

# 免震技術の ILC 実験施設への適用可能性検討

## A POSSIBILITY STUDY WHICH APPLY SEISMIC ISOLATED STRUCTURE TO ILC EXPERIMENT FACILITIES

関根 一郎\*1, 稲井 慎介\*2, 若竹 亮\*2, 吉岡 正和\*3, 佐貫 智行\*4

Ichiro SEKINE, Shinsuke INAI, Ryo WAKATAKE, Masakazu YOSHIOKA and Tomoyuki SANUKI

The impact of an earthquake must be considered for implementation of the International Linear Collider (ILC) in Japan. Seismic isolation technology has been developed in Japan to reduce the impact of an earthquake. The stable and reliable operation of the ILC can be expected by applying seismic isolation technology to the ILC facilities. An elastic body inserted between the foundation and the structure will reduce vibration from the earthquake in the upper part structure, but could amplify the microtremor. Therefore, it is indispensable to study seismic isolation technology with regard to the microtremors. In this paper, after comparing seismic isolation technologies, the technology suitable for the ILC facilities is considered. Then, the impact of microtremors from seismic isolation technology is investigated.

**Keywords :** Seismic isolated structure, International linear collider, Accelerator, Earthquake  
免震, 国際リニアコライダー, 加速器, 地震

### 1. はじめに

国際リニアコライダー (ILC) は日本への誘致が期待されている電子・陽電子衝突型直線加速器である。日本は環太平洋造山帯に位置するので、立地に当たって地震の影響に対する対応が注目されることである。地震動は地下岩盤内では地表に比較して数分の 1 から 1/5 程度になることが知られており、地震による ILC 施設への影響は少ないと思われるが、わが国は地震国であることから地震に対する対応策を検討しておくことは有意義であると考えられ、地震の影響に対する検討も行われている<sup>1)</sup>。

また、わが国では地震の影響を少なくするための免震技術が発達している。免震技術を ILC 施設に適用することにより、より良好な運用が可能になる可能性がある<sup>2)</sup>。しかしながら、免震技術は地盤と構造物の間に柔軟に変形して地盤の揺れの上部構造物への伝達を低減するものであり、常時微動に対しては微小な変形が増幅することが懸念される。本研究では、ILC 施設に適した免震技術について検討するとともに、免震技術を適用した際の常時微動に対する構造物への影響について検討した。

### 2. ILC 施設の概要と免震技術の適用検討

#### 2.1 ILC 施設の概要

ILC の全体図を図 1 に示す<sup>3)</sup>。ILC では、電子、陽電子発生源からそれぞれ電子、陽電子を発生させ、ビームをダンピングリングで整え、メインリニアックで直線的に加速し、中央で衝突させる。その際に発生する素粒子を検出器で捉える実験装置である。

図 2 に ILC の概略の位置と後述する防災科学技術研究所の強震観測網 (KiK-net) の観測点の位置を併記した。ILC は北上山地南部に分布する花崗岩地帯が候補地とされ、図 1 の施設はトンネルと空洞

からなる地下施設として計画されている。土盛りは小さなところで約 20m、大きなところで約 600m である<sup>4)</sup>。

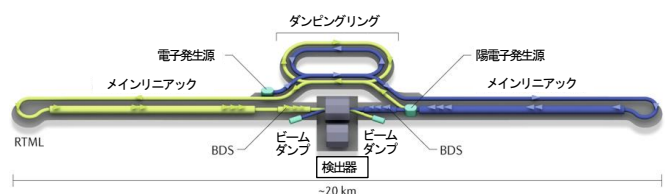


図 1 国際リニアコライダー (ILC) 全体図



図 2 ILC の北上候補サイトの位置と地震観測位置 (防災科学研究所 KiK-net HP に加筆)

\*1 戸田建設技術開発センター 博士 (工学)  
\*2 戸田建設技術開発センター 修士 (工学)  
\*3 東北大学理学部 理学博士  
\*4 東北大学理学部 博士 (理学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, Dr. Eng.  
Research and Development Center, TODA CORPORATION, M. Eng.  
Tohoku University, Faculty of science, Dr. Sci.  
Tohoku University, Faculty of science, Dr. Sci.

## 2.2 ILC 施設で想定される揺れ

一般に、地下は地表より地震時の揺れが小さくなることが知られている。図2に示したように、防災科学技術研究所では地表と地下約100mに多数の地震計を設置している。ここでは北上山地に位置する12か所の観測点について、東北地方太平洋沖地震時に強震観測網(KiK-net)で観測された地下の最大加速度と地表の最大加速度を調べ、図3に示した<sup>3)</sup>。地下は地表の約1/5になっており、地下では地上より地震時の被害を受けにくいことが分かる。

なお、図3に赤で示した4点は、北上山地に分布する花崗岩に設けられた観測点である。そのうちのひとつである藤沢観測点は ILC の候補地域に分布する千厩花崗岩体に位置しており、後述する免震効果の解析的検討では、藤沢観測点の地下100mで、東北地方太平洋沖地震時に観測された地震動を検討に使うことにした。

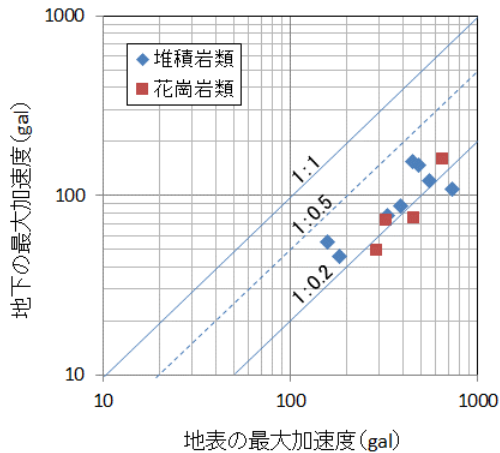


図3 東北地方太平洋沖地震時の北上山地地域における地表と地下の最大加速度比較

## 2.3 ILC 施設への免震技術適用検討

ILC 施設で最も重要な装置は、図1の中心部に位置する検出器である。図4に示すように、検出器は2種類計画されており<sup>3)</sup>、その基礎部分に免震装置を設置することを検討する。

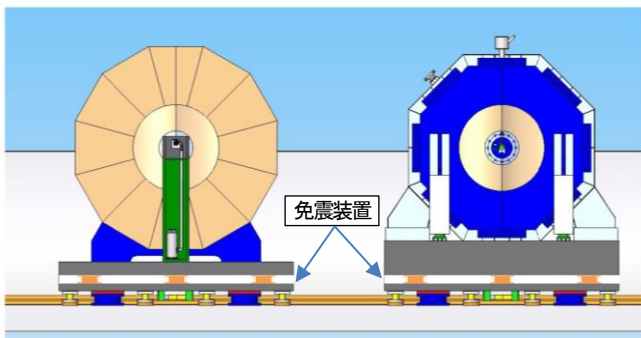


図4 ILC の2種類の検出器と免震技術適用検討位置

## 3. 免震技術の概要

### 3.1 免震装置の原理

免震装置は、地盤（もしくは他に土台となるもの）と建物の間に設置され、鉛直方向には構造物を支持しつつ、水平方向には柔軟に

変形して、建物が地盤の動きに追随しないで済むようにする装置である(図5)。水平方向に柔らかくすることで建物の固有周期が伸び、建物への地震入力が低減される。建物や地震の種類によって異なるが、免震建物は地震の揺れの強さを耐震建物の半分以下に抑えることが可能である。本研究では建築分野で適用が進んだ免震技術を ILC 施設に適用することを検討した。

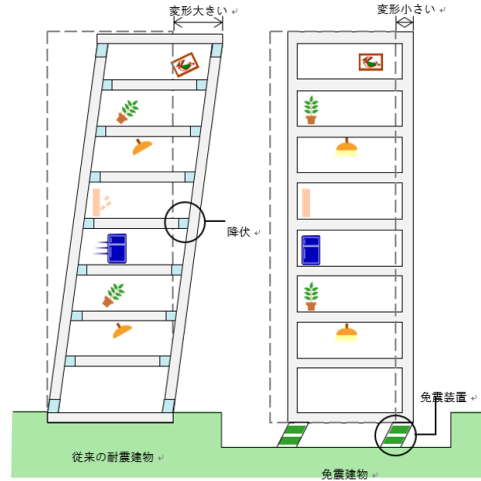


図5 耐震建物と免震建物の地震時挙動比較

### 3.2 免震装置の種類

表1に免震装置の一例を一覧表にして示す。積層ゴム、すべり支承、転がり支承などが一般に用いられる。その他、建物の過大な変形を抑制するダンパーが併用される。

表1 免震装置の種類

	原理	特徴	設置状況
積層ゴム支承	金属板とゴムを交互に重ねたもの。柔らかいゴムで水平方向にはゆっくりと変形して地震の揺れが建物に伝わらないようにする	天然ゴム系や鉛プラグ入り、高減衰積層ゴム等がある。	
弾性すべり支承	すべり材と表面の滑らかな鋼板、積層ゴムで構成される。地震時にすべり材が鋼板上を滑ることで、揺れが建物に伝わらないようにする	積層ゴム支承のみに比較して長周期化が可能。復元力を持たないため、積層ゴム支承等と併用して使用される。	
剛すべり支承	すべり支承の積層ゴム部がない以外は、弾性すべり支承と同じ。	基本的な特徴は弾性すべり支承と同じ。積層ゴム部がないため施工が煩雑となるが、常時微動の揺れを小さくできる。	
転がり支承	ボールベアリングとレールで構成され、地震時にベアリングがレールを転がることで、地震の揺れが建物に伝わらないようにする。	積層ゴム支承のみに比較して長周期化が可能。復元力を持たないため、積層ゴム支承等と併用して使用される。引張力に対しても抵抗可能。	

### 3.3 ILC 施設に適した免震装置の検討

通常、免震建物は積層ゴムや弾性すべり支承で支持されているため、耐震建物に比較して水平剛性が小さく、常時微動による揺れが大きくなる(図6)。極めて低振動な環境が求められる ILC 施設にお

いては、この揺れによって施設の使用性に問題が生じることが懸念される。

このため、ILC 検出器の免震化を検討する際には、常時微動による免震装置の揺れを抑制する機構が必要となり、その対策の一つとして剛すべり支承が挙げられる (図7)。

剛すべり支承は、弾性すべり支承と比較してすべり支承に積層ゴム部がないため、常時微動においては耐震建物に近い挙動となり、地震時にはすべりが生じて一般の免震建物と同じ挙動となる。

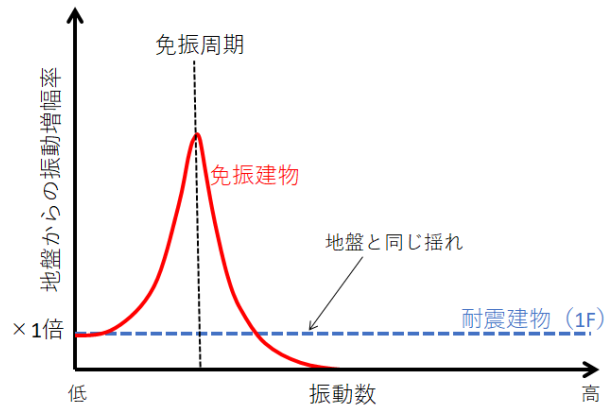


図6 常時微動による揺れのイメージ図

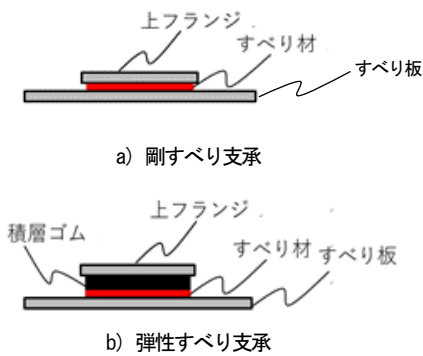
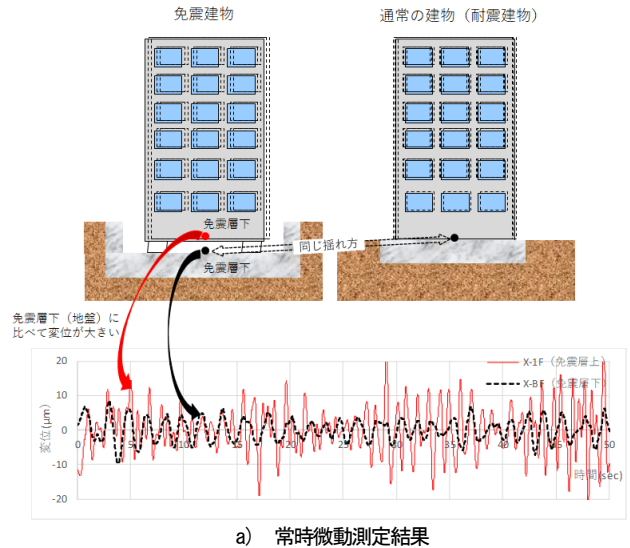


図7 すべり支承の種類

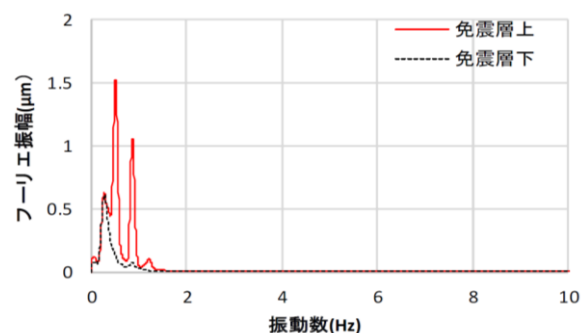
#### 4. 免震技術を適用した施設の振動測定例

免震建物が常時微動によりどの程度の揺れが生じているかを実際に測定した結果を図 8, 9 に示す。両建物の地震時の設計周期はいずれも 3 秒以上である。図 8a) は事務所ビル, 図 9a) は生産施設の測定例である。免震装置はいずれも積層ゴムと弾性すべり支承が用いられている。測定は加速度測定として、所定の前処理 (HPF 0.3Hz) をした後、積分を行うことにより変位を算出した。施設の場所によって変位は異なるが、外観的に見ると免震層下で数  $\mu\text{m}$ , 免震層上で数  $\mu\text{m}$ ~20  $\mu\text{m}$  程度であり、免震層上での変位増幅が確認できる。

図 8b), 9b) に変位時刻歴から求めたフーリエ振幅を示す。免震装置を取り付けたことにより 1Hz (1 秒) 程度の振動成分が免震層上で増幅していることが確認でき、また、常時微動では振幅依存性により、設計周期より卓越周期が短くなっていることがわかる。

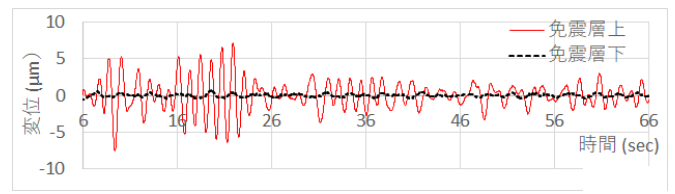


a) 常時微動測定結果

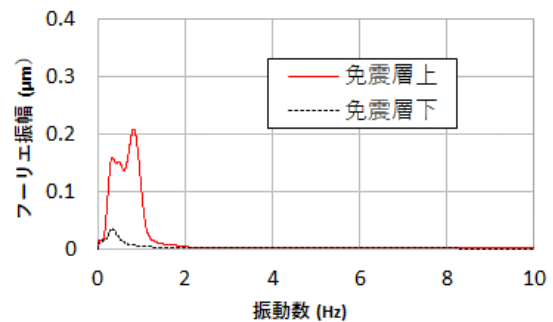


b) フーリエ振幅

図8 免震構造の測定結果 (オフィスビル)



a) 常時微動測定結果



b) フーリエ振幅

図9 免震構造の測定結果 (生産施設)

#### 5. 地震・微動応答解析

ILC 検出器を免震化した際に検出器にどの程度の加速度、変位が生じるか前述の藤沢の記録と簡易な解析モデルを用いて検討した。



### 5.1 解析モデル

図 10 に解析モデルを示す。解析モデルは、耐震モデル、免震モデル 1 (積層ゴム+オイルダンパー)、及び上述した剛すべり支承を用いた免震モデル 2 とした。耐震モデルは固有周期 0.44 秒程度 (ILC 一次モード) <sup>6)</sup>、免震モデル 1 は固有周期が 4.5 秒程度となるようにばねを設置したモデルとした (ILC 重量 15,500tf)。免震モデル 2 の剛すべりの初期剛性は約 10,000tf/cm、摩擦係数は 0.01 とした。免震モデルのオイルダンパーは、等価減衰定数で 20%程度を付加している。

また、微動解析においては、振幅依存性を考慮して免震周期は約 1 秒 (図 8,9 参照、一般に微振動領域では免震周期は短くなる) とするように剛性を調整した。また、ダンパーは微振動領域では効果がないものとして設置しなかった。

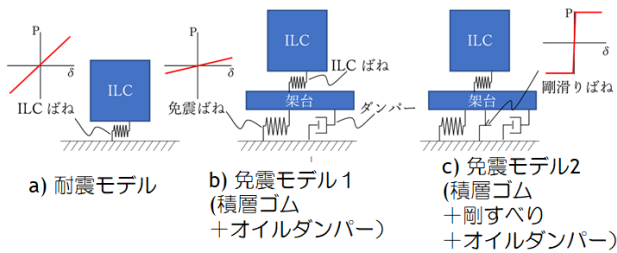


図 10 解析モデル

### 5.2 検討に用いた入力地震動

入力地震動は、防災科学技術研究所強震観測網 Kik-net で藤沢観測点の地下 100m で観測された東北地方太平洋沖地震時の地震波の一部 (EW 方向) とした (図 11)。また、常時微動は同様に藤沢観測点の静穏な状態 (2018. 7. 23. 正午) のデータ (EW 方向) を用いた (図 12)。

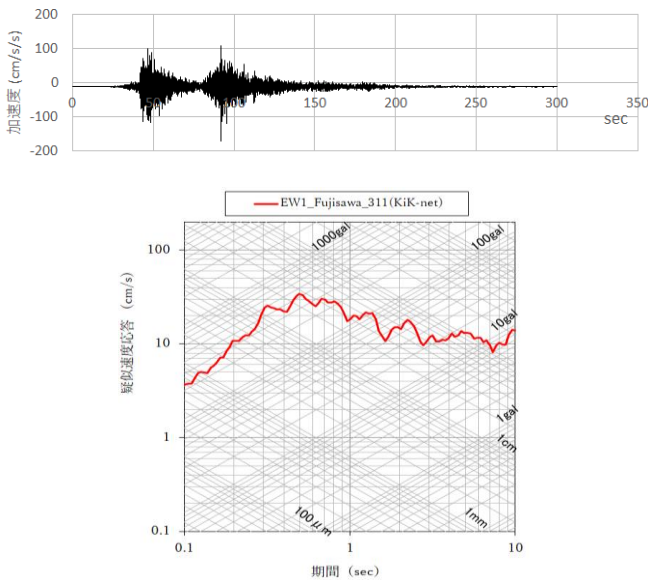


図 11 地震波の加速度波形と応答スペクトル

### 5.3 応答解析結果

#### 1) 地震時応答解析結果

図 13, 14 にそれぞれの解析モデルにおける ILC 検出器の加速度と変位の時刻歴を示す。耐震モデルでは最大応答加速度が 150gal 程

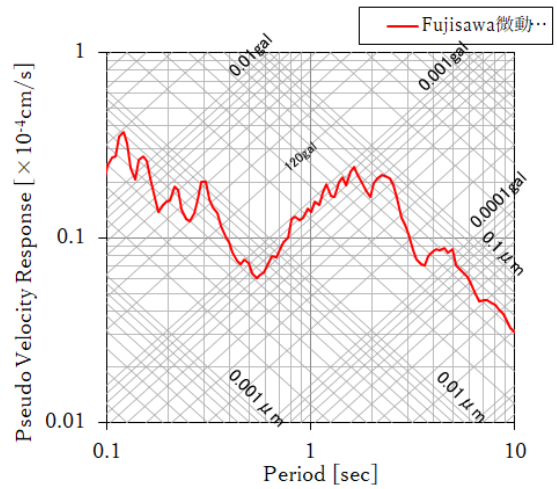
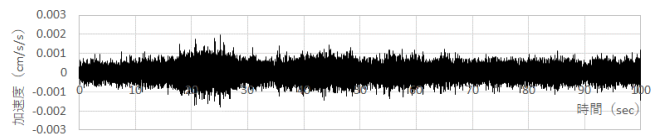


図 12 常時微動の加速度波形と応答スペクトル

度となっているのに対し、免震モデル 1 では 3gal 程度と大幅に小さく、免震の効果が顕著に表れている。特に免震効果が大いなのは図 11 に示したように今回検討に用いた入力波に長周期成分がほとんど含まれていないためである。また、免震モデル 2 においては、剛すべり支承の初期剛性の影響により、若干免震モデルよりも加速度応答は大きくなっているが、最大数 gal 程度であり、免震モデルと同様に十分な免震効果が得られている。以上から、ILC を免震化することにより、十分な地震応答低減効果が得られることが分かった。

また、図 14 に示した変位時刻歴では、耐震モデルで最大変位 2.5cm に対して免震モデルでは約 4.5cm と 2 倍程度の変位となっており、免震モデルの方が変位は大きくなっている。上述したように今回検討に用いた入力波には長周期成分が含まれていないため耐震モデルと免震モデルの差はこの程度であるが、長周期成分がより卓越する入力波においてはこの差は更に大きくなる。

また、免震モデル 2 では耐震モデルと同程度の変位となっている

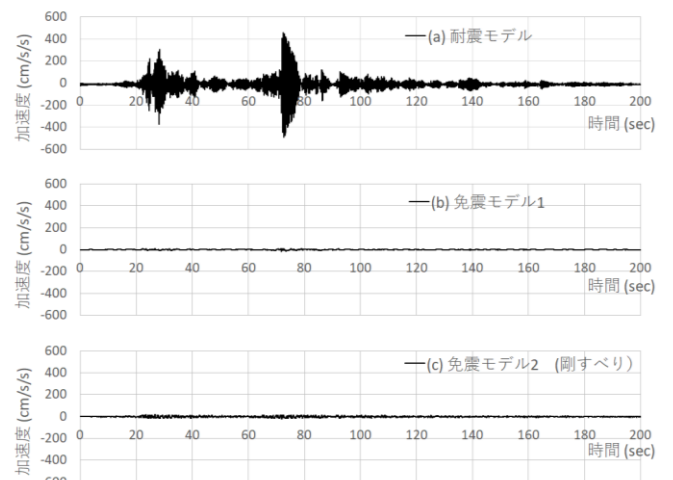


図 13 地震応答解析結果 (加速度時刻歴)

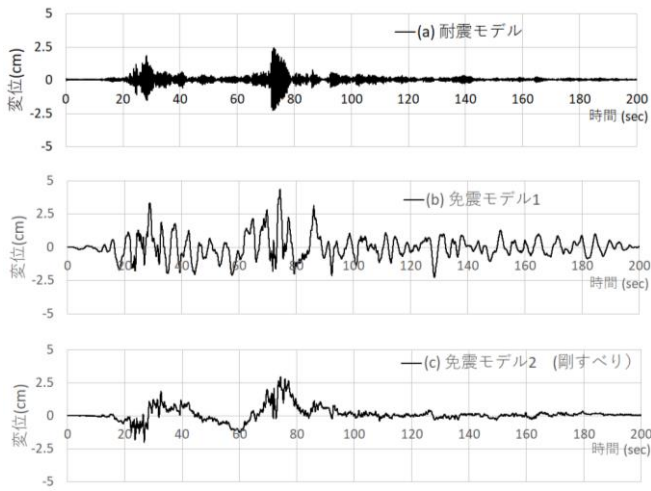


図 14 地震応答解析結果 (変位時刻歴)

が、これは入力波に長周期成分が含まれていないためであり、長周期成分が卓越する入力波では免震モデル1と免震モデル2の変位は同程度になると考えられる(支承に滑りが生じるレベルの入力では、免震モデル1と免震モデル2は概ね同じ挙動となる)。

図 15 に加速度時刻歴から算出した各解析モデルのフーリエ振幅を示す(フーリエ振幅は分析時間により縦軸の値が異なるのでここでは参考値とする)。入力波に長周期成分がほとんどないことから免震モデルでは明確なピークは見られない。

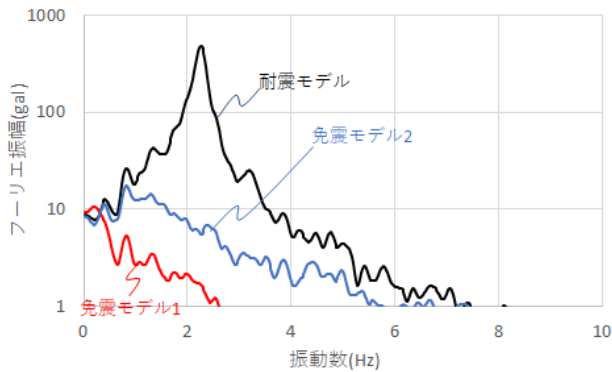


図 15 加速度フーリエ振幅

2) 微動応答解析結果

図 16 に微動応答解析結果を示す。ILC 施設においては、極めて小さい変位が問題となるため、解析結果は地盤に対する相対変位の時刻歴を示している。ILC を地盤に固定した場合の相対変位は約 0.01  $\mu\text{m}$  程度であるのに対し、免震モデル1では、免震層の剛性が小さいため、変位は最大で 0.06  $\mu\text{m}$  程度と数倍大きくなっている。一方、免震モデル2では、剛すべり支承の効果により、耐震モデルと概ね同程度の変位となっている。以上から、微振動領域では、ILC を免震化することにより変位が大きくなるものの、剛すべり支承を適用することにより、免震化しても変位の増大を抑えることが可能であることが確認できた。

図 17 に変位時刻歴から算出したフーリエ振幅を示す(フーリエ振幅は分析時間により縦軸の値が異なるのでここでは参考値とす

る)。免震モデル1が約 1Hz (周期 1 秒) にピークが見られるのに対し、免震モデル2では耐震モデルと同程度の振動特性となっている。

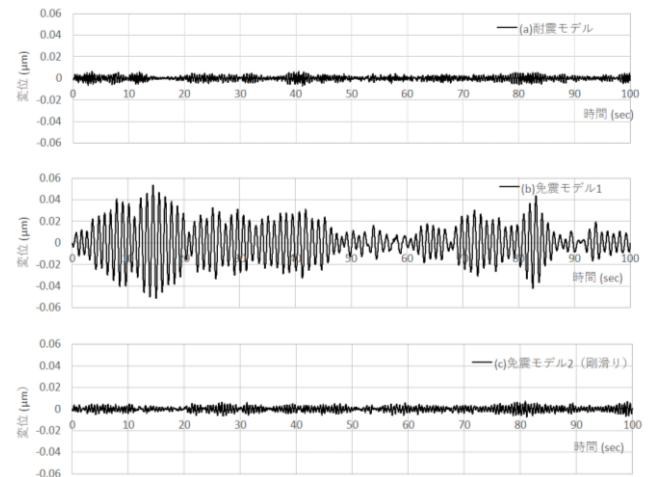


図 16 常時微動解析結果 (変位時刻歴)

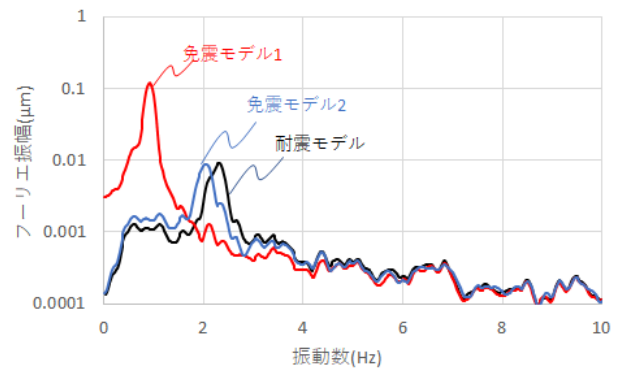


図 17 変位フーリエ振幅

6. おわりに

ILC 施設に適した免震技術について検討するとともに、応答解析を行い、免震技術の効果を検討した。その結果、積層ゴムと剛すべり支承を適用することにより、常時微動時に変位が増幅される現象を抑制できることが分かった。

なお、今回の検討では、ILC 検出器を 1 質点に簡略化したモデルで検討している。実際に近いモデルを用いて解析した場合、結果が異なってくる可能性がある。この点については今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1) Karsten Buesser, Detectors and Earthquakes, ACLW2018 Fukuoka, 2018
- 2) 関根一郎, 稲井慎介, 若竹亮, 吉岡正和, 佐貫智行, ILC 実験施設への免震技術適用可能性検討, 第 15 回日本加速器学会年会, FROM11, 2018
- 3) The international linear collider Technical Design Report, ILC-REPORT-2013-040, 2013
- 4) 坂下晋, 横山幸也, 松下典史, 平松晋一, 佐貫智行, ILC 建設地点としての北上サイトの物理探査による岩盤特性, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集 講演番号 48, 2015
- 5) 関根一郎, 早野仁司, 吉岡正和, 佐貫智行, 山下了, 汐見勝彦, 基盤強震観測網 KiK-net で得られた ILC 北上候補サイト周辺の地震動の地表・地下比較, 第 13 回日本加速器学会年会, 2016
- 6) Henri Videau, Earthquake impact, CFS meeting KEK, 2018