

SPring-8 蓄積リングにおけるエクspansionジョイントの振動減衰効果の調査 INVESTIGATION OF VIBRATION ATTENUATION BY EXPANSION JOINT IN THE SPring-8 STORAGE RING

松井佐久夫[#]
Sakuo Matsui
RIKEN

Abstract

The expansion joint is made for the separation between building and tunnel in the SPring-8 storage ring. This expansion is useful for not only slow movement but also vibration. A 40cm deep expansion is cut between cooling machine room and maintenance path. This expansion reduced vibration amplitude by 5~10 dB and is found to be valid. The phase difference by expansion makes complex changes with frequency. The phase velocity is measured to be about 1 km/s. The vibration of machine room seems to travel through the 40 cm slab because the soil under the slab is soft.

1. はじめに

エクspansionジョイント(以後 Exp.)は通常、構造的に分離するが適当なつめもので接続され、熱や地震による変形を伝えないようにするために、土木や建築の分野で用いられている。SPring-8 でも PF の経験から日射の熱変形を収納部に伝えないよう Exp.が設けられている。しかし加速器にとってはゆっくりした変形だけでなく機械的な振動も障害となる。放射光リングの場合は通常全周に光源があるため、全周で振動の抑制が必要となる。

SPring-8 の蓄積リングの場合、設計時には防振のランクを決めるためにポンプの加振力を想定し、床は一枚のスラブで仮定し振動の評価を行っている[1](Fig. 1)。アドミッタンスは理論から計算し、伝播による減衰は Exp.では 5 dB、距離では水平と垂直でそれぞれ係数を仮定し、周波数ごとの収納部床の振動振幅まで求め、0.1 μm 以下に収まることをグラフで示している。

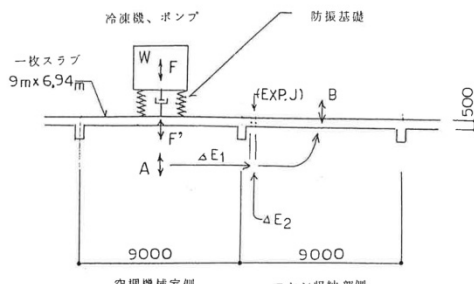


Figure 1: Model for simulation in the reference 1.

収納部の床の振動は冷却水用のポンプが設置されている 4 カ所の機械室に近いエリアが大きいこと、また、伝搬経路として配管ではなく床面が主であることを報告した[2]。しかし、機械室と収納部の間には 2 カ所に Exp.が設置されており、その両側で振動の減衰があることは確認していたが正確な調査はこれまでなされてこなかった。

[#] matsui@spring8.or.jp

加速器の収納部は重くそのため高い周波数は大きな振幅にはならない。このことも考慮し SPring-8 の床という特定の構造ではあるが、今後の加速器建設の参考に Exp.での減衰を調査した。

2. エクspansionの位置と構造

SPring-8 蓄積リングの場合、約 1/4 は地盤改良が施されている。全周 4 カ所の冷却機械室 A~D の位置は Fig. 2 のとおりである。B と D の機械室は硬岩上のエリアにある。A と C は改良地盤(周辺の岩の動弾性係数に近い値が実現されている)に近い。

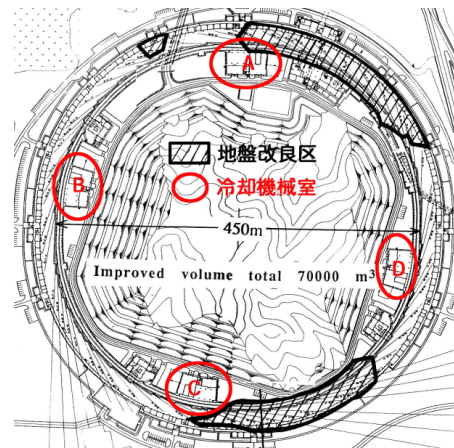


Figure 2: Machine rooms and ground improved area.

このような地盤の上に立っている冷却機械室、ポンプ、Exp.の位置と収納部までの断面を Fig. 3~5 に示す。収納部の床、壁、天井は厚さ 1 m のコンクリートでその外側に深さ 1 m の Exp.が施されている。リングの通常の所は床の厚さ 60 cm の保守通路があり、その外は屋外となるが、冷却機械室があるところには機械室との間に床の厚さ 40 cm 幅 2.5 m 程度の空間がある。ここに今回の調査の対象である深さ 40 cm の Exp.が施されている。充填剤にはアスファルトが使用されている。40 cm のスラブの下は 5 cm の捨コンと 5 cm の砂利、その下造成された地盤まで 70 cm 土の層がある。



Figure 3: View of machine room and expansions.

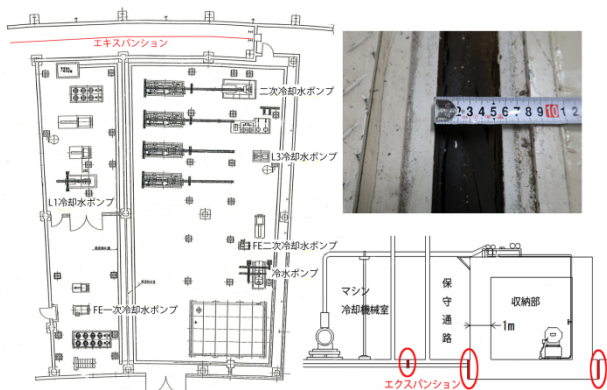


Figure 4: (Left) Positions of pumps. (Right up) Photo of expansion. (Right down) Cross sectional view.

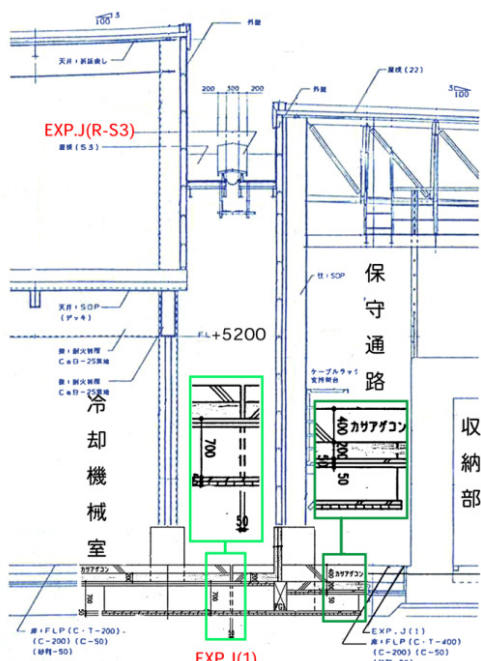


Figure 5: Cross sectional view of cooling machine room, expansion, maintenance path and tunnel.

屋根には床の Exp.の真上にゆるく接続されている構造がつけられている (Fig. 5)。また、ここを通っている冷却水配管の途中にはゴムの部分があり、金属部が直接つながらている構造にはなっていない (Fig. 6)。



Figure 6: Rubbers for vibration isolation are inserted in the middle of cooling pipe.

3. 測定

3.1 センサー

通称ジオフォン (動コイル速度出力タイプ) HS-1 (Geospace 社製 固有振動数 2 Hz、2 V/inch/s) 固有振動数付近で出力がやや大きくなるが、抵抗はつながらず、ハイインピーダンスのまま ADC に入力した。

水平成分用 2 個、垂直成分用 1 個計 3 個を 1 枚のアルミの板上に固定した。このため 1 個ずつ床に固定するのにくらべわずかに周波数特性が変化するが今回の測定では無視できる程度であった。

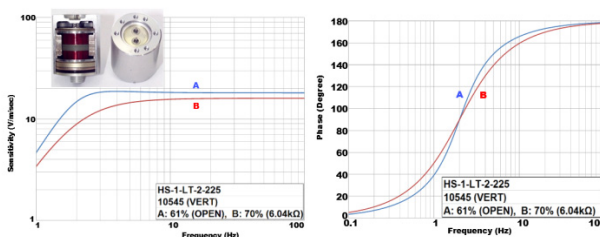


Figure 7: Frequency characteristics of HS-1.

3.2 ADC

多チャンネル FFT Graduo ((株)小野測器製) 12 チャンネル、分解能 24 ビットを使用した。サンプルレートは通常稼働時 640 /s、加振テスト時 1024 /s、波の速度測定時は 12800 /s で各ファイル 30 秒間測定した。電源は自動車用 12 V のバッテリーを使用した。

3.3 校正

Figure 8 のようにセラミックの定盤上にセンサー 3 セットを置き、測定した。結果は Fig. 9 のように z 方向の一部で少し差があるものの 4 セットともほとんど同じでセンサー、ADC とも問題ないことを確認した。

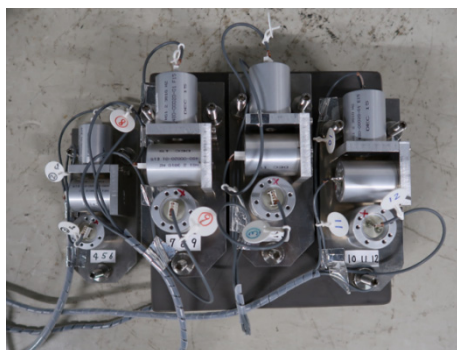


Figure 8: The sensors on the ceramic plate for calibration.

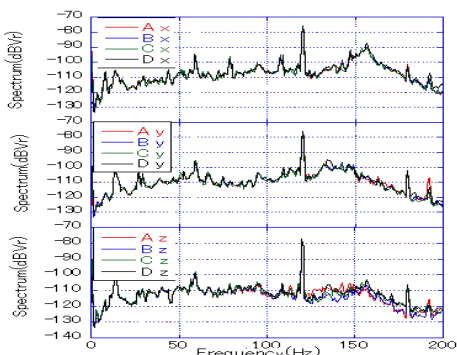


Figure 9: The sensitivity check of twelve sensors.

3.4 測定箇所

振動の向きは Fig. 10 のように水平方向は Exp. に垂直に x、平行に y、上下方向を z とした。

通常の加速器稼動状態では冷却水用、空調用ポンプが両方稼動しており Exp. を挟んで両側に 25 cm 間隔で 4 箇所 (3 成分×4=12 ch) 設置し測定した (Fig. 10)。次に

50 cm、y 方向に移動後、同様に測定し、各ゾーン Exp. がある 40 m 程度測定した。

砲丸を用いた加振測定は、加振力が弱いので冷却水用ポンプが停止している期間に実施した。空調用ポンプは簡単には止められないので稼動中となった。

伝播速度の測定の場合は Exp. に沿った細長いエリアで床上に砲丸を落下させた (z 方向加振)。

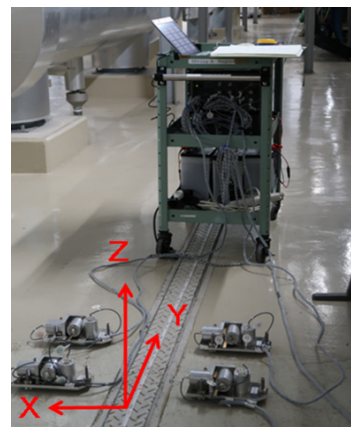


Figure 10: Measurement wagon and sensors on the floor.

4. 測定結果

4.1 Exp. の減衰効果 (通常稼動時)

ゾーン 3 成分で上段に機械室側の振動 (速度) スペクトル、下段に Exp. により減衰した保守通路側との差、これらに対数 (dB) 色グラフで作成した。ゾーンにより大きな差がなくここでは Fig. 11 左に Cゾーンの例を示す。横軸の位置は Fig. 3 に示している。減衰は広く 0 ~ -5 dB の緑が占め、さらに -5 ~ -10 dB の緑青があり、わずかに -10 ~ -15 dB が認められた。

上段 z 方向、下段 x 方向でスペクトルが、6、13、20、27 m 付近で大きく、7 m 間隔になっている。これらは各通り芯の中央付近の位置であり、通り芯が振動の節になっている。また、2、4、11、13 m の位置には Exp. の真上高さ 5 m または 3 m 付近に冷却水配管が x 方向に通る、壁

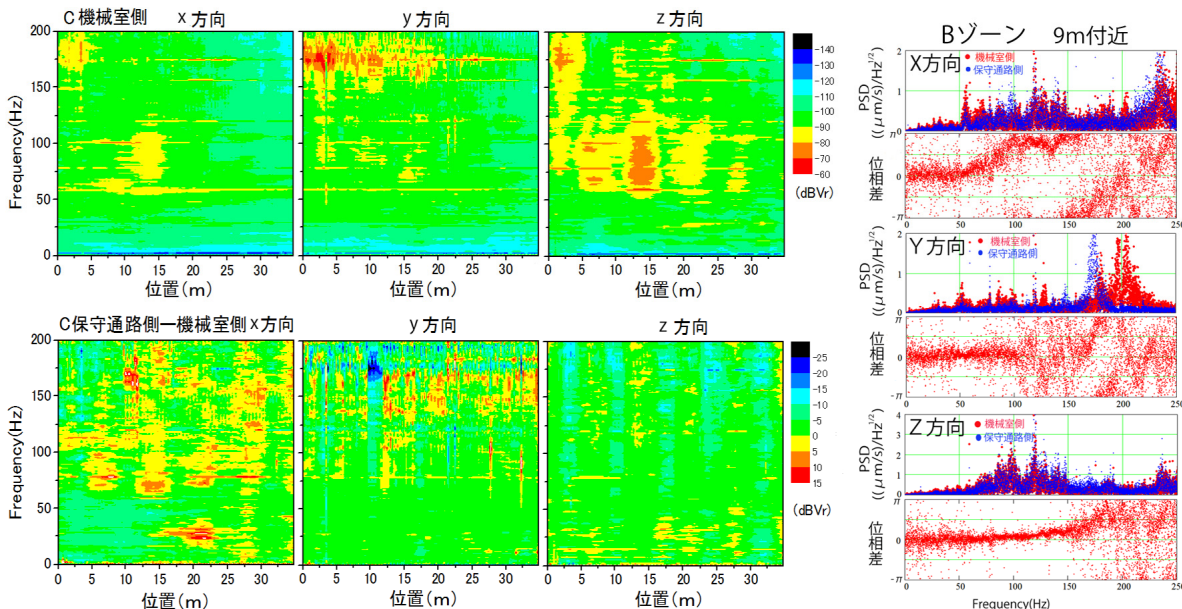


Figure 11: (Left) PSD of the floor vibration near the machine room and the attenuation rate through expansion. (Right) Spectra and phase difference of both sides through expansion in the three directions.

を貫通しており、さらに 17.4 m と 20.8 m の位置には配水管のサポートが壁に固定されている。下段の x 方向で機械室側より保守通路側の振動の方が逆に大きくなっている場所が見られるが、この配水管の x 方向の振動が壁に伝わり、さらに床まで伝播していると考えられる。

同図右は B ゾーン 9 m 付近で Exp. の両側でのスペクトルと振動数毎の位相差を示している。例えば x 方向で 100~140 Hz では両側は逆向きに振動している。Exp. を超えない同じ機械室側ではこのような位相差の変化は見られない。この状況は同じゾーンの中でも場所によりかなり異なっていた。z 方向は同位相での振動が主だが図のように 200 Hz 位では逆位相が見られる場合もあった。

4.2 Exp. の減衰効果 (加振テスト時)

空調用のポンプは稼働中だが冷却水のポンプは停止している時期に各ゾーン 2 か所で、Exp. を挟んで 7.26 kg の砲丸による加振テストを行った。機械室側と保守通路に近い側で、上から落とす z 方向、壁を x 方向に打つ、高さ 90 cm のコンクリートのベースの部分に y 方向に打つなどし、そのときの振動 (速度) 波形をフーリエ変換 (窓関数: レクタングル) し、4.1 と同様に減衰を計算した。Figure 13 に Exp. の両側での 3 成分の時間波形とフーリエスペクトルを示す。サンプルレートは 1024 /s だが 0.12 s 程度しか継続しないので 128 個でフーリエ変換している。

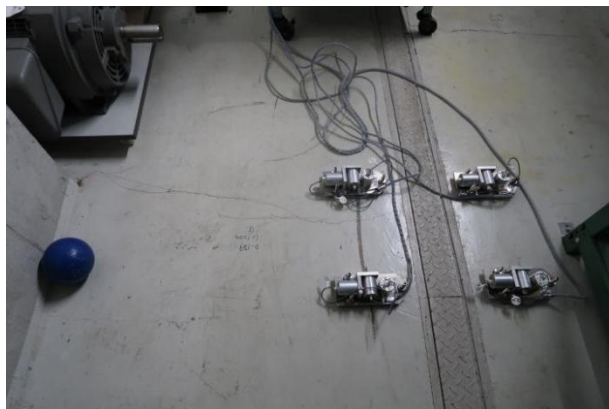


Figure 12: Hammering test by cannonball.

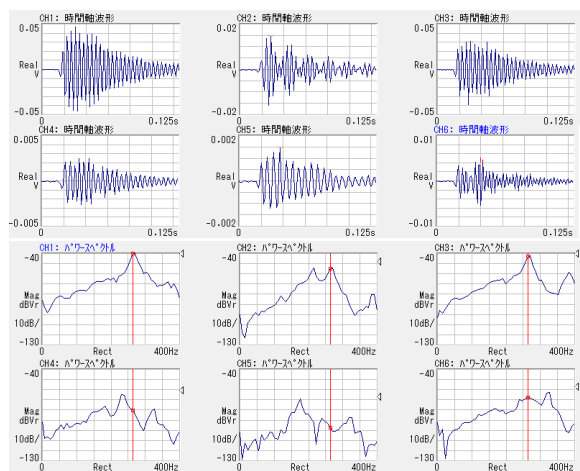


Figure 13: Results of hammering test.

従って周波数は 8 Hz ごとの値となる。200 Hz を越したところにピークがある場合も多く、スペクトルは 400 Hz まで示した。

今回砲丸は手で落とすとか打ちつけているが、スペクトル、減衰とも再現性に問題はなかった。

Figure 14 は機械室側で加振の向きを変えた 3 つの例で、青線はスペクトル (左軸) を、赤線は Exp. による減衰 (右軸) を示している。各サイドのセンサー 2 個は細い線

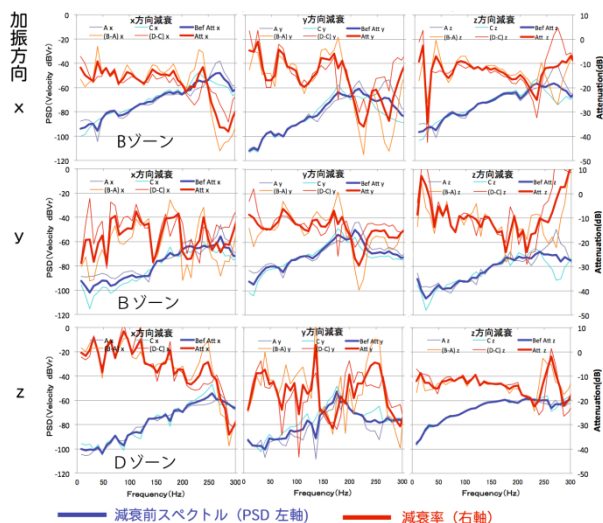


Figure 14: Spectra and expansion attenuation using hammering at machine room side.

で、太い線は平均した値を示している。

ゾーンによる差は 4.2 の結果と同様、顕著ではなく減衰はおおむね 5~10 dB 程度と見積もれる。

Figure 15 は Fig. 14 とは逆に保守通路側の床を加振した場合である。10 dB 程度の減衰が見られるところもあったが Fig. 15 の下段のように減衰していない例も見られるなど Fig. 14 と比べ減衰率はやや小さいように見えた。

これらフーリエ成分の位相差から Fig. 11 右図相当のプロットを作成したがサンプルが少なく明快さを欠いた。

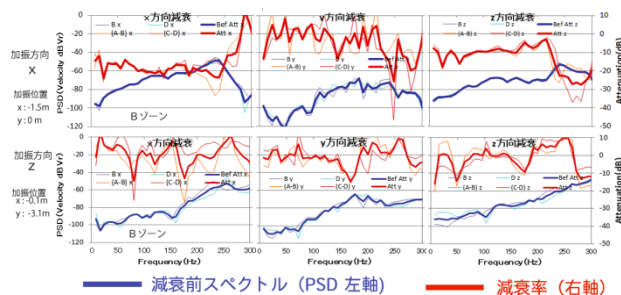


Figure 15: Spectra and expansion attenuation using hammering at maintenance path side.

4.3 伝播速度の測定

2.5 m 間隔にセンサーを置き、2 m 離れた床に砲丸を落下させ伝播速度を測定した (Fig. 16)。時間波形を見ると最も速い成分 p 波のおおよその到達時間が読み取れ、

xyz 3 方向とも 7.5 m が約 4 ms だったので 2 km/s と見積られる (Fig. 17)。

また、Fig. 16 の両端のセンサーのみ用い、位相速度を求めた。加振位置から Case1 ~ 3 のそれぞれで、時間波形をフーリエ変換し周波数ごとの位相差を求め、 2π 回るための必要時間から位相速度を求めたものである。定常振動ではないのでばらつきが大きい領域もあるがおおむね 1 km/s 程度と見積られる。Figure 17 は



Figure 16: Sensors for wave velocity measurement.

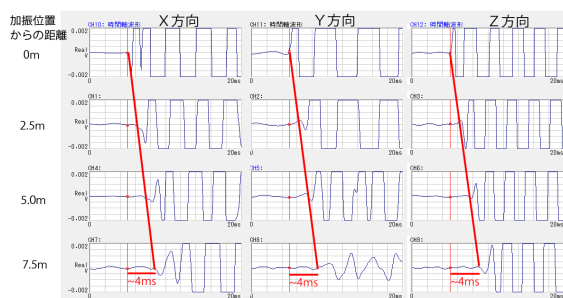


Figure 17: Wave forms at four positions after hammering.

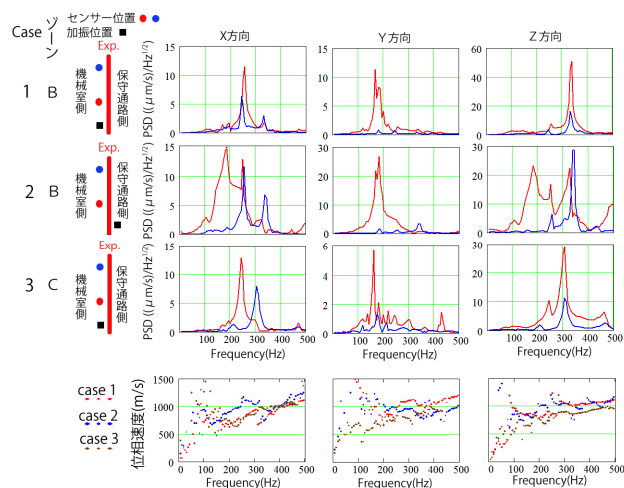


Figure 18: Hammering spectra and phase velocity.

縦波と見られ、Fig. 18 の横波に比べ速度は速い。

Figure 18 のスペクトルで赤線は加振位置に近いセンサーのもので青線は遠い方の値を 2 倍にして表示している。距離による減衰の様子もかなり差があることがわかる。

砲丸の落下は、一応白色の加振で床の固有振動が強調され伝搬する。y 方向の 160~180 Hz のピークはポンプの回転機による 59 Hz の整数倍 (3 倍) の線スペクトルに近い値なので Fig. 11 の y 方向の 175 Hz 付近の振動は床の構造による固有振動も含まれている可能性がある。

4.4 振動のモード

加振位置から 2 m と 9.5 m の 2 か所のセンサーの速度出力を一回積分し変位に換算、xy、yz、xz 面内の動きを Fig. 19 に示した。xy 面では簡単な水平運動、yz 面では直線に近い上下運動で SH 波、SV 波のように見える。コンクリートは 40 cm の厚さしかなく波長に比べ薄いため表面波 (レーリー波) のような円運動は見られない。

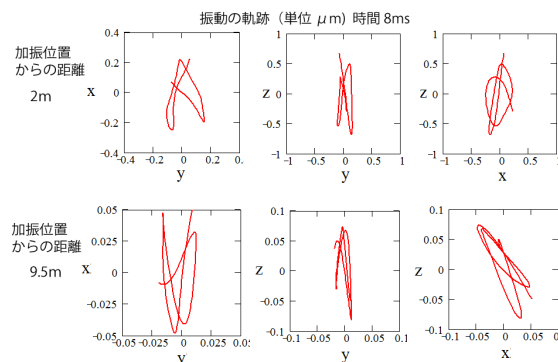


Figure 19: Trajectories at distant points by hammering.

5. まとめ

今回調査した Exp. は通常の稼働時、加振テスト時ともに 200 Hz 付近まで見る限り振幅で -5 dB (約 1/2) ~ -10 dB (1/3) に減衰していることが確認できた。従って Exp. を設けたことは効果があったと認められる。

40 cm のコンクリートの下は土なので振動の伝播は主にスラブが担っていると考えられる。砲丸の落下による P 波の速度は 2 km/s 程度であった。床の主な振動は P 波に続く S 波で伝播しているように見え、位相速度は 1 km/s 程度で p 波の 1/2 であった。収納部の天井 (距離 35 m) での x 方向の位相速度は 1200 m/s で今回の値に近い。

Exp. による減衰のモデルを考える際、減衰率とともに速度や位相も参考になると思われる。ハンマリングテストでもフーリエ変換で位相差は計算できるがサンプル数が少ないので連続的に加振できる装置を使って統計誤差を減らす必要がある。

機械室のポンプにより配水管や支柱も含め誘起される振動モードはいろいろある。まず各ポンプのところで加振テストを行いシミュレーションと測定でモデルを精緻化していけば対策を検討することができると考えられる。

収納部も磁石も重く、高い周波数は通りにくく、当然振幅も小さい。機械室では 270 Hz とか 340 Hz でピークがあるが電子ビームへの影響は小さいと考えられる。

参考文献

- [1] “大型放射光施設におけるストレージリング棟及び中央研究棟の設計検討業務 報告書”、理化学研究所、(株)日研設計、1990 June, pp.35-39.
- [2] 松井佐久夫, “第 11 回日本加速器学会年会プロシーディングス”, Proceedings of the 11th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Aomori, Japan, August 9-11, 2014, pp.302-306; https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOM/MOOM13.pdf