

SACLA 建屋の収納部床面変位計測

A FLOOR DEFORMATION OF SACLA BUILDING

木村洋昭^{#, A,B)}, 木内淳^{C)}, 甲斐智也^{C)}, 安積則義^{A)}, 松井佐久夫^{A)}
Hiroaki Kimura^{#, A,B)}, Jun Kiuchi^{C)}, Tomoya Kai^{C)}, Noriyoshi Azumi^{A)}, Sakuo Matsui^{A)}

^{A)} XFEL/RIKEN

^{B)} Japan Synchrotron Radiation Institute

^{C)} SPring-8 Service Co., Ltd

Abstract

The area of SACLA building, whose length is 640m, is not rigid enough. The bedrock area (cutting area) is only 1/5 of the building and 4/5 is located on the overlapping area. The maximum thickness of the embankment is over 50 m. The SACLA building consists of a light source building and an accelerator building. For the light source building, a direct foundation on the bedrock and an artificial layer replaced with crusher stone were adopted. A civil engineering designer anticipated that its subsidence is less than 2 mm/10 years. For the accelerator building, pillar foundation was adopted. The designer anticipated that its subsidence is 15 mm/10 years. These buildings were completed at March 2009. From construction phase, we have been measuring the deformation of the floor inside of the buildings. From these data, we think that subsidence of these buildings are within the predictions. We will present the data of vertical and horizontal deformation of the floor and show a relationship between the deformation and the foundation of SACLA building.

1. はじめに

長さが 100m を超えるような大型の加速器の建屋は厚さ 1m を超えるような頑丈なコンクリート躯体で構成され、竣工後の変形は殆どないように考えてしまうが、実際は常に変形し続けている。その変形は単なるコンクリートの乾燥収縮によるものではなく、建設されたエリアの地盤や基礎構造に由来する変形が多くの場合支配的である。特に加速器装置を設置する収納部床面の変位は、一度調整を行った加速器のアライメントを崩してしまうという意味で、加速器の長期的な性能に関係する。

SACLA 建屋は、1990 年に造成を行った SPring-8 サイトの中に建設された。建屋工事は 2007 年 3 月に開始され、2009 年 3 月に竣工した。我々は建設時期から現在まで加速器収納部の床面変位を測定し続けており^[1-7]、5 年以上の変位データが蓄積された。これまでのデータから、建屋全体の沈下の様子と建屋基礎構造との関係について示し、建屋設計時の沈下の予測と比較する。他に横方向の変位や、加速器棟と光源棟の境界部の季節変動に関しても報告する。

2. SACLA 建屋の基礎構造

全長 640m の SACLA の建屋は、加速器棟(400m)と光源棟(240m)の 2 つの建物からなり、全体の 1/5 が岩盤部(光源棟最下流部)、4/5 は盛土部の上に建設された(Figure 1(a)参照)^[1]。盛土部の最大厚さは約 50m で、その場所では、年間 5mm 以上の沈下が観測されていた^[5]。安定でない地盤の影響を避けるために、建屋ごとの要求精度に従い基礎構造が決められた。

線型加速器部が設置される加速器棟は、深度 20m

以上にある中硬岩層を支持層とする杭基礎が採用された(Figure 1(b)参照)。直径 1.6m 程度の場所打コンクリート杭を 2.5 本/7.5m で合計 136 本打設した。杭長は 16~52m で平均 30m であった。設計時に予想された建屋の最大沈下量は 15mm/10 年であった。

アライメントの要求精度が厳しいアンジュレータ部が設置される光源棟は、中硬岩層が露頭する部分では直接基礎、露頭していない部分では盛土・風化岩を高充填碎石(重量充填率:95%)に置換した人口岩盤を採用した(Figure 2 参照)。置換部の最も深いところは 18m であった。碎石置換部のうちでアンジュレータが設置される約 75%の部分は、雨水による碎石の微粒分の流出を抑えるために、重量比 2.5%の固化剤が添加された^[4]。設計時に予想されたこの建屋の最大沈下量は 2mm/10 年であった。

加速器棟と光源棟の境界部に関しては、2 つの建屋は異なる基礎構造を採用しているため、異なる沈下が予想された。加速器運転の見地から、境界部で床面が段差にならずに折れ曲がりになるように、2 つの建屋をエクspansionで切り離さずに、厚さ 40cm 床面コンクリートで繋いだ構造とした。

3. 経年変化

3.1 収納部床面の沈下

床面の上下方向変位の測定(水準測量)は Nikon Trimble 社の Dini03 で行った。Figure 1(c)に 2008 年 8 月を基準とした収納部床面の沈下の様子を示す。

解析時の固定点(基準点)は、中硬岩層露頭部にあるグラフ左端から 2 番目の点付近(Z=の 600m 付近)、収納部床面 40cm 下の底盤コンクリート上に設置した水準鉄である。この基準点は、SACLA 建屋の南側屋外の中硬岩層露頭部に設置した、建屋建築用一

[#] kimura@spring8.or.jp

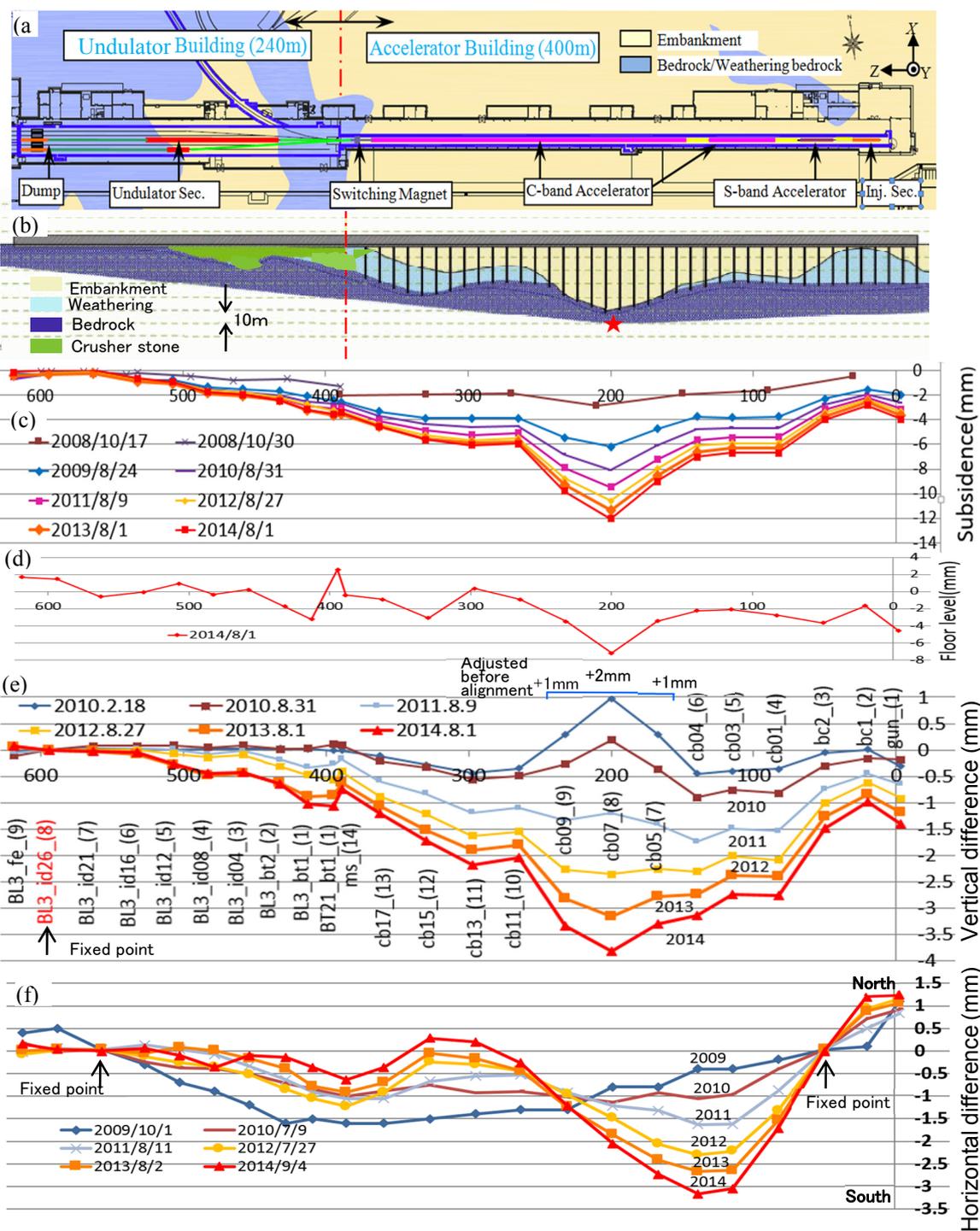


Figure 1: (a): Schematic view of SACLA building, (b): Cross section view of the foundation of SACLA building, (c): Subsidence of the floor from August, 2008, (d): Actual floor level at August, 2014, (e): Vertical difference of the reference line, (f): Horizontal difference of the reference line.

級基準点(水準点)に対して、2010年から2014年の間に0.25mm沈下している。

グラフから2014年までの8年間での最大沈下量は12mmである。この沈下のグラフで加速器棟部に関して Figure1 (b)の建屋の基礎構造と比べると、沈下の形状は杭の長さではなく、盛土層の厚さと大変良く一致している事がわかる。これは、沈下の原因と

してコンクリート杭の乾燥収縮ではなく、収縮して沈下し続ける盛土層が杭側面から摩擦により杭を圧縮している事が支配的である事がわかる。

このエリアでは沈下が大きいために建屋建設前からわかっていたので、それを考慮して床面コンクリート打設レベルを決めた。その為、実際の床面のレベルは Figure1 (d)に示すように、±5mmと沈下量よ

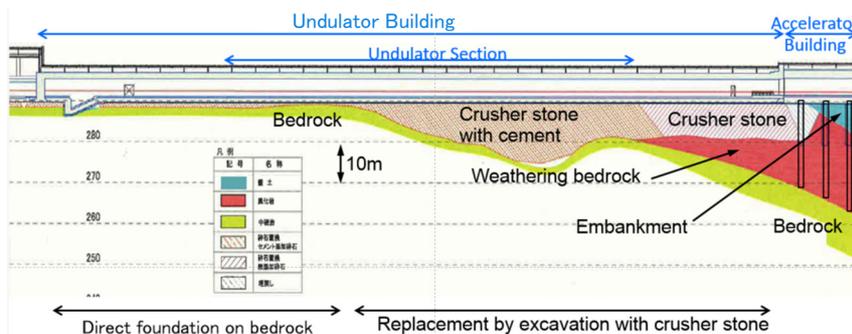


Figure 2: Cross section view of the foundation of light source building.

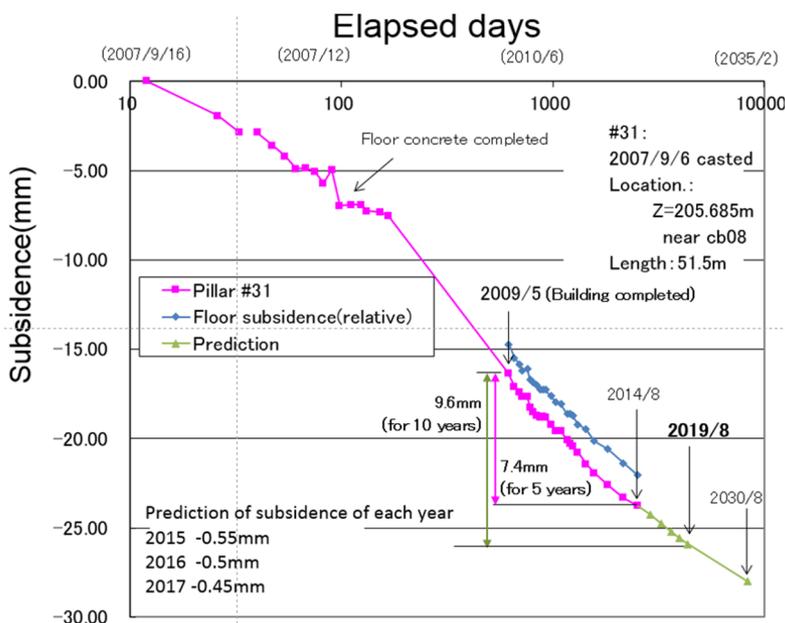


Figure 3: Subsidence of the top of the longest pillar of the foundation of Accelerator building.



りは小さくなっている。

3.2 コンクリート杭天端部の沈下測定

コンクリート杭の収縮を計測する為に、最も長い杭(Figure 1(b)中の星印)を打設する際、杭天端部に水準測量用鉞を設置し(Figure 3 の写真(上))、その後の天端部の沈下計測を行った。杭上部の構造物を作る際にもスリーブによりコンクリートコアを作ること、竣工後の現在でも測定することができる。これにより、コンクリート杭の収縮と杭上構造物(厚さ2m)の収縮とを分離して計測することができる(Figure 3 の写真(下))。測定は、インバー製のロッドでスケールを収納部床面上まで上げ、Dini03 で測定した。

Figure 3 に計測結果を示す。横軸の経過日数を対数にしてプロットすると、沈下は概ね直線になっている。杭近くの床面部の沈下を青でプロットしているが、ほぼ同様の変位を示している。建屋竣工後の2009年5月を起点と考えると、5年間の沈下は7.4mmである。さらに5年後(10年間)の沈下をグラ

フから予測すると9.6mmとなり、建屋設計時の予測である15mmより小さい。

3.3 リファレンスラインの変位

収納部内の加速器コンポーネントのアライメントの基準として、測量用モニュメントを設置した(Figure 4 参照)。モニュメントは、電子ビーム位置から-X方向(南側)に700mm オフセットした据付基準線上に、高さと位置を調整してあり、リファレンスラインとした。このモニュメントは、最初の設置時から動かしておらず、このリファレンスラインの変位は、現状の加速器の状態を表す。

Figure 1 (e) は加速器設置当初からのリファレンスラインの垂直方向の変位である。グラフ左端から2番目の点 BL3_id26 を固定点としている。Z=200mの付近はあらかじめ大きな沈下が予想されたので、cb05-09 の基準点を+1~2mm 上げてアライメントを行った。その効果は2011年ごろにはちょうど良かったが、2014年では最大沈下部となり、-4mm となっている。



Figure 4: Reference monuments.

光源棟部は、加速器棟に近い最上流部が一番沈下している。これは沈下の大きい加速器棟建屋が光源棟上流部を押し下げているのも要因と考えている。約5年間の最大沈下量は約1mmであり、今後5年間の沈下を同程度以下とすると、合計10年間で2mm以下と予想される。これも建屋設計時の予測値と同程度である。

Figure1 (f) はリファレンスラインの水平方向の変位である。測定は、Leica社製トータルステーションTDA5005(2013年まで)とLeica社製レーザートラックAT402(2014年)で行い、どちらもネットワーク解析の結果である。解析上、bc2とBL3_id21の2点を固定点としている。すべてのデータは夏期停止期間中に計測されており、経年変化の傾向がわかる。建屋ごとの直線を考えて、2014年では光源棟で±0.2mm、加速器棟で±2.2mm程度の変位となっている。

これらの変位に関しては、ゆっくりした変位であるので、現在のところ加速器運転上の問題になっていない。

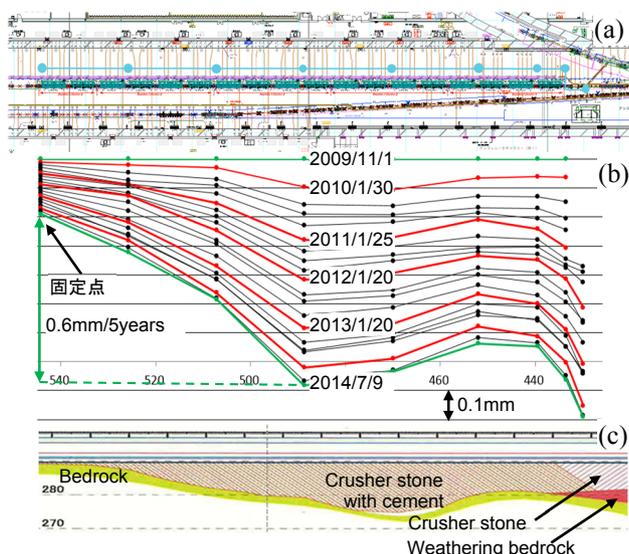


Figure 5: (a): Sensor position of HLS at the undulator area, (b): Obtained data of HLS, (c): Cross section view of the foundation of this area.

4. 季節変化

4.1 モニター

各種測量器を使った計測は、人が収納部に入っていくため、加速器の停止時にしか行う事ができない。床面変位の季節変化を計測するには、常時変位を計測するモニターシステムが必要である。

上下方向変位モニターとして、HLS(Hydrostatics Leveling System, 水管傾斜計)を設置した。センサーはFAGALE社のものを使用しており、Half-Fill(水管内に液面がある)を採用し、分解能は0.1μm以下である。他に、横方向の変位を測定するためにWPS(Wire Position Sensor System)も設置してある^[7]。

その中から今回は光源棟部に設置されたHLSのデータを報告する。

4.2 アンジュレータ部の変位

Figure 5 (a) に光源棟アンジュレータ部に設置されたHLSセンサーの位置を示す。アンジュレータ部ビーム位置から北側3mの床面に設置してある。

Figure 5 (b) に3ヶ月おきの沈下の変位のデータを示す。グラフ左端(アンジュレータ最下流部)を固定点とし、見やすいようにグラフを下方向に定数シフトしている。このアンジュレータ部の最大沈下は5年で0.6mmであった。グラフの濃淡の具合から、秋から春にかけて沈下速度が大きいと言える。

このグラフをFigure 5 (c)の地下構造と比べると、ここでも沈下は砕石部厚さと比例していることがわかる。固化剤添加の砕石部に比べて砕石のみの部分の沈下が大きく、固化剤添加の沈下抑制効果があるように見える。しかし、この部分からは風化岩層が残っており、はっきりと断言することはできない。

このアンジュレータセクションは、30μmという厳しいアライメント精度が要求され、X線ビームを使った方法で調整される。FEL発振の為に、床面

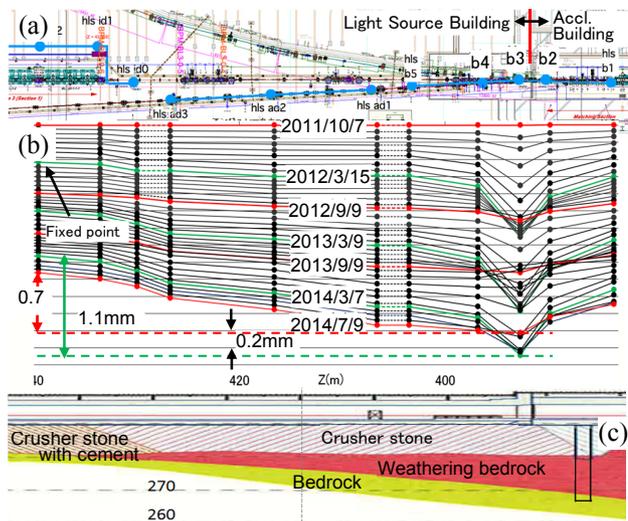


Figure 6: (a): Sensor position of HLS at the border between two buildings, (b): Obtained data of HLS, (c): Cross section view of the foundation of this area.

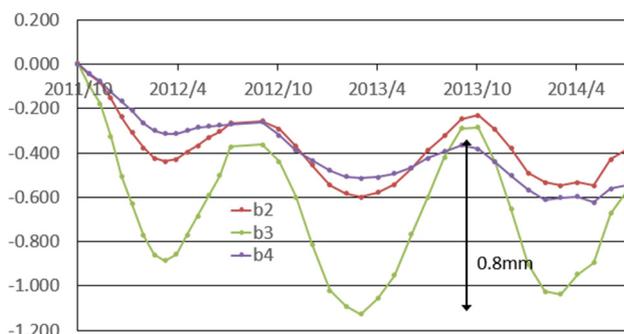


Figure 7: Time series data of the HLS sensors of b2-b4 in Figure 6(a).

の不等沈下が問題となるが、このセクションのすべてのコンポーネントは遠隔操作で位置を調整できる架台に載っており、最近では月 1 回程度の頻度で光軸調整を行っている。

しかしビームラインユーザー側から時々、数百 μm 程度の XFEL 光軸の調整要求がある。その時は、加速器オペレーターが、アンジュレータセクション全体を上下或いは水平方向に傾けることで調整している。

4.3 加速器棟と光源棟との境界部の変位

Figure 6 (a) に光源棟アンジュレータ上流部から加速器棟最下流部にかけて設置された HLS センサーの位置を示す。Figure 6 (b) に 1 ヶ月おきの沈下の変位のデータを示す。Figure 5(b)と同じく、グラフ左端を固定点とし、グラフを下方向に定数シフトしている。グラフの濃淡から、建屋境界部で大きな季節変位があることがわかる。この境界部に設置された b2-b4 のセンサーに関して、時系列で表したグラフを Figure 7 に示す。グラフから変位は 2 月と 9 月に極値をとり、その変位は 0.8mm 程度であることがわかる。HLS システムは 2011 年 10 月の夏明けを基準としているので冬期に大きく沈下しているように見えるが、Figure 1(d)(e)のグラフのこの部分が高くなっていることから、むしろ夏期に隆起していると考えている。

さらにこの現象を調べるため、この b2-b4 の部分にスパーインバー線を使用した伸縮計を設置した^[7]。

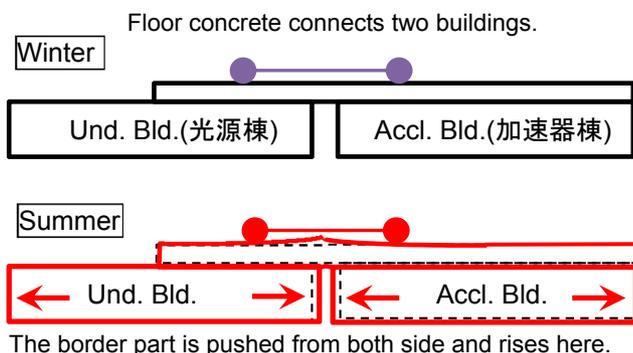


Figure 9: Schematic view of the border of two buildings.

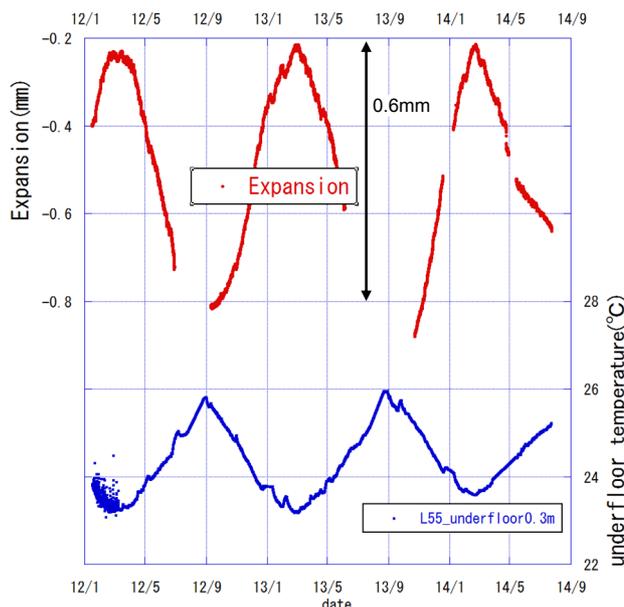


Figure 8: Data of extensometer set at b2-b4 in figure 6(a) and temperature of under floor at this area.

その測定結果とこの部分のコンクリート床下 30cm の温度の変化を Figure 8 に示す。グラフから温度の低い冬期に間隔が伸びている事がわかる。

前述したこの部分の構造から、この季節変位の原因は、夏期に 2 つの建屋が熱膨張してこの境界部を両側から圧縮し、床面コンクリートが盛り上がっているため考えている。(Figure 9 参照)

この事を考えると、この部分のコンクリート躯体に関して上下方向は繋がるが、横方向には繋がらない構造の方が良かったと考えている。たとえば光源棟側の床面コンクリートと底盤コンクリートの間を繋がらずに、鉄板をはさんでスライドできる構造にするという案が考えられる。

尚、Figure 7,8 のグラフで、2014 年 5 月から傾向が変わって変化が少し緩やかになっているが、これはこの時期に設置した、光源棟収納部躯体コンクリート天井と屋根の間の空間の空調の効果と考えている。

5. まとめ

以上今回のデータから SACLA 建屋基礎構造と変位に関してまとめる。

(i) 加速器棟(杭基礎)

- 建屋の沈下はその場所の杭長ではなく盛土層の厚さに比例する。
- 建屋完成後 5 年間の沈下(最大沈下部)は 7.4mm で、10 年での沈下は約 10mm と予想される。これは建屋設計時の予測値より小さい。

(ii) 光源棟 (中硬岩層直接基礎と砕石置換)

- 砕石置換部では、砕石に固化剤を添加した方が、沈下が小さいように見える。
- 建屋完成後 5 年間の沈下(最大沈下部)は 1mm で、10 年での沈下は 2mm 以下と予想される。これは建屋設計時の予測値と同程度である。

(iii) 加速器棟と光源棟の境界部

- 境界部では 0.8mm の上下方向の季節変位が観測されている。
- 2つの建屋を厚さ 40cm の床面コンクリートでないだのが原因と考えている。夏期に、それぞれの建屋が温度の上昇により境界部を両側から圧縮し、床面コンクリートが盛り上がる事で説明できる。

参考文献

- [1] H. Kimura, et al., “X線自由電子レーザー施設の設計と建設”, 本学会 2008 年報告集, p580.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj5_lam33/contents/PDF/WP/WP116.pdf
- [2] H. Kimura, et al., “XFEL 建屋の変位計測”, 本学会 2009 年報告集, p204.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj6/papers/wpcea02.pdf
- [3] H. Kimura, et al., “XFEL の据付基準と床面沈下計測”, 本学会 2010 年報告集, p1156.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/P_5PM/P_EH_5PM/THPS118.pdf
- [4] C. Arakawa, et al., “XFEL 光源棟建屋の地盤改良工事施工と挙動計測”, 本学会 2010 年報告集, p265.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj7/proceedings/LH_6A/M_2/FRLH05.pdf
- [5] T. Kai, et al., “SPRING-8 の BL29XUL と XFEL 建屋の変位計測”, 本学会 2011 年報告集, p758.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj8/proceedings/poster/MOPS149.pdf
- [6] S. Matsui, et al., “XFEL 床の横方向変位とアライメントに用いたワイヤによる測定方法(WPS)”, 本学会 2011 年報告集, p806.
- [7] S. Matsui, “SACLA 加速器の床変形と環境因子の相関”, 本学会 2013 年報告集, p106.
http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/proceedings/PDF/S/AOS/SAOS10.pdf