

SPring-8-II のための共通架台の試作

DEVELOPMENT OF PROTOTYPE COMMON GIRDERS FOR SPRING-8-II

青木毅^{#, A)}, 安積則義^{A)}, 岡安雄一^{A)}, 木村洋昭^{A, B)}, 深見健司^{A, B)}, 渡部貴宏^{A, B)}, 松井佐久夫^{B)}

Tsuyoshi Aoki^{#, A)}, Noriyoshi Azumi^{A)}, Yuichi Okayasu^{A)},

Hiroaki Kimura^{A, B)}, Kenji Fukami^{A, B)}, Takahiro Watanabe^{A, B)}, Sakuo Matsui^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI)

^{B)} RIKEN SPring-8 Center

Abstract

In the SPring-8-II upgrade plan, alignment precision higher than that of SPring-8 is required between magnets and common girders respectively. In order to achieve the required alignment accuracy, we made prototype girders that have high rigidity and high natural frequency and ease of alignment compared with the existing common girders. Considering the suppression of the replacement cost of the accelerator and the short shutdown period, we decide that the common girder is installed on the self-leveled resin floor. The prototype girders were manufactured by different welding methods and height adjustment mechanisms, and performance and cost effectiveness were evaluated. In the performance test, the optimum material and welding method were selected by comparing the measurement result of deformation and natural frequency with the simulation. Usability of the position adjustment mechanism was evaluated by performing alignment the girders of prototype half-cell for SPring-8-II. In this paper, we report the design, production and performance evaluation of prototype common girders.

1. はじめに

SPring-8-II アップグレード計画では電磁石間およびそれらを積載する共通架台間において現状よりも高いアライメント精度が要求される[1]。我々は必要な設置精度が達成できるよう、現状の共通架台と比較して高剛性でかつ高い固有振動数を有し、アライメントの容易さを考慮した試作機を製作した。加速器のリプレース費用の抑制と約1年と短いシャットダウン期間を考慮し、架台の基本設計はベースプレートとしてセルフレベルリングされた樹脂床[2]に設置することを前提としている。試作機は溶接方法や位置調整機構について異なる方式を複数台製作し、性能及び費用対効果を評価した。性能試験ではダミーウェイトによる変形量や固有振動の測定結果をシミュレーションと比較することで最適な材質や溶接方法を選定した。試作架台は SPring-8-II 用試作ハーフセルの架台として用いられ、架台上の多極電磁石は実機での採用が予定されている Vibrating Wire Method [3] (以下 VWM と略す) でアライメントを実施した。架台間アライメントはレーザートラッカーと水準器を用いて実施し、所要時間や位置調整作業の容易さを評価した。本論文では、共通架台試作機的设计・製作の状況及びその性能評価結果について報告する。

2. 開発設計

2.1 概要

回折限界での低エミッタンス高輝度放射光源を目指す SPring-8-II では理想的なビーム軌道をより高精度で

実現する必要がある。現状の SPring-8 に比べ高い精度で電磁石をアライメントしなければならない。偏向磁石間に位置する多極電磁石群は床の位置変動に対して相互の位置ずれが極力少なく滑らかに接続されるように共通架台上に設置される。アライメント精度はビームダイナミクスおよびコミッションングの観点から、架台上の磁石間で $\pm 15\mu\text{m}$ 、共通架台間で $\pm 90\mu\text{m}$ を目標値とする。試作する共通架台ではこれらのアライメント精度が容易に達成できるよう、現在稼働している SPring-8 の共通架台で経験した短所の改善と新規に実施する VWM によるアライメントに対応可能な仕様の検討を行った。

2.2 構造と形状

上記アライメント精度を低コストで達成できるよう、架台の基本構造とおおまかな形状を検討した。

- 架台のサイズ
多極電磁石はボア径が小さくなり現状よりも小型化されるため、架台天板の高さを高くする必要がある。電磁石サイズ設計値より床から天板までの高さを 800mm、架台幅を 700mm とした。高さ 320mm の分離式の脚部により支持することで架台本体の軽量化も実現する。
- 架台本体の支持点数
支持点数を現状の 6 点から 4 点に変更する。これにより床の変動による架台変形が抑えられると同時に架台間アライメント時の位置調整が容易になる。
- 軽量化
すべての磁石を積載した時の重量を 5t 以下とする。VWM による電磁石の精密アライメント終了後、トンネル内に搬入して据え付けを実施する。使用可能なクレーンの耐荷重が 5t と全重量が制限される。
- 溶接方法

[#] aoki@spring8.or.jp

本体は低コストで剛性の高いボックス構造とする。製缶の際の溶接方法による剛性を確認するため、隅肉溶接(連続、全周溶接、材質 SS400)と完全溶け込み溶接(材質 SM490A)の比較を行い、それぞれの剛性と製造コストを比較し費用対効果の高い方を選択する。

- 通気口
架台下に敷設される電磁石用ケーブルが熱源となるため、通気口を設けてボックス構造の架台内部に熱がこもらないようにする。通気口は同時に軽量化にも寄与することになる。

2.2 特性

上記の構造と形状を条件としてシミュレーションを行い、実現可能と思われる架台の特性を調査した。構造計算には ANSYS[4]を用いた。

- 高剛性化
支持点を 4 点とするため、荷重時のたわみをできるだけ少なくする。トンネル内の設置場所までの移動時も架台の変形による電磁石の位置変動を抑える。シミュレーションの結果、全電磁石荷重時の最大たわみ量の目標値を 50 μ m 以下とする。
- 固有振動数
固有振動数が高いほど剛性が高く、外部加振による振動振幅が小さくなり振動の減衰が速い。シミュレーションにより一次の固有振動数を検討した結果、架台単体で 110Hz 以上を目標値とする。

2.3 位置調整機構

高さ方向(y 方向)の調整において、現状の SPring-8 の共通架台ではレベリングブロックを用いた調整機構は水平方向の位置へのカップリングが生じるため採用していない。ただし、レベリングブロックでは位置の微調整が容易なことや狭い場所での調整の容易さなど高精度化に有利な点が多いため、実際に試作を行い従来のボルト式との比較を行う。

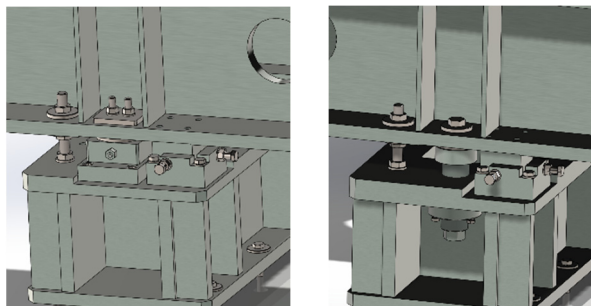


Figure 1: Structural drawing of position adjustment mechanism. Left: Leveling block type, Right: Bolt type.

Figure 1 に各方式の構造図を示す。ボルト式の高さ調整機構では、狭い場所でのボルト・ナット締め付け時に通常のトルクレンチが使用できないため、3 本の小型ボルトによる高さ調整ボルトの固定機構を考案した。また、蓄積リング棟の収納部床面レベルの高低差は ± 25 mm あり、調整範囲 ± 6 mm のレベリングブロック式ではスペーサー等の工夫が必要になる。何れも水平方向の調整は

横方向(x 方向)、長手方向(s 方向)それぞれを押しボルト(M16, P1.5mm)にて行うオーソドックスな方式とする。

2.4 樹脂床

共通架台固定用の従来の金属ベースプレートは既設のものと干渉するため新規に設置できない。そこで架台脚部を設置する床の上にエポキシ系樹脂床(アルファ工業社 アルファテック AT150、厚さ 6mm)を施工して固定することとした。樹脂床はセルフレベルングされているため架台支持部の球面ワッシャーが省略でき、構造を単純化することが可能である。さらに樹脂床と脚部の密着性が増すことで架台の固有振動数の低下の防止、振動の速い減衰などの架台の振動特性の改善が期待できる。

3. 架台の試作

2016 年に初期試作架台にて性能評価試験を開始している。主な仕様は、全長 4.260 [m] 幅 700mm、高さ 800mm、材質 SS400 をすみ肉溶接で接合し、高さ調整には細目ボルト(M64, P2mm)を使用する。この初期試作架台の仕様と前項で決定した仕様を元に SPring-8-II のノーマルセルで使用する 3 種類の共通架台を製作した。Figure 2 にハーフセルにおける磁石と架台の配置と各共通架台の形状を、Table 1 に各架台の主な仕様を示す。溶接方法や高さ位置調整機構の違いによる性能評価のため、各架台は異なる仕様にて製作を行った。ただし A 架台と C 架台は長さ以外の仕様は同一である。

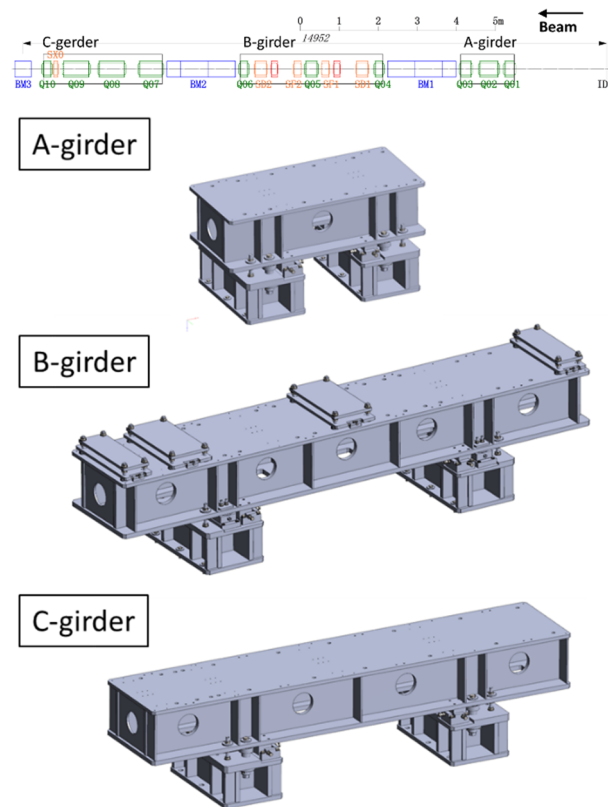


Figure 2: Layout of magnets and girders in Spring-8-II half cell (upper) and the shape of each girder (lower).

Table 1: Specification of Prototype Girders

	A 架台	B 架台	C 架台
全長 [m]	1.537	3.724	3.290
溶接	すみ肉	完全溶込み	すみ肉
材質	SS400	SM490A	SS400
高さ位置	ボルト	レバリング	ボルト
調整機構	(M64,P2)	ブロック	(M64,P2)
コスト	低	高	低

4. 特性試験

4.1 荷重による変形

すみ肉溶接と完全溶け込み溶接による試作架台の中央にダミーウェイト(四極電磁石)を載せ、変形量(垂直のたわみ)を比較し剛性を評価した。たわみの調査は A, B, C 架台以前に試作した初期試作架台でも行っており、初期試作架台の仕様は全長が 4.260 [m]であること以外は A, C 架台と同一である。Table 2 に各架台の実測と計算の比較結果を示す。ダミーウェイトを架台中央に設置し、垂直方向の架台の最大たわみ量を架台左右に設置したダイヤルゲージで測定した。すみ肉溶接(初期試作架台)の場合、計算値よりもたわみの実測値は小さく、完全溶け込み溶接として計算したたわみ量に近い値が得られた。完全溶け込み溶接(B 架台)では計算結果と同等の実測値が得られた。

Table 2: Measurement Value and Calculated Value of Deflection of Initial Prototype Girder and B-girder

	初期試作架台	B 架台
全長 [m]	4.260	3.724
溶接	すみ肉	完全溶込
負荷荷重 [kg]	1000	880
たわみ [μm]	21.0 (左)	8.0 (左)
(実測値)	23.0 (右)	9.0 (右)
たわみ [μm]	33.9 (すみ肉)	9.0
(計算値)	24.0 (完全溶込み)	

完全溶込み溶接では溶接部の割れや融合不良などの欠損が生じる可能性が高く、溶接性の良い材質を選択し溶接後に超音波探傷試験にて欠損面を確認する必要があるため製造コストが高額となる。いずれの方式も溶接後は焼鈍により残留応力の除去を実施するが、完全溶込み溶接の方が初期の残留応力が大きく、形状のひずみや経年変形の影響は大きいと考えられる。すみ肉溶接は完全溶込み溶接に比べ安価なコストにもかかわらず同等の剛性が得られているため、費用対効果が高いと判断した。

4.2 固有振動数

樹脂床の有無による架台の振動特性調査を実施した。その測定結果を計算結果と比較し、シミュレーションにおけるモデリングの条件設定の妥当性を確認した。固有振動の測定はハンマリングによる周波数応答を観測した。センサには速度計 (Geospace 製 Geophone GS-11D, 感度: 1V/cm/s)、インパルスハンマ(小野測器製 GK-3100)を用いて FFT アナライザ(小野測器製 DS-2000A)にて信号処理を行った。Figure 3 に A 架台の1次固有振動数の測定結果を示す。赤線は通常の床においてシムプレートにより架台脚部のレベル調整をして設置した場合、青線は樹脂床上に設置した場合の周波数応答測定結果を示す。樹脂床への設置により固有振動数は 20Hz 以上高くなっている。

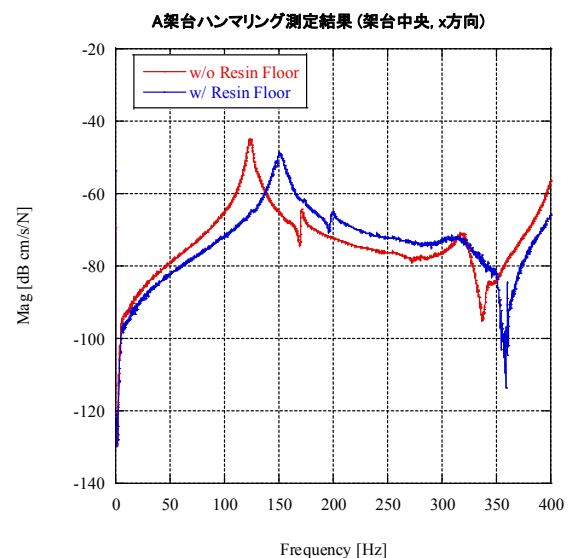


Figure 3: Measurement result of primary natural frequency in x-direction of A-girder.

シミュレーションでは架台脚部と本体の 4 点支持部の接触条件(特に摩擦係数)により固有振動数が大きく左右されることがわかっている。実測値は接触条件が「完全固定」と「摩擦係数ゼロ」の間にあり、両者が一致するように摩擦係数を設定することは可能であるが、現実的な摩擦係数からかけ離れた評価となるため本報告では計算結果は摩擦係数を考慮しない接触条件でのシミュレーション結果を示す。架台本体の支持部にはすべり支承(摩擦係数 0.2 以下)が採用されており、3t 以上の本体を支持し、ボルト締結により 6t 以上の軸力で固定されているため接触条件を「接触部は分離しないが横滑りは可能である」とした場合の計算結果である。

Table 3 に A 架台の 1 次固有振動数の計算値と測定値の比較結果を示す。何れも樹脂床上への設置の方が高い固有振動数となり、樹脂床での計算値は実測に近い値が得られた。樹脂床と脚部との密着性の高さが総合的な剛性を高めているのと、シミュレーションのモデリン

グが単純で実機の設置条件と良く一致する事がそれらの原因であると考えられる。通常床の場合はシムプレートにより脚部と床の密着性が低く、不均一な接触状態のモデリングがしづらいためと考えられる。以上の結果は実機の振動特性においてもシミュレーションのモデリングを行う上でも樹脂床の優位性を示している。

Table 3: Comparison of Measured Value and Calculated Value of Primary Natural Frequency of A-girder

	通常床に設置 (シムプレート有)	樹脂床に設置
計算値 [Hz]	142.5	150.3
測定値 [Hz]	123.5	151.0

5. 試験用ハーフセルにおけるアライメント

B, C 架台上の電磁石については VWM による電磁石の精密アライメントを実施し、SPring-8-II での目標値である $\pm 15\mu\text{m}$ 以内での設置精度を確認した。2018 年 4 月にアライメント済みの電磁石を積載した B, C 架台を蓄積リング棟実験ホール内の試験用ハーフセル設置場所へ移動した。Figure 4 に試験用ハーフセルに設置された B, C 架台を示す。移動作業は屋外の移動を伴うため、エアサス付き大型トラック、移動式クレーン車、チルローラー、ハンドパレットトラックを用いて実施した。移動時には架台上の磁石上面に加速度計を取り付けて作業を行ったが、最大加速度は水平方向に 0.35G であった。この外部加振による磁石位置の変動量については現在確認中である。



Figure 4: B-girder and C-girder installed at the test half-cell in the SPring-8 experimental hall.

7 月に A, B, C 架台の 3 台について架台間アライメントを実施し、ボルト方式とレベリングブロック方式による高さ調整機構の比較を中心に、要求される架台間位置精度の達成度について評価を行った。共通架台のアライメントはレーザートラッカーにて架台両端に設置されている

四極電磁石の基準点を測量しながら各架台の位置調整を行った。結果は A, B, C 架台共に目標精度である $\pm 90\mu\text{m}$ 以内の $\pm 50\mu\text{m}$ 程度で調整可能であった。ただし、レベリングブロック方式の B 架台では、高さ調整時に水平方向(x 方向と s 方向)へのカップリングが生じること、高さ調整直後から時間遅れを伴い位置が変化することが確認された。現段階ではボルト方式と比較して調整に時間を要し、ある程度の慣れが要求されるため改善が必要である。

6. まとめと今後の予定

SPring-8-II で使用する共通架台の試作を行った。脚部の支持機構は既存の SPring-8 共通架台とは異なる 4 点支持として、床変動の影響が少なく架台間アライメント時の位置調整が容易な構造とした。また、主要な鋼板を全周すみ肉溶接とすることで、剛性を低下させることなく低コストで製作が可能であることを確認した。ベースプレートには樹脂床を採用し、そのセルフレベリング性と架台脚部との密着性の高さにより、架台の構造の簡略化と同時に優れた振動特性が確認された。試作架台は SPring-8-II 試験用ハーフセルに設置して共通架台間アライメントを行った結果、所望の架台間位置精度が達成できることを確認した。共通架台本体の高さ位置調整機構はボルト方式、レベリングブロック方式の異なる機構の比較検討を継続し、実機ではより優れた方式を選定する予定である。

各電磁石の精密位置調整については VWM によるアライメントにより目標の精度を達成できることを確認した。今後は電磁石積載状態での架台移動作業後の磁石位置再現性を確認し、必要に応じて改善を試みる予定である。さらに架台上の電磁石の振動特性について、真空ダクトの組み込み後に冷却水循環による振動の影響を評価する予定である。

謝辞

本研究は主に理化学研究所予算による研究成果である。

参考文献

- [1] H. Tanaka *et al.*, “SPring-8 Upgrade Project”, Proc. of IPAC2016, Busan, Korea, p.2867-2870.
- [2] H. Kimura *et al.*, “Evaluation of High Precision Flat Floor Surface by Epoxy Resin”, Proc. of the 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, WEPS134, Toyonaka, Japan, 8-11, Aug, 2012, p814.
- [3] K. Fukami *et al.*, “Estimation of Magnet Alignment Accuracy for SPring-8 Upgrade using Resonance-Frequency Tracked Vibrating Wire”, Proc. of IWAA2016, Grenoble, France.
- [4] <https://www.ansys.com>