

# GLC 測定器における衝突点部の支持構造設計

山岡広、田内利明

高エネルギー加速器研究機構

## 概要

本件に関する報告の一部は、平成 13 年度に核融合科学研究所で主催された技術研究会で報告された<sup>[1]</sup>。本報告では、その後の R&D の結果について述べる。

現在、本所では全長で 25km の直線型ビームラインを地下に建設し、互いに電子と陽電子を衝突させて実験をおこなう事を目的とする GLC 計画(Global Linear Collider Project)(旧:JLC 計画)の R&D が精力的に進められている。この計画で用いられる予定の測定器を図 1 (a)に示す。高さは約 16m あり、総重量は約 12000 トンである。互いのビームは測定器の中心で衝突し、そのときの反応はビームパイプに対して同心円上に配置された各種の検出器で測定される。

この測定器への 1 つの要求として、「高い頻度でのビームの衝突」がある。これは、もし地盤振動等により検出器が振動していた場合、ビームの衝突頻度の低下をまねいてしまうからである。このため、互いに 4 m 離れている加速器マグネット(QC1)間での振動の相対振幅は 1mm 以下に抑えなければならない。また、物理的な大きさの点から自重に対しても安定な構造であることが要求される。

このため、設計では支持構造物の構造解析や振動解析をおこない、試験では各種テストピースを製作し振動試験を実施した。

## 1 衝突点付近の構造

衝突点近傍の図を図 1 (b)に示す。構造は、ビームパイプを中心にビームを絞り込むための QC1 とよばれるマグネット、磁場を補正するための Compensation Magnet があり、そしてこれらは、100mm 厚のバックグラウンドを減らしたためのタングステンマスク内に設置される。計画ではこれらの機器を 10mm 厚の CFRP サポートチューブ内に組み込み、測定器の鉄構造体両端で支えることにした。

## 2 基礎解析

基礎的な解析として自重によるチューブの変形や応力を調べるための静解析をし、固有振動数を調べるた

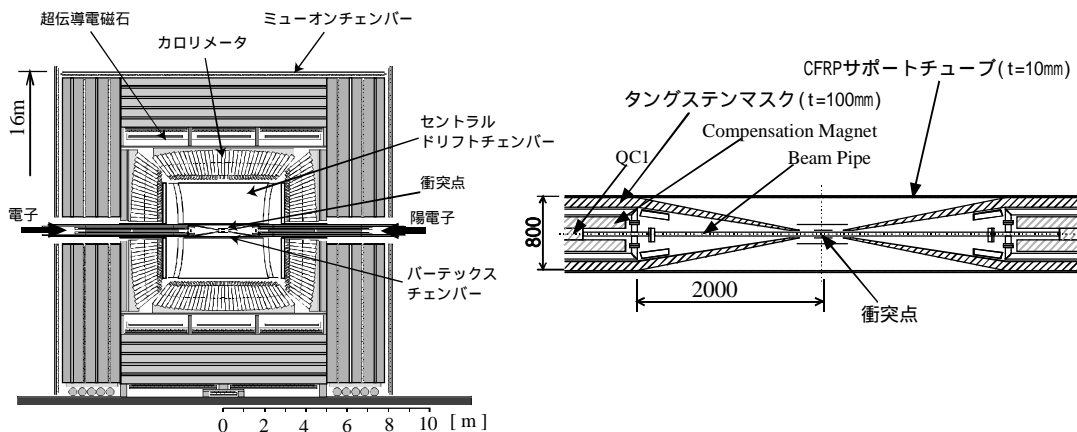


図 1. (a) GLC 測定器計画図 (右) (b) 衝突点構造図 (左)

めの振動解析を実施した。解析モデルとして、サポートチューブが両端支持された場合やチューブなしでタングステンマスクだけで片持ち支持された場合、更に、振動解析では支持点が 15Hz 固有振動数を持つ架台に取り付けられた場合を用いた。

静解析の結果、チューブを後方端部だけで支持すると変形量が大きすぎることから途中にもう一点、支持点が必要であることがわかり、この結果、変形量は 0.09mm、応力は 23MPa に抑えることができた。固有振動数は 15Hz のバネで支持された場合、1 次から 3 次までのモードが 15Hz、54Hz、93Hz と計算された。またサポートチューブは自重による変形・応力及び固有振動数の改善するにはあまり効果が無いことがわかった。

### 3 検討項目

基礎的な解析が終わった段階で以下の事を更に検討することが必要になり、種々の解析・試験をおこなった。

#### 3.1 解析と実構造との整合性

基礎解析の段階で種々の解析を実施したが、どの程度現実と整合しているかという疑問が残った。これについては、実機モデルを製作すれば確認することができるが、物理的な大きさや製作コストのことを考えると非常に大変なことである。このため、幾つかの小さなモデルを製作し解析値と比較した。

#### 3.2 サポートチューブの必要性

厚さ 10mm の CFRP サポートチューブの曲げ剛性はタングステンマスクの 1/20 であることから、変形や固有振動数の改善にはあまり貢献していない。サポートチューブの採用をやめることによって、実機の組み立て時にはタングステンマスクを片側からそれぞれ片持ち支持するだけでよいので組み立て易さという利点が生まれる。しかし、両側の QC1 は、独立に動くことになり、互いの振動レベルの差は予測できなくなる。このことから、本当にサポートチューブは不要であるか検討が必要になった。

#### 3.3 実際の振動レベル

実際に測定された地盤振動の値を入力した時に QC1 のおける振動レベルがどのくらいであるか把握する必要がある。

#### 3.4 タングステンマスクの剛体化

タングステンマスクは物理的な大きさの観点から分割されていない 1 本のチューブとして製作することは不可能である。このため、幾つかのピースから組み立てられるが、このことは、剛性の低下と解析の複雑さを招いてしまう。このため、1 体のチューブに近づけるための検討が必要である。

## 4 解析・試験結果

#### 4.1 解析と実構造との整合性

##### (1) 試験方法

試験形状を図 2 に示す。図 2-(a),(b)は 1 枚のアルミ板を片持ち及び両持ちで支えた場合。図 2-(c)は同じ大きさのアルミ板を薄い板で接続し、両端で支えた場合。さらに、図 2-(d)は実機の 1/10 の大きさのチューブである。これらを加振機に取り付け、3Hz から 1000Hz の swept sine 波で加振させるか、又は、インパルスハンマー

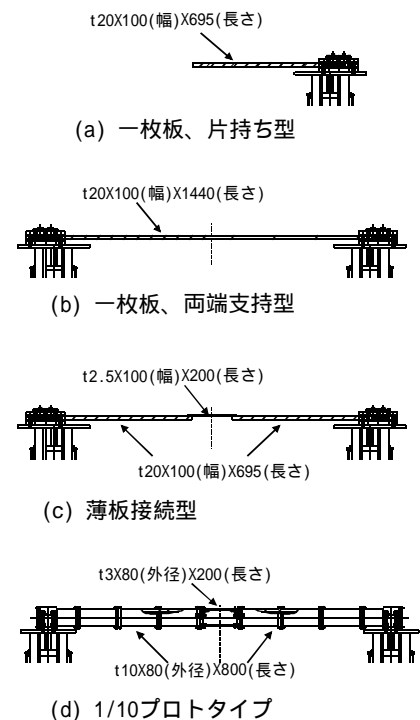


図 2. 試験形状

で叩いて加振した。これにより固有振動数の測定と、周波数応答関数を求めることでモード形状測定をおこなった。

## (2) 試験結果

図 2-(b)での試験結果を図 3 に示す。継ぎ目のない形状(図 2-(a),(b))での試験は、解析値と良く一致した。

ボルトで接続された形状(図 2-(c),(d))では、2 次モードまでは比較的良く解析と一致したが、それ以上の高次モードでは解析値とのずれがおきた。原因として、試験片を固定している架台部分の構造と、ボルト接続部の強さが解析に正しく反映されていないためと考えられる。解析でより詳細なモデルをつくることで改善されると思われるが、解析時間とディスクスペースの増大を招くことになり、あまり得策ではないと考えられる。したがって、設計段階で、できるだけ単純な構造を考えることが重要である。

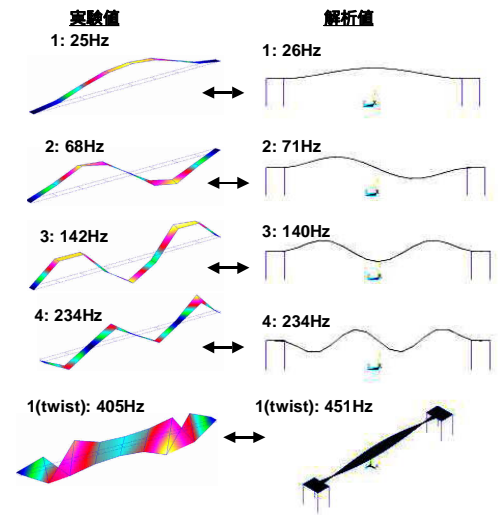


図 3. 試験と解析結果の比較

## 4.2 サポートチューブの必要性について

試験方法として 2 組の同じ大きさのアルミ板を向かい合わせにセットし同時に同じ加振力を与え、それぞれの固有振動数とモードシェープを測定した。その後、互いを薄いアルミの板で接続し同じ試験をし、解析結果と比較した。薄いアルミ板との曲げ剛性は 512 倍違う。

試験結果を図 4 に示す。互いを繋がらない状態(図 4 左側)では 1 次の固有振動数において約 5Hz 程度互いのピークがずれている。しかし、1/512 の剛性しか持たない薄い板で接続することによって、そのずれを吸収し互いに関連性をもたせることができた(図 4 右側)。実機での組み立てを考えた場合、2 組を全く同じ剛性を持つ構造にすることは非常に難しいと想像され、どうしても固有振動数にずれが出てしまうと考えられる。したがって、振動モードに関連性を持たせるためにはサポートチューブは必要であると考えられる。

## 4.3 振動レベルの推測

QC1 での振動レベルを推測するにあたって実際に本所で測定された地盤振動データが用いられた。このデータを解析モデルの拘束点に入力し、その時のレスポンスを求めた。20Hz の固有振動数をもつ架台の上にサポートチューブを片側 3 点で固定したと仮定した時の上下方向の解析結果を図 5 に示す。1 つめのピークでは  $22\text{nm}/\text{Hz}^{1/2}$  と計算され、基準値の 1nm より大きい。しかし、このモードはサポートチューブが同じ形を保ったまま振動しているだけなので相対変位はゼロである。問題となるのは 2 つ目のピークで、このモードは

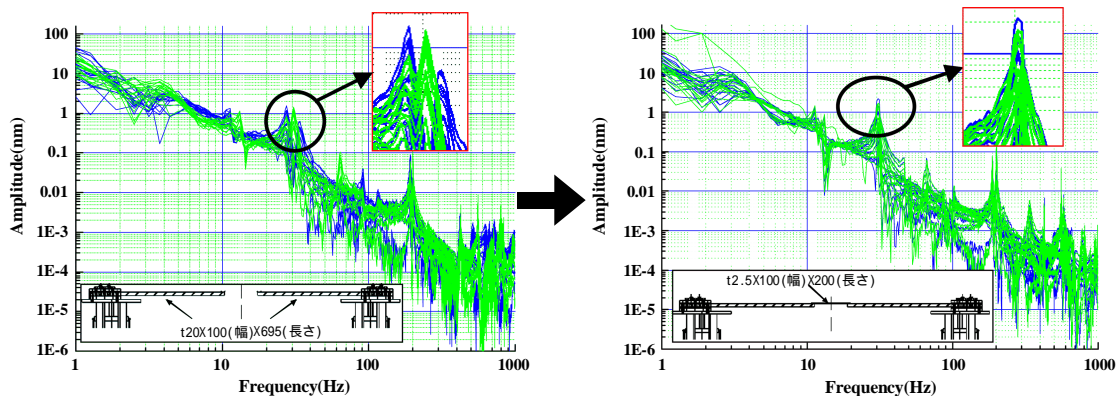


図 4. 加振試験結果

互いに逆位相になるが、最大振幅は  $0.08 \text{ nm/Hz}^{1/2}$  であるので基準値以下となった。また、振幅は固有振動数が高くなれば値が減少するので、重要な事は、できるだけ拘束点の剛性を上げることである。

#### 4.4 タングステンマスクの剛体化

通常幾つかのピースを 1 体に組む時にはボルトで接続するが、この場合、自重をボルトだけで受けてしまうと、全体剛性はボルトの強度に依存してしまう。強度不足の場合、接続面のずれや固有振動数の低下を招いてしまい、一本のチューブと比べて剛性が低くなってしまふ。また、解析でボルト強度を正しく入力することは困難であることから、荷重はできるだけ面で受け、ボルト強度に頼らない構造にすることが大切である。

試験では、外径 80mm、厚さ 10mm のアルミパイプを軸方向に 4 本繋げた状態で組み立て、更に、接続面がテーパの物を用意し荷重をテーパの面で受けるようにした。又、ボルトだけで荷重を受けるフラットな物の 2 種類を用意し、固有振動数の違いを測定した。また、ボルトの接続本数を 12 本、6 本、3 本と変化させた時の違いも測定した。測定結果を図 6 に示す。横軸はボルトの締め付け荷重である。高次モードになるにしたがって、フラット面のパイプはテーパのパイプに比べて固有振動数が低くなった。これは、テーパの物と比べて 1 本のパイプとしての全体剛性が低いことを示す。また、テーパの接続面の方はボルトの本数が減っても固有振動数の低下はあまり無かったが、フラットな接続面の方は、特に高次モードで大きく低下することがわかった。このことから、荷重をテーパ状の面で受けることは有効であるといえる。

## 5 まとめ

幾つかの解析・試験結果から言えることは、構造の単純化と支持構造の剛体化である。これは、構造を単純化することで解析モデルが作り易くなることから、実構造との整合性がよくなると考えられる。このため、テーパ形の接続形状が上げられるが、今後、形状の最適化と組立て精度の確保の方法を考える必要がある。また、相対振動レベルの解析では、基準位置での相対振幅が許容値以下となった。しかし、固定形状をより剛体化することができれば固有振動数が高くなり、さらに振動レベルを下げるができる。したがって、より具体的な固定形状を考える必要がある。

サポートチューブはそれ自身が非常に剛性の弱いものでも互いの固有振動数のずれを吸収するのに有効であることから必要なものであることがわかった。ただし、このことで実機を測定器に設置する時の作業が非常に難しくなると思われる、今後、設置方法の検討が必要である。

## 参考文献

- [1] 山岡 広, et al, “JLC 測定器衝突点の支持構造設計”, 平成 13 年度核融合科学研究所技術研究会報告集, 平成 14 年 3 月, P61 – P64

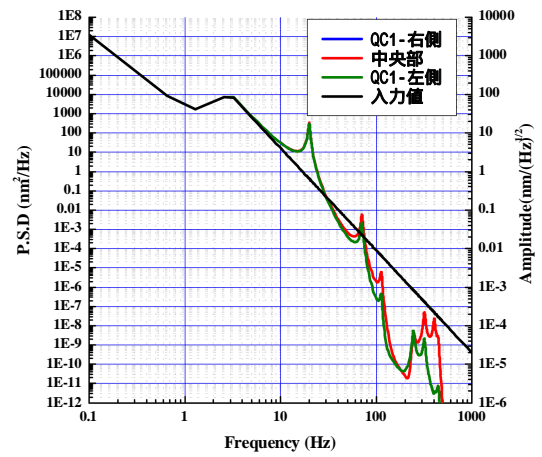


図 5. 地盤振動による QC1 の変位

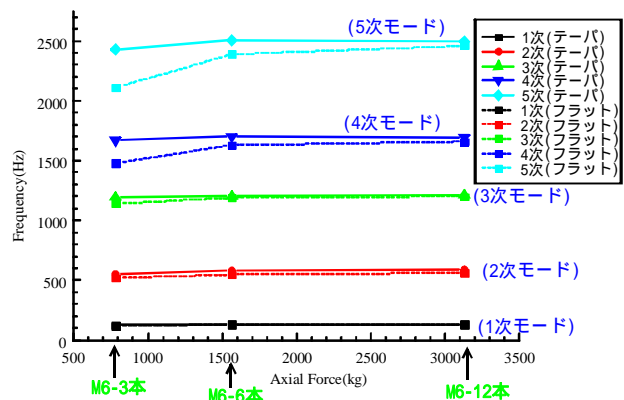


図 6. 接続強度確認試験結果