。

4.4 移動架台の固有振動数測定

移動架台の据え付けが完了した後、架台の固有値測定と高感度振動計を用いた振動測定がおこなわれた。

この測定では対象物の大きさから加振ハンマーと

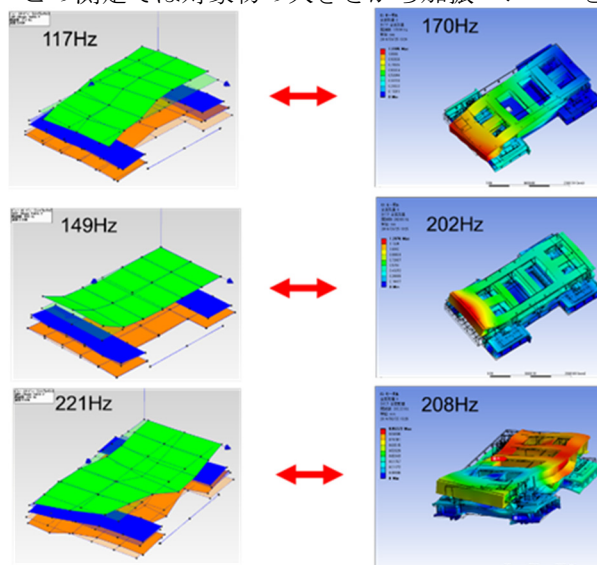


Figure 9: Comparison with modal test.



Figure 10: Completion of QCS moving stage

3 方向の加速度計が用いられた。入力として任意の 1 点をハンマリングし、3 方向の加速度センサーを応答側として各部を移動していった。高感度振動測定では床面と移動架台での振動を測定し、互

いの相関を測定した。

固有値の測定結果を Figure 9 に示す。1 次モードは測定値では 117Hz で計算では 170Hz である。モードとしては上部フレームの水平方向のまげであった。2 次モードでは上部フレームの縦モードで測定値が 149Hz、計算値が 202Hz である。3 次モードでは測定値と計算値はそれぞれ 221Hz と 208Hz 測定された固有値は計算値となった。双方を比べてみると測定値が若干低く計測されたが、これは計算では上部フレームと下部フレームとの間にあるサポート部材が完全に効いていないためと考えられる。また 1 次モードが 100Hz 以上であることから、支持架台は隙間やガタの無い剛構造であるといえる。

5. まとめ

QCS 移動架台は QCS マグネット及び常伝導電磁石を支持するために製作された。設計にあたっては機械的強度を満足させると共に高精度・高剛性が要求された。このため、リニアガイドを用いた移動システムとセルフレベルリング工法を用いた高平坦度床を採用した。平坦度については 1 等水準レベルとレーザートラッカーで測定され、約 0.1mm 程度の平坦度である事が確認された。また、コンクリート架橋の特性についても測定され、計算での想定とよくあっている事がわかった。移動架台の剛性について実際に荷重を负荷した試験がおこなわれ、特に問題がない事が確認された。

以上の事から Figure 10 に示すように QCS 移動架台は設計通りに製作・据え付けがおこなわれたということがいえる

参考文献

- [1] H. Koiso, K. Akai and K. Oide, "Design Progress and Construction Status of SuperKEKB", TUPPR006, Proceedings of IPAC12, New Orleans, USA, May 20-25, 2012.
- [2] H. Kimura et al., "Evaluation of High Precision Flat Floor Surface by Epoxy Resin", WEPS134, Proceedings of the 9th Accelerator Meeting in Japan, Osaka, Aug. 8-11, 2012.